

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЧЕРДЫНЦЕВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**КОМПЛЕКС СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА И
МЕТОДОЛОГИЯ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ НА НЕФТЯНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ**

Специальность 1.6.9 – «Геофизика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук, профессор
Талалай Александр Григорьевич

Екатеринбург – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.....	22
1.1 Обзор литературных источников по результатам изучения сейсмоэлектрических явлений в горных породах	22
1.2 Особенности возникновения и характер сейсмоэлектрического эффекта в горных породах.....	38
Выводы по главе 1	40
2 МЕТОД ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ.....	42
2.1 Естественные электрические поля в скважинах	42
2.1.1 Диффузионно-адсорбционные электрические поля.....	46
2.1.2 Фильтрационные электрические поля.....	55
2.1.3 Электрические поля, связанные с окислительно-восстановительными процессами	57
2.2. Особенности естественных геоэлектрических полей в карбонатных разрезах скважин	58
2.3 Интерпретация диаграмм метода потенциалов собственной поляризации	60
2.3.1 Качественная интерпретация диаграмм ПС.....	60
Определение границ пластов	60
2.3.2 Количественная интерпретация диаграмм ПС	61
Определение минерализации пластовых вод.....	61
Определение пористости коллекторов.....	63
Определение глинистости коллекторов.....	65
Выводы по главе 2.....	66
3 СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ.....	67
3.1 Сейсмоэлектрические явления в горных породах	67

3.2 Влияние акустического воздействия на естественные электрические поля в скважинах и на физические свойства горных пород	72
3.2.1 Влияние акустического воздействия на электропроводность коллекторов нефти и газа.....	72
3.2.2 Влияние акустического воздействия на фильтрационные свойства горных пород.....	76
3.2.3. Влияние акустического воздействия на естественные электрические поля в скважинах.....	77
3.3. Метод сейсмoeлектрического каротажа	79
3.4. Применение сейсмoeлектрического каротажа в открытом стволе.....	80
3.5. Применение сейсмoeлектрического каротажа в обсаженных скважинах	83
Выводы по главе 3.....	87
4 МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ОРЕНБУРГСКОГО РЕГИОНА	89
4.1. Аппаратура для скважинных геофизических исследований.....	89
4.1.1. Технические данные аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа.....	95
4.1.2. Каротажный регистрирующий комплекс «Карат».....	96
4.1.3. SCADA – система, применяемая в каротажной лаборатории	101
4.2. Результаты сейсмoeлектрических каротажных исследований на нефтяных месторождениях Оренбургской области	102
4.2.1. Каротажные исследования в открытом стволе	102
Исследования в терригенном разрезе	103
Исследования в карбонатных разрезах	106
4.2.2. Каротажные исследования в обсаженных скважинах.....	117
Исследования зон перфорации эксплуатационных колонн.....	117
Выводы по главе 4.....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
Основные выводы и результаты диссертационной работы.....	128

<i>Рекомендации</i>	129
<i>Перспективы дальнейшей разработки темы.....</i>	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130

СПИСОК РИСУНКОВ И ТАБЛИЦ

Рис. 2.1	Схема регистрации разности электрических потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$	44
Рис. 2.2	Диаграмма разности электрических потенциалов в скважине $\Delta U_{\text{ПС}}$	45
Рис. 2.3	Рис. 2.3. Схема образования диффузионных потенциалов на контакте двух растворов электролита различной концентрации	47
Рис. 2.4	Схема возникновения диффузионно-адсорбционного поля в пористом продуктивном пласте нефтяной скважины	51
Рис. 2.5	Эквивалентная электрическая схема поля собственной поляризации в нефтяной скважине в виде замкнутого электрического контура	52
Рис. 2.6	Номограмма определения коэффициента учета мощности пластов β в зависимости от отношения мощности пласта h к диаметру скважины d	53
Рис. 2.7	Влияние зоны проникновения на амплитуду $\Delta U_{\text{ПС}}$	54
Рис. 2.8	Схема возникновения фильтрационных потенциалов в поровом канале пласта	55
Рис. 2.9	Схема определения границ пластов по диаграммам ПС по правилу полумаксимума	61
Рис. 2.10	Номограмма определения удельного электрического сопротивления пластовых вод ρ_v методом двух растворов	63

Рис. 2.11	Номограмма определения пористости коллекторов по параметру $\alpha_{\text{ПС}}$ при известном значении их глинистости по В.Н. Дахнову	65
Рис. 2.12	Номограмма определения глинистости водонасыщенных песчаных коллекторов по параметру $\alpha_{\text{ПС}}$ по Р. Дебранду	66
Рис. 3.1	Схема двойного электрического слоя в скважинах	69
Рис. 3.2	Схема регистрации диаграмм сейсмoeлектрического каротажа	79
Рис. 3.3	Пример литологического расчленения разреза скважины по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа	82
Рис. 3.4	Пример определения интервала перфорации и качества прострела обсадной колонны по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа	85
Рис. 4.1	Схема измерительной установки мегаэлектродного сейсмoeлектрического каротажа	90
Рис. 4.2	Волновой пакет акустического воздействия скважинного прибора	91
Рис. 4.3	Принципиальная схема мегаэлектродного блока	93
Рис. 4.4	Принципиальная схема глубинного прибора мегаэлектродного сейсмoeлектрического каротажа	94
Рис. 4.5	Функциональная схема прохождения сигналов в режиме работы цифрового регистратора	99
Рис. 4.6	Структурная схема SCADA-системы, применяемой при сейсмoeлектрическом каротаже	101
Рис. 4.7	Результаты литологического расчленения терригенного геологического разреза скважины по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа	104

Рис. 4.8	Результаты литологического расчленения карбонатного геологического разреза скважины по диаграммам ПС при помощи одного и нескольких измерительных электродов	108
Рис. 4.9	Результаты литологического расчленения геологического разреза по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа на различных частотах акустического воздействия	110
Рис. 4.10	Результаты литологического расчленения карбонатного геологического разреза нефтяной скважины по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа	113
Рис. 4.11	Результаты определения интервала и качества перфорации эксплуатационной колонны в нефтяной скважине по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа	119
Рис.4.12	Результаты определения интервала и качества перфорации эксплуатационной колонны в нефтяной скважине по диаграммам мегаэлектродного сейсмoeлектрического каротажа	122
Табл. 2.1	Значения $E_{ПС}$ в зависимости от соотношения $C_{П}/C_{С}$	54

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Повышение информативности геофизических методов исследования скважин является важной и актуальной задачей промышленной геофизики при поисках, разведке, разработке и эксплуатации месторождений углеводородного сырья.

Превалирующую роль при этом играют качество входных данных каротажа и объективность интерпретации геофизической информации [60, 67].

Сейсмoeлектрический каротаж – геофизический метод исследования скважин, основанный на изучении и анализе характера сейсмoeлектрического эффекта, возникающего в результате электризации пористых насыщенных сред при воздействии на них упругим полем [73, 74].

Сейсмoeлектрические скважинные геофизические исследования, проведенные в рамках настоящей работы на нефтяных месторождениях Оренбургской области, обеспечивают повышение точности и детальности литологического расчленения геологических разрезов скважин в открытом стволе в процессе их строительства [71, 73], а также точности оценки степени гидродинамической сообщаемости продуктивных пластов с внутренней полостью обсадных эксплуатационных колонн при прострелочно-взрывных работах в обсаженных скважинах.

В настоящей работе рассматриваются вопросы повышения информативности традиционного скважинного метода геофизической разведки - метода потенциалов собственной (спонтанной, самопроизвольной) поляризации (ПС) за счет применения акустического воздействия на исследуемое околоскважинное пространство [74], а также использования в глубинном скважинном приборе в качестве чувствительного элемента мегаэлектродного блока – группы измерительных электродов.

Степень научной разработанности темы исследования.

Исследования по изучению сейсмoeлектрического эффекта представлены в трудах таких российских и зарубежных ученых, как С. Мочли, Л. Блау, Л. Стетхем, Р. Р. Томсон, А. Г. Иванов, В. А. Волков, Я. И. Френкель, М. П. Волярович, Э. И. Пархоменко, М. А. Био, М. С. Анцыферов, Н. М. Нейштадт, Л. М. Осипов, Чжао Цзе-Сань, Р. С. Зиангиров, И. В. Гаскаров, В. В. Кормильцев, А. Н. Ратушняк, В. Б. Писецкий, Е. Г. Соломин, М. Б. Гохберг, В. А. Моргунов, О. А. Похотелов, О. А. Потапов, С. А. Лизун, В. Ф. Кондрат, Д. Н. Лящук, В. А. Гродзенский, Р. С. Сейфулин, Б. Д. Ермаков, Н. Э. Портнягин, Б. С. Светов, В. П. Губатенко, С. А. Назарный, В. А. Комаров, О. А. Агеева, А. Берг, Э. В. Эппельбаум, С. А. Рябова, А. А. Спивак, В. И. Костицын, В. А. Хмелевской, В. А. Давыдов, И. Я. Чеботарева, А. Н. Камшилин, П. А. Казначеев и др.

Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта выполнено в работах Я. И. Френкеля, М. А. Био, С. Прайда, М. Хаартсена, Б. С. Светова, В. П. Губатенко, С. А. Назарного, В. А. Комарова, В. В. Вержбицкого, М. Г. Маркова, И. Г. Московского, О. М. Балабана, О. С. Федоровой, А. В. Кочеткова, Д. А. Алексеева, М. Б. Гохберга, А. А. Гончарова, А. О. Плисс и др.

Лабораторные исследования по изучению сейсмoeлектрического эффекта проведены С. Мочли, М. П. Воляровичем, Э. И. Пархоменко, М. С. Анцыферовым, Чжао Цзе-Санем, Р. С. Зиангировым, И. В. Гаскаровым, Г. А. Черняком, Е. Г. Соломиным, А. Д. Фроловым, Т. А. Дмитриевой, Н. И. Мигуновым, А. А. Кокаревым, О. Л. Кузнецовым, Г. Я. Черняком, С. С. Симоняном, Г. И. Петкевичем, Д. Н. Лящуком, С. А. Лизуном, В. Ф. Кондратом, В. Г. Тереньтьевым, О. А. Агеевой, Б. С. Световым, В. В. Тикшаевым, Г. Х. Шерманом, С. В. Шипулиным, И. Я. Чеботаревой, А. Н. Камшилиным, П. А. Казначеевым и др.

Полевые исследования по изучению сейсмoeлектрического эффекта проведены А. Г. Ивановым, Н. М. Нейштадтом, Л. М. Осиповым, Н. И. Мигуновым,

А. А. Кокаревым, О. Л. Кузнецовым, Г. И. Петкевичем, Д. Н. Лящуком, С. А. Лизуном, В. Ф. Кондратом, О. В. Михайловым, М. Хаартсенем, Н. Токсозем и др.

Скважинные исследования по изучению сейсмoeлектрического эффекта проведены Э. И. Пархоменко, И. В. Гаскаровым, О. А. Потаповым, С. А. Лизуном, В. Ф. Кондратом, Д. Н. Лящуком, В. А. Гродзенским, Р. С. Сейфулиным, Б. Д. Ермаковым, Н. Э. Портнягиным, Б. С. Световым, О. А. Агеевой, В. С. Лисицыным, В. А. Марковым, В. И. Масленниковым и др.

Несмотря на то, что многие проблемы изучения сейсмoeлектрических явлений в горных породах широко освещены в многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых, имеет место недостаточность исследований в области сейсмoeлектрического каротажа нефтяных скважин. Это обусловило необходимость расширения спектра исследований для решения задач, связанных с повышением информативности метода потенциалов собственной поляризации при литологическом расчленении геологических разрезов скважин в открытом стволе [70] и при определении интервалов и качества перфорации эксплуатационных колонн в обсаженных скважинах [24], что предопределило выбор темы работы, цель, задачи и ее основные направления.

Цель исследования

Целью настоящего исследования является повышение информативности метода потенциалов собственной поляризации в открытом стволе при литологическом расчленении геологических разрезов скважин в процессе их строительства [58, 38, 71] и в обсаженных скважинах при определении границ интервалов и качества перфорации эксплуатационных колонн посредством практической реализации новых способов и устройств сейсмoeлектрического каротажа на нефтяных месторождениях Оренбургской области [73].

При реализации новых методов и устройств измеряется параметр разности электрических потенциалов исследуемых объектов при акустическом воздействии на околоскважинное пространство с применением в качестве чувствительного

элемента в глубинном приборе мегаэлектродного блока для увеличения контраста аномалий измеряемого сигнала [71].

Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- теоретическое обоснование применения сейсмoeлектрического каротажа в нефтяных скважинах для решения геологических и технических задач;
- разработка новых способов и аппаратуры сейсмoeлектрического каротажа и обоснование целесообразности их применения;
- выявление влияния применения акустического воздействия на исследуемое околоскважинное пространство;
- выявление влияния применения в глубинном скважинном приборе в качестве чувствительного элемента мегаэлектродного блока.

Объект исследования

Объектом настоящего исследования послужил метод сейсмoeлектрического каротажа.

Предмет исследования

Предметом настоящего исследования выступают новые средства геофизических исследований скважин, применяемые на нефтяных месторождениях Оренбургской области для достижения поставленных целей и задач.

Область исследования

Настоящее исследование выполнено в рамках паспорта специальности ВАК 1.6.9 – Геофизика и соответствует отрасли технических наук:

п. 16 области исследований: Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей;

п. 19 области исследований: Геофизический мониторинг геологического строения и разработки месторождений геофизическими методами;

п. 24 области исследований: Теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей. Цифровая петрофизика, методы определения физических и фациальных характеристик по данным рентгеновской томографии;

п. 25 области исследований: Теория, технические средства, технологии, методы сбора и интерпретации каротажной информации, межскважинного просвечивания, геолого-технологических исследований скважин, геофизических методов исследования технического состояния скважин, вскрытия пластов в скважинах.

Теоретическая и методологическая база исследования

Теоретическую и методологическую базу исследования составляют работы российских и зарубежных ученых в области изучения сейсмoeлектрических явлений, результаты математического моделирования, лабораторных, полевых и скважинных исследований, материалы статей, патентов, научно-практических конференций по данной проблематике. Для решения поставленных задач применены новые способы литологического расчленения геологических разрезов скважин в открытом стволе в процессе их строительства [58, 73], способы определения интервалов и качества перфорации продуктивных пластов в обсаженных скважинах, аппаратура для их реализации, а также программное обеспечение для визуализации и интерпретации полученных каротажных данных.

Информационная база исследования

Информационной базой исследования являются данные предыдущих работ по изучаемой тематике, а также собственные материалы, полученные в результате геофизических исследований, проведенных на нефтяных месторождениях Оренбургского региона.

Личный вклад автора

Вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, развитии теоретической базы изучения сейсмoeлектрических явлений в скважинах, разработке методов, аппаратуры и методик каротажных исследований, получение патентов и подготовку публикаций по обоснованию применения и разработке аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа. Автор лично участвовал в проведении скважинных исследований и внедрении аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа на нефтяных месторождениях Оренбургской области для литологического расчленения геологических разрезов скважин и определения интервалов и качества перфорации [67, 71].

При разработке аппаратурно-методического комплекса автор руководствовался фундаментальными трудами и исследованиями С. С. Итенберга, А. Г. Талалая, И. Г. Сковородникова, А. Г. Иванова, Я. И. Френкеля, М. П. Воларовича, Э. И. Пархоменко, М. А. Био, Н. М. Нейштадта, Л. М. Осипова, В. В. Кормильцева, А. Н. Ратушняка, О. А. Потапова, С. А. Лизуна, В. Ф. Кондрата, Б. С. Светова, В. П. Губатенко, С. А. Назарного, В. А. Комарова, О. А. Агеевой, В. И. Костицына, В. А. Хмелевского, В. А. Давыдова, И. Я. Чеботаревой, П. А. Казначеева, А. Н. Камшилина и других ученых.

Результаты исследования, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту, получены автором лично.

Научная новизна

1. Разработан аппаратурно-методический комплекс сейсмoeлектрического каротажа, обеспечивающий повышение информативности метода потенциалов самопроизвольной поляризации в открытом стволе и в обсаженных скважинах за счет применения акустического воздействия и мегаэлектродного блока.

2. Разработан новый способ определения интервала и качества перфорации обсадной колонны в скважине (Патент РФ № 2298648. Патентообладатель

общество с ограниченной ответственностью «Оренбурггеофизика». 2005. Бюл. № 13).

3. Разработано новое устройство для измерения естественных электрических потенциалов горных пород при акустическом воздействии на зону исследования (Патент РФ № 81526. Патентообладатель Чердынцев С. Н. 2007. Бюл. № 8).

4. Разработан новый способ определения интервала и качества перфорации обсадной колонны в скважине (Патент РФ № 2796148. Патентообладатель Чердынцев С.Н. 2023).

5. Разработан новый способ определения интервала и качества перфорации обсадной колонны в скважине (Патент РФ № 2799729. Патентообладатель Чердынцев С.Н. 2023).

6. Разработано новое устройство сейсмоэлектрического каротажа (Патент РФ № 218949. Патентообладатель Чердынцев С.Н. 2023. Бюл. № 17).

7. Получены новые данные о литологии и качестве перфорации нефтяных скважин.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Основные положения работы расширяют теоретическую базу сейсмоэлектрических явлений в нефтяных скважинах и формируют направления совершенствования существующих и создания новых геофизических методов и устройств.

Разработанный аппаратно-методический комплекс сейсмоэлектрического каротажа, реализующий многоэлектродную методику измерений параметра разности электрических потенциалов, повышает информативность геофизических исследований методом ПС и позволяет повысить качество:

1. Литологического расчленения исследуемых геологических разрезов скважин [58, 71].

2. Определения границ интервалов и качества перфорации обсадных эксплуатационных колонн в скважинах [71].

Применение аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа имеет большое практическое значение при литологическом расчленении карбонатных разрезов скважин, так как в таких разрезах диаграммы ПС являются малоинформативными из-за низкого контраста аномалий. Также, в случае, когда величина минерализации скважинной жидкости мало отличается от величины минерализации пластовых вод, аномалии ПС становятся незначительными. Поэтому с целью получения наиболее выраженных аномалий каротажных диаграмм применяется акустическое воздействие и мегаэлектродный блок.

Аппаратурно-методический комплекс сейсмoeлектрического каротажа может быть также использован для определения пористости и глинистости коллекторов нефти и газа, определения минерализации пластовых вод и величины пластовых давлений, определения интервалов нарушения целостности обсадных эксплуатационных колонн в скважинах в местах притока или поглощения жидкости.

Результаты работы могут быть полезны и использованы при последующем изучении сейсмoeлектрических явлений в нефтяных и газовых скважинах, а также при разработке новых геофизических методов и устройств.

Методология и методы исследования

Методологической основой настоящего исследования послужил руководящий документ РД 153-39.0-072-01 Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах (введен в действие приказом Министерства энергетики РФ от 07 мая 2001 г. № 134).

Сейсмoeлектрический каротаж основан на изучении и анализе взаимодействия электрического и акустического полей. Аппаратная реализация метода осуществляется на базе стандартных отечественных скважинных приборов акустического и электрического каротажа путем совмещения глубинных модулей для возможности регистрации параметра разности электрических потенциалов исследуемой среды при одновременном акустическом воздействии. В качестве

наземных устройств для визуализации и записи измеряемых параметров, а также для управления режимами скважинных приборов применяются серийно выпускаемые отечественные цифровые регистраторы.

Интерпретация результатов сейсмоэлектрического каротажа производится аналогично методу ПС. При этом диаграммы фонового замера, полученные без наложения акустического поля, сравнивают с диаграммами, полученными при акустическом воздействии и с диаграммами, полученными при помощи мегаэлектродного блока, извлекая из этого дополнительную информацию.

Положения, выносимые на защиту

1. Акустическое воздействие на исследуемое околоскважинное пространство повышает контраст аномалий потенциалов самопроизвольной поляризации, увеличивая информативность исследований.

2. Разработанный мегаэлектродный блок увеличивает информативность каротажа в открытом стволе и в обсаженных скважинах в условиях нефтяных месторождений Оренбургской области.

3. Разработанный аппаратурно-методический комплекс сейсмоэлектрического каротажа, одновременно реализующий акустическое воздействие на околоскважинное пространство и использующий мегаэлектродный блок, расширяет область применения и возможности метода потенциалов самопроизвольной поляризации при литологическом расчленении геологических разрезов скважин и при определении границ интервалов и качества перфорации обсадных колонн.

Достоверность

В основу работы положены результаты исследований, проведенных под руководством и при непосредственном участии автора, а также лично автором в период с 2003 г. по настоящее время на ряде нефтяных месторождений Оренбургской области.

Достоверность и обоснованность выводов, научных положений, технических решений и рекомендаций подтверждена использованием значительного объема результатов теоретических, лабораторных, полевых и скважинных исследований, апробацией и публикациями, а также внедрением в практическую область промысловой геофизики. Аппаратурно-методический комплекс сейсмоэлектрического каротажа опробован на нефтяных месторождениях Оренбургского региона. Внедрение практических результатов исследования подтверждено соответствующими каротажными материалами, актами внедрения и патентами.

Апробация результатов работы

Основные положения, результаты и тезисы диссертационной работы представлялись и обсуждались на:

- Региональной научно-практической конференции (с международным участием) «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике», г. Оренбург, 2003;
- XXX Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: Актуальные вопросы, достижения и инновации», г. Пенза, 2022;
- 49-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», г. Екатеринбург, 2023;
- XXIV Уральской молодежной научной школе по геофизике, г. Пермь, 2023;
- VI Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2023. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес», г. Москва, 2023;
- XXI Уральской горнопромышленной декаде - международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам», г. Екатеринбург, 2023.

Публикации

Основные положения и результаты проведенных исследований отражены в 11 научных работах, в том числе 5 статей опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Российской Федерации, кроме того в рамках настоящей диссертационной работы получены 3 патента на изобретение № 2298648 [37], № 2799729 [41], № 2796148 [39] и 2 патента на полезную модель № 81526 [38], № 218949 [40].

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 89 наименований. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков и 1 таблицу.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, обозначены цель, задачи, объект и предмет исследования, сформулированы основные защищаемые положения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов и выводов работы.

В первой главе «Современное состояние изученности сейсмoeлектрического эффекта», имеющей обзорный характер, приведен литературный обзор по результатам изучения сейсмoeлектрических явлений в горных породах.

Приведены краткие сведения о теоретических, лабораторных, полевых и скважинных исследованиях сейсмoeлектрического эффекта, по результатам которых получено представление о характере сейсмoeлектрических явлений в пористых насыщенных средах.

Исходя из основных аспектов возникновения сейсмoeлектрического эффекта в горных породах и влияния на его величину и характер особенностей акустического воздействия, строения и состояния геологической среды и других

факторов сделан вывод о том, что сейсмoeлектрический эффект может быть эффективно применен в нефтепромысловой геофизике.

Подчеркнута недостаточная изученность области сейсмoeлектрического каротажа, обусловленная необходимостью расширения спектра исследований для решения задач, связанных с повышением информативности, расширения области применения и возможностей метода потенциалов собственной поляризации за счет акустического воздействия на околоскважинное пространство.

Предложено применение акустического воздействия при измерениях методом ПС для решения ряда геологических и технических задач при литологическом расчленении геологических разрезов скважин в открытом стволе и при определении интервалов и качества перфорации обсадных эксплуатационных колонн в обсаженных скважинах для увеличения точности и детальности исследований.

Во второй главе «Метод потенциалов собственной поляризации» представлены основные теоретические положения возникновения естественных электрических полей в нефтяных и газовых скважинах. Отражены основные причины и принципы возникновения диффузионно-адсорбционных, фильтрационных и окислительно-восстановительных электрических полей в скважинах. Освещены особенности естественных геоэлектрических полей в карбонатных разрезах скважин. Приведены схема измерительной установки регистрации параметра естественного электрического поля и примеры каротажных диаграмм ПС. Описаны основные аспекты качественной и количественной интерпретации диаграмм ПС.

Выявлен ряд недостатков метода ПС. Подчеркнута слабая эффективность применения метода потенциалов собственной поляризации в карбонатных разрезах скважин в связи с низкой информативностью.

В третьей главе «Сейсмoeлектрический каротаж и его применение» приведено описание характера сейсмoeлектрических явлений в горных породах.

Представлено математическое описание влияния акустического воздействия на естественные электрические поля в скважинах и на физические свойства горных пород.

Приведена схема измерительной установки сейсмoeлектрического каротажа.

Описаны основные аспекты качественной интерпретации данных сейсмoeлектрического каротажа: литологическое расчленение исследуемого геологического разреза (определение мощности пластов и их границ), определение интервала перфорации и качества прострела обсадной колонны.

Отмечено влияние акустического воздействия на физико-химические свойства горных пород и происходящие в них электромагнитные процессы, а именно на естественные электрические поля в скважинах, электропроводность исследуемых пористых сред, а также на фильтрационные свойства горных пород.

Определена высокая эффективность применения сейсмoeлектрического каротажа в открытом стволе скважин в процессе их строительства, а также в скважинах эксплуатационного фонда при прострелочно-взрывных работах.

Подчеркнута перспектива применения и внедрения сейсмoeлектрического каротажа для дальнейшего изучения сейсмoeлектрических явлений в нефтяных и газовых скважинах; исследования связи сейсмoeлектрического эффекта с литологией пород и наличием углеводородов в коллекторах; разработки оптимальных методик сейсмoeлектрических наблюдений, а также для решения задач промысловой геологии и геофизики, таких как детальное литолого-стратиграфическое расчленение исследуемого геологического разреза, определение коллекторских свойств, характера насыщения пластов, оценка технического состояния скважин и параметров их эксплуатации.

В четвертой главе «Методология применения сейсмoeлектрического каротажа на нефтяных месторождениях Оренбургского региона» приведено описание и принцип работы аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа, разработанного в рамках диссертационного исследования.

Представлена схема измерительной установки, принципиальная схема, основные технические характеристики скважинного прибора, наземного цифрового регистратора.

Описаны цели, задачи сейсмoeлектрических измерений, методика проведения работ, основные аспекты интерпретации полученных каротажных диаграмм, результаты скважинных геофизических исследований.

Приведены результаты сейсмoeлектрических каротажных исследований на нефтяных месторождениях Оренбургской области, проведенных в рамках диссертационной работы.

Представлены каротажные исследования в открытом стволе в терригенном разрезе и в карбонатных разрезах скважин, а также исследования зон перфорации эксплуатационных колонн в обсаженных скважинах.

Подтверждена эффективность применения аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа.

В Заключение исследования обобщены результаты диссертации, сформулированы основные выводы.

Благодарности

Автор искренне выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, заведующему кафедрой геофизики ФГБОУ «Уральского государственного горного университета», профессору Александру Григорьевичу Талалаю за всестороннюю помощь и поддержку в реализации диссертационной работы, постоянную поддержку, за ценные консультации, советы и замечания по теме научного исследования, а также за содействие и внимание.

Автор благодарит своих коллег по ООО «Оренбурггеопроект», г. Оренбург, ФГБОУ «Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, ФГБУН Институт физики Земли им О. Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, оказавшим помощь при выполнении настоящего диссертационного исследования, а также принимавшим участие в обсуждении его результатов, за их

ценные советы, замечания и рекомендации по теме работы, за их содействие, специалистов геофизических производственных предприятий ООО «ГИРС-сервис», г. Оренбург; Межрегиональной общественной организации «Евро-Азиатское геофизическое общество», г. Москва, ООО «Оренбурггеофизика», г. Оренбург, ООО «Оренбургнефтегеофизика», г. Оренбург, ЗАО «Восток-Урал-Нефть», г. Оренбург и др., оказавшим помощь в проведении скважинных исследований, а также принимавшим участие в обсуждении их результатов, за их ценные советы, замечания и рекомендации по теме диссертационной работы, за их содействие и внимание.

Также автор выражает глубокую признательность доктору геолого-минералогических наук, профессору И. Г. Сквородникову за помощь и содействие в решении ряда вопросов, консультации, рекомендации, совместную работу при написании диссертации.

Создание аппаратурно-методического комплекса сейсмоэлектрического каротажа и его практическая реализация на объектах Оренбургской области, проведена совместно с В. И. Масленниковым, В. А. Марковым, А. Г. Талалаем и др., которым автор выражает глубокую благодарность.

За помощь в проведении скважинных геофизических исследований и внедрении методов и аппаратуры сейсмоэлектрического каротажа автор выражает благодарность работникам ряда геофизических организаций и предприятий В. А. Ананьеву, Е. А. Рябухе, С. В. Ильину, Т. Н. Санееву, Р. М. Слайманову, Б. П. Кузину.

В период работы над диссертацией автором получены полезные советы и замечания от Л. А. Золотой, В. Е. Петряева, К. В. Вандышевой, И. Е. Шинкарюк, Г. В. Иголкиной, П. А. Казначеева, С. А. Тихоцкого и др. Всем перечисленным коллегам автор выражает признательность и благодарит за оказанное содействие.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

1.1 Обзор литературных источников по результатам изучения сейсмоэлектрических явлений в горных породах

В 1918 году явление, близкое к сейсмоэлектрическому эффекту впервые наблюдал С. Мочли в лабораторных условиях. Им выявлено образование электродвижущей силы во влажном песке при воздействии на него градиента давления [82]. Эксперименты С. Мочли производились в режиме постоянства градиента давления, вызывающего соответственно постоянную электродвижущую силу (ЭДС).

В 1936 году Л. В. Блау и Л. Стетхемом открыт сейсмоэлектрический эффект первого рода I , обусловленный изменением величины силы тока I , проходящего через влажную горную породу под воздействием упругих волн при наличии постоянной разности электрических потенциалов [84].

В 1936-1939 годах Р. Р. Томсоном проведены эксперименты по изучению эффекта I , возникающего в горных породах при прохождении через них упругих волн. Сделан вывод о том, что эффект I возникает не на поверхности измерительных электродов, а в некотором объеме горной породы и определяется изменением величины контактных сопротивлений между ее частицами [88, 89].

Эффект I не имеет полярности и выражен изменением величины электрического сопротивления горной породы под влиянием акустического воздействия.

В 1939 году при полевых геофизических исследованиях А. Г. Ивановым открыт сейсмоэлектрический эффект второго рода E . Им обнаружено явление электризации насыщенной горной породы при наложении акустического поля путем измерения значений разности электрических потенциалов между двумя соседними ее точками [74].

Распространение упругих волн в горных породах вызывает изменение давления, вследствие чего происходит изменение значений разности потенциалов, образующих эффект Е.

Гипотеза А. Г. Иванова о фильтрационном характере сейсмoeлектрического эффекта Е заключается в том, что на границе раздела фаз: жидкой и твердой (минерального раствора и твердых частиц горной породы) присутствует двойной электрический слой, одна часть которого, обращенная к жидкости, движется за счет перепада давлений, в результате чего возникает разность электрических потенциалов [15, 16, 74].

Значения разности этих фильтрационных потенциалов U , определяются формулой Гельмгольца-Смолуховского [87].

Сейсмoeлектрический эффект второго рода, открытый А. Г. Ивановым, проявляется при знакопеременном механическом возбуждении, образующим соответственно знакопеременную ЭДС.

Он имеет электрокинетическую природу и наблюдается преимущественно во флюидонасыщенных осадочных горных породах, а также в скважинах, заполненных жидкостью.

В 1944 году Я. И. Френкелем проведен математический анализ сейсмoeлектрического эффекта, определяющий зависимость между физическими свойствами среды и электрокинетическим потенциалом, вызванным упругим полем, а также содержанием в горных породах флюида. Сделан вывод о том, что интенсивность величины сейсмoeлектрического эффекта пропорциональна квадрату частоты упругих колебаний, коэффициенту пористости горной породы и упругому смещению среды [61, 70].

В 1954 году лабораторными опытами М. П. Воларовича и Э. И. Пархоменко по воспроизведению сейсмoeлектрического эффекта на искусственно увлажненном керне осадочных горных пород установлено, что сейсмoeлектрический эффект не наблюдается на сухих образцах доломита, мергеля, известняка, а после увлажнения

на гранях образцов отмечается возникновение разности электрических потенциалов, при этом знак заряда определяется градиентом перепада давления и не зависит от того с какой грани образца производятся замеры [8].

В 1956 году М. А. Био разработана теория акустики насыщенных пористых сред, в которой описывается связь сейсмоэлектрического эффекта второго рода с электрокинетическими явлениями, возникающими в пористых флюидонасыщенных средах, на границе твердой и жидкой фаз в двойном электрическом слое в осадочных горных породах при воздействии на них упругим полем [71, 79, 80].

В 1958 году М. С. Анцыферовым [2] проведены лабораторные исследования сейсмоэлектрического эффекта при знакопеременной нагрузке в динамическом режиме, подтверждающие фильтрационную гипотезу А. Г. Иванова [71] и теоретические выводы Я. И. Френкеля.

В 1959 году Н. М. Нейштадтом и Л. М. Осиповым проведены полевые геофизические исследования сейсмоэлектрического эффекта на осадочных горных породах, в результате которых была выявлена роль контактных явлений на границе электрод - горная порода, установлена пропорциональная зависимость между значением величины электрического сигнала и интенсивностью упругих колебаний, обнаружено опережение упругих колебаний электрическими, был отмечен ряд других особенностей. Полученные данные также подтвердили фильтрационную гипотезу А. Г. Иванова о возникновении эффекта Е в определенном объеме горной породы, а не на контакте электродов с ней. В результате этих экспериментов установлено, что изменение поверхности контакта чувствительных элементов с исследуемой горной породой и их масса не оказывают влияния на параметры регистрации эффекта Е. Подтверждена возможность его регистрации индукционным методом, что свидетельствует об электромагнитной природе эффекта Е. Также определена направленность эффекта Е и сделан вывод, что его величина зависит не только от величины акустического воздействия, но и от положения измерительных электродов относительно направления упругих волн. При расположении пары чувствительных элементов вдоль распространения

упругих волн регистрируется максимальное значение эффекта E , поперек распространения упругих волн – минимальное [30].

В 1962 году Э. И. Пархоменко продолжены лабораторные исследования сейсмoeлектрического эффекта при помощи ультразвукового сейсмоскопа. Опыты показали возникновение электрических колебаний различной амплитуды на исследуемых образцах керна осадочных горных пород с большим влагосодержанием при воздействии на них упругими волнами. Также подтвердилось отсутствие эффекта после удаления влаги из этих образцов. Диаграммы, полученные с шести граней увлажненного образца доломита, отображают примерно одинаковые значения эффекта E на всех его гранях, а первая фаза электрического сигнала имеет всегда одно направление, что свидетельствует об отсутствии полярности. Это согласуется с результатами ранее проведенных полевых геофизических исследований [33].

В 1964 году Э. И. Пархоменко и Чжао Цзе-Санем выполнены лабораторные опыты по исследованию характера влияния влажности различных осадочных горных пород на величину сейсмoeлектрического эффекта, которые позволили наблюдать резкое увеличение эффекта при первоначальном увеличении влагонасыщенности при исходном ненасыщенном состоянии, и последующее слабое возрастание эффекта при дальнейшем увеличении влажности на образцах доломита. Так как эффект E образуется благодаря двойному электрическому слою на границе твердой и жидкой фаз, после смачивания поверхности пор, последующее увеличение влагонасыщенности горной породы не имеет особого значения. Увеличение влагонасыщенности может привести также и к уменьшению эффекта E , как показали исследования некоторых образцов глинистых пород [34].

В 1965 году Чжао Цзе-Санем и Р. С. Зиангировым проведены лабораторные исследования по изучению сейсмoeлектрического эффекта в дисперсных грунтах. Опыты проводились на образцах влагонасыщенных суглинков и показали, что при увеличении влажности до 6 % происходит рост эффекта E до 1100-1200 мкВ, при заданных значениях влажности от 6 % до 15 % величина сейсмoeлектрического

эффекта находится приблизительно в этих же пределах, практически не проявляя зависимости от количества влаги, а при дальнейшем увеличении влагонасыщения образцов от 16 % до 20 % происходит уменьшение значений эффекта E примерно до 300 мкВ. Сделан вывод, что увеличение дисперсности глин в процессе увлажнения является причиной уменьшения величины эффекта E . Это объясняется тем, что при увеличении расстояния между частицами глин возникают большие силы инерции, приводящие к уменьшению величины электрокинетического потенциала.

Также обнаружена взаимосвязь дисперсности с величиной эффекта E при исследовании различных глинистых пород. В высокодисперсных глинистых породах интервал влажности, в котором сохраняется постоянным максимальное значение эффекта E , значительно шире, по сравнению с низкодисперсными [78].

В 1968 году Э. И. Пархоменко были описаны электрические процессы в насыщенных пористых средах, которые лежат в основе сейсмоэлектрического эффекта. Рассмотрены основные особенности и механизм возникновения эффекта E , приведены и проанализированы результаты полевых и лабораторных исследований многих авторов, работающих в этой области. В работе отмечена перспективность дальнейшего изучения и анализа сейсмоэлектрического эффекта с целью расширения представлений об электрокинетических явлениях в горных породах и разработки новых геофизических методов и аппаратуры для определения литологических и фильтрационно-емкостных свойств исследуемых горных пород. Также обоснована необходимость изучения зависимости изменения величины эффекта E в осадочных горных породах от литологии, пористости, проницаемости, характера и типа флюидонасыщения [35].

В 1971 году Э. И. Пархоменко и И. В. Гаскаровым проведены скважинные и лабораторные исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в горных породах, предложена методика наблюдений эффекта E при непрерывной регистрации. На основании результатов опытов установлено, что в скважинах регистрируется сейсмоэлектрический эффект, возникающий в объеме осадочных горных пород, выявлено значительное различие между величиной

сейсмoeлектрического эффекта в глинах и известняках (примерно в 5 раз), что служит основанием для возможности разделения этих пород по величине эффекта E , отмечена качественная связь между величиной сейсмoeлектрического эффекта и кажущимся удельным сопротивлением горных пород, что дает возможность судить о литологическом составе исследуемых горных пород и о флюидонасыщении коллекторов. Сделан вывод о том, что чем выше сопротивление, тем больше сейсмoeлектрический эффект. Отмечен различный характер зависимости сейсмoeлектрического эффекта от влажности для песчаников, известняков и мергелей. Для песчаников и известняков получены максимальные значения эффекта, для мергелей отмечена область насыщения - интервал влажности, при котором величина эффекта E , достигнув максимального значения, практически не изменяется. Различие, по-видимому, обусловлено неодинаковой структурой порового пространства. Выявлена сильная зависимость величины сейсмoeлектрического эффекта E от концентрации раствора, заполняющего поры в породе. Сделан вывод о том, что с увеличением степени минерализации насыщающего породу раствора величина эффекта E уменьшается примерно по экспоненциальному закону [32, 71, 74].

В 1974 году Г. А. Черняком и Е. Г. Соломиным предложено устройство для измерения сейсмoeлектрических параметров в гармоническом режиме возбуждения сейсмoeлектрического эффекта второго рода в горных породах [36].

В 1975 году Г. А. Черняком проведены лабораторные исследования эффекта E при воздействии на образцы исследуемых горных пород постоянного напряжения смещения, в результате которых установлено суммарное проявление эффектов E и I в многофазных средах (осадочных горных породах) в условиях интенсивных электрических естественных полей [76].

В 1976 году А. Д. Фроловым и Т. А. Дмитриевой проведены лабораторные исследования на образцах мерзлых пород, по результатам которых установлено закономерное понижение величины эффекта E с уменьшением их температуры, связанное с уменьшением содержания в ней жидкости. Сделан вывод о том, что во многих исследуемых мерзлых породах с понижением температуры величина

сейсмоэлектрического эффекта уменьшается и уже при минус 25-30°C становится равной нулю [62].

В 1977 году Н. И. Мигуновым и А. А. Кокаревым проведены лабораторные исследования динамических особенностей сейсмоэлектрического эффекта на образцах керна известняка, алевролита и боксита с развитой структурой пор с влагосодержанием 8 – 10 %. Определена линейная зависимость возрастания величины эффекта E с увеличением частоты акустического воздействия [26].

В 1981 году Н. И. Мигуновым описано влияние сейсмоэлектрического эффекта в грунтах с электрокинетическими свойствами на параметры продольных упругих волн через изменение свойств среды, в которой они распространяются. Это влияние выражается в изменении скорости и амплитуды волн, а также появлением дополнительных волн и искажений [27].

В 1982 году Н. И. Мигуновым, А. А. Кокаревым, О. Л. Кузнецовым в рамках проведенных лабораторных работ и полевых геофизических исследований предложено применение сейсмоэлектрического эффекта при поисках и разведке кимберлитовых тел [24].

В 1983 году И. Е. Перельманом и Н. Г. Хатиашвили освещено явление электромагнитной эмиссии при деформировании горных пород. Описана генерация электромагнитного излучения и его проявление при колебании двойных электрических слоев во время землетрясений [42].

В 1986 году О. Л. Кузнецовым, А. А. Кокаревым, Н. И. Мигуновым, И. Д. Селезневым предложено применение эффекта E для выявления и локализации литологических неоднородностей при определении границ кимберлитовых тел [23].

В 1987 году Г. Я. Черняком по результатам лабораторных исследований подтверждена возможность применения электрокинетических и сейсмоэлектрических явлений горных пород в гидрогеологии и инженерной геологии и сделан вывод о том, что с ростом концентрации электролита в горной породе величина сейсмоэлектрического эффекта уменьшается [77].

В 1987 году С. С. Симоняном по результатам проведенных лабораторных исследований выявлена зависимость величины сейсмоэлектрического эффекта от

одноосного давления при насыщении образцов керна горных пород растворами поваренной соли [63]. Сделан вывод о том, что с ростом концентрации соли в исследуемой насыщаемой осадочной горной породе величина эффекта E уменьшается [55].

В 1988 году М. Б. Гохбергом, В. А. Моргуновым и О. А. Похотеловым рассмотрена возможность прогноза землетрясений по изменению характера природных электромагнитных явлений, создаваемых упругими волнами и изменением механических напряжений при сейсмических событиях [12].

В 1989-1991 годах Г. И. Петкевичем, Д. Н. Лящуком, С. А. Лизуном, В. Ф. Кондратом проведены лабораторные и полевые геофизические исследования по изучению влияния акустического воздействия на характер изменения электрического поля в пористых насыщенных средах [44, 45, 46]. В рамках этих исследований проведен теоретический анализ эффектов взаимодействия физических полей и выполнено математическое моделирование этих процессов [43].

В 1992 году В. Г. Терентьевым проведены лабораторные исследования сейсмoeлектрического эффекта второго рода с целью его инструментального изучения на воздушно-сухих образцах известняка и покровного суглинка. Работы проводились при акустическом воздействии на образцы в диапазоне частот от 0,1 до 8,0 кГц. Исследования продемонстрировали рост величины сейсмoeлектрического эффекта с увеличением частоты акустического сигнала от 20 мкВ при $\nu=0,1$ кГц до 2,0 мВ при $\nu=8,0$ кГц, причем в известняке более интенсивно, чем в суглинке. Также с увеличением амплитуды акустического сигнала отмечен линейный рост величины эффекта E от 0,5 мкВ при $E_T=10$ В до 3,0 мВ при $E_T=40$ В как для известняка, так и для суглинка. Сделан вывод о том, что интенсивность эффекта E напрямую зависит от величины и частоты акустического воздействия [59].

В 1995 году О. А. Потаповым, С. А. Лизуном, В. Ф. Кондратом, Д. Н. Лящуком, В. А. Гродзенским, Р. С. Сейфулиным, Б. Д. Ермаковым, Н. Э. Портнягиным издана коллективная монография, где по результатам

многолетних теоретических и экспериментальных исследований даны примеры и оценены перспективы применения нового геофизического метода разведки на нефть, газ и твердые полезные ископаемые, основанного на нелинейном взаимодействии упругого и электромагнитного полей, при наземных и скважинных исследованиях в различных геолого-геофизических условиях.

В монографии приведены результаты лабораторных, полевых и скважинных исследований, выполненных на образцах и моделях, приводится математическое описание сейсмoeлектрических явлений в пористых насыщенных средах, изучено влияние упругих колебаний на электрические свойства горных пород. Эти исследования ориентированы на изучение связи сейсмoeлектрических явлений с литолого-стратиграфическим строением геологических разрезов и наличием в них углеводородов.

В результате лабораторных экспериментов выявлено изменение параметра собственного потенциала системы пористая среда-флюид при акустическом воздействии.

Исходя из результатов наземных полевых исследований установлено, что акустическое воздействие на поверхность вызывает изменение электрической и магнитной компонент естественного поля, а также изменение параметров вызванной поляризации, которые зависят от мощности, частоты и времени акустического воздействия, а также определяются наличием углеводородов.

По результатам исследований скважин методом потенциалов собственной поляризации при акустическом воздействии на околоскважинное пространство выявлено увеличение амплитуды сигнала - более чем на порядок, а также увеличение его контраста аномалий, что повышает информативность геофизических исследований при литологическом расчленении геологических разрезов скважин [47, 56, 68, 70, 71].

В 1996 году С. Прайдом и М. В. Хаартсеном разработана математическая модель сейсмoeлектрического эффекта второго рода, исключая недостатки модели Я. И. Френкеля [79, 83], которая представляет из себя решение самосогласованной задачи, учитывающей взаимное влияние упругого,

флюидодинамического и электромагнитного полей и основана на высокочастотной модели М. Био распространения упругих волн в двухфазной среде [79, 80]. Ее недостатком является большой объем вычислений, необходимых для решения самосогласованной задачи, и невозможность получения аналитических решений даже для простых моделей сред.

В 1997 году О.В. Михайловым, М. Хаартсеном и М. Н. Токсозем проведены полевые исследования эффекта Е в пористых средах, результаты которых сопоставлены с результатами проведенного ими компьютерного моделирования сейсмoeлектрического эффекта. Отмечено хорошее совпадение этих данных по амплитуде, полярности и времени вступления. Сделан вывод о возможности применения эффекта Е для локализации высокопроницаемых геологических неоднородностей, зон разломов и т. д. [83].

В 1998 году О. А. Агеевой, Б. С. Световым, В. В. Тикшаевым, Г. Х. Шерманом, С. В. Шипулиным выполнены лабораторные работы по изучению сейсмoeлектрического эффекта второго рода [54].

В 1999 году Б. С. Световым и В. П. Губатенко разработана математическая модель сейсмoeлектрического эффекта для механических колебаний низкой частоты в пористых насыщенных средах, в которой задача расчета электромагнитного поля электрокинетического происхождения сводится к решению уравнений флюидодинамики, нахождению величин электрокинетического тока и электромагнитного поля, индуцированного этим током, а также вычислению вектора смещения твердой матрицы насыщенной среды [52].

В 1999 году Б. С. Световым, Г. Х. Шерманом, О. А. Агеевой, С. В. Шипулиным выполнены лабораторные работы по изучению сейсмoeлектрического эффекта второго рода на образцах известняков, песчаников, а также глинистых известняков и песчаников, отобранных в различных интервалах скважин, пробуренных в Прикаспийской впадине. Исследования осуществлялись в диапазоне частот от 100 Гц до 40 кГц. В результате исследований отмечена зависимость величины эффекта Е от петрофизических особенностей горных пород,

характера флюидонасыщения и структуры порового пространства. Подтвержден рост величины эффекта E с увеличением водонасыщенности и его уменьшение с увеличением пористости, проницаемости исследуемых горных пород и концентрации насыщающей их жидкости. Отмечен рост величины сейсмoeлектрического эффекта с повышением частоты акустического воздействия. Установлено, что наибольшей сейсмoeлектрической активностью обладают известняки. Отмечено, что для горных пород с высокой пористостью зависимость от минерализации поровой жидкости менее значима. Сделан вывод о том, что по мере увеличения удельного содержания углеводородной составляющей в горных породах величина сейсмoeлектрического эффекта уменьшается [54].

В 2000 году Б. С. Световым выполнено теоретическое обоснование сейсмoeлектрического метода геофизической разведки путем применения четырех последовательно решаемых задач: упругих колебаний в сплошной среде, флюидодинамики в пористой влагонасыщенной среде, электрокинетики и электродинамики [28, 53].

В 2001 году Б. С. Световым, О. А. Агеевой, В. С. Лисицыным проведены скважинные исследования сейсмoeлектрических явлений, в результате которых обоснована возможность регистрации сейсмoeлектрического эффекта при акустическом воздействии на исследуемые горные породы, которое может производиться непосредственно в скважине, а также может осуществляться наземным способом. Основной задачей скважинных исследований явилась оценка возможности регистрации сейсмoeлектрического эффекта и получение свидетельств его связи с геологической средой. Сделан вывод о том, что по изменению сейсмoeлектрического сигнала можно судить о литолого-стратиграфических особенностях исследуемого геологического разреза. Максимальными значениями сигнала отмечаются участки наиболее плотных, низкопористых, слабопроницаемых нетрещиноватых и некавернозных карбонатных отложений. В рамках исследований отмечено, что акустическое воздействие приводит к изменению электрического сопротивления исследуемой геологической среды на несколько десятков процентов. Наиболее значительные

изменения наблюдаются на ослабленных участках геологического разреза с преобладанием пористых и трещиноватых горных пород. При комплексировании данных сейсмoeлектрических исследований и данных других геофизических методов можно получить новую информацию о литологии исследуемого геологического разреза, вскрытого скважиной, петрофизических и фильтрационно-емкостных свойствах горных пород для решения различных задач промысловой геофизики [51].

В 2001 году С. А. Назарным, В. А. Комаровым издана монография, где рассмотрены закономерности и физические основы процессов вызванной сейсмoeлектрической поляризации рудных горных пород и металлов. Предложен метод рудной геофизической разведки, основанный на применении вызванной сейсмoeлектрической поляризации, включающий в себя элементы сейсмо- и электроразведки. Сущность метода заключается в том, что вызванные потенциалы создаются под действием тока и при дополнительном акустическом воздействии регистрируются переменные электрические потенциалы. Интенсивность вызванных электрических потенциалов зависит от степени электрического и акустического воздействия на ионы диффузной части двойного электрического слоя. Описана техника и методика работ наблюдений в горных выработках. По результатам теоретических, лабораторных и полевых исследований оценены перспективы эффективности применения предложенного геофизического метода разведки на основе взаимодействия полей различной природы в рудной геологии [29].

В 2002-2003 годах В. В. Вержбицким и М. Г. Марковым построена математическая модель для полей, создаваемых в скважине, излучателем рабочего частотного диапазона от единиц до десятков кГц, характерным для сейсмoeлектрического каротажа. Предложен алгоритм решения прямой задачи сейсмoeлектрического каротажа для мультипольного источника импульсного акустического воздействия на горные породы, расположенного на оси слоистой цилиндрической среды. Приведено решение прямой задачи сейсмoeлектрического каротажа для точечного импульсного источника упругих волн, размещенного на

оси скважины, вскрывшей водонасыщенный продуктивный объект неограниченной мощности. Отмечено, что сейсмoeлектрический каротаж возможно применять в скважинных условиях для выделения пластов-коллекторов, однако возможность количественной интерпретации измеряемых сигналов требует дополнительного изучения, т. к. их величина зависит от многих механических, электрокинетических и электрических параметров среды [6, 7].

В 2005 году А. Бергом предложен сейсмoeлектрический метод геофизической разведки для локализации углеводородных залежей, заключающийся в одновременном воздействии на исследуемый геологический разрез сейсмическим и электрическим полем, определяющий наличие и размеры коллекторов нефти и газа по времени поступления сигналов на приемники и позволяющий получать переходную характеристику вторичного электрического поля. Данный метод существенно повышает эффективность выявления пластов углеводородного сырья по сравнению с традиционными методами. Недостатком метода является его сложная аппаратная реализация (наличие нескольких сейсмических и электрических источников, большого количества питающих и заземляющих кабелей, сейсмостанции и соответственно нескольких большегрузных автомобилей для их транспортировки), а также необходимость разработки способов компенсации сигналов становления электрического поля от исследуемой пористой насыщенной среды, что негативно сказывается на разрешающей способности метода [85].

В 2012 Н. М. Нейштадтом и Э. В. Эппельбаумом отмечены основные направления практической реализации сейсмoeлектрических явлений в прикладной геофизике. Обосновано применение эффекта Е для выделения геологических неоднородностей с различными электрокинетическими свойствами – кимберлитовых трубок, бокситов, продуктивных углеводородных объектов для решения задач поисков и разведки, разработки полезных ископаемых, а также археологии, геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Выявлена целесообразность применения сейсмoeлектрических явлений при изучении деформированно-напряженных состояний горных пород с целью предупреждения

выбросов и горных ударов, а также при прогнозировании землетрясений. Сделан вывод о том, что практическая реализация сейсмoeлектрических явлений в прикладной геофизике имеет перспективу разработки новых геофизических методов и аппаратуры, которые увеличат область применения известных методов и повысят их эффективность [31].

В 2015 году И. Г. Московским, О. М. Балабаном, О. С. Федоровой, А. В. Кочетковым проведена работа «Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах». На основании полученных результатов рекомендовано использовать регистрацию сейсмoeлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн для нахождения области резких изменений петрофизических свойств влагонасыщенных пластов [28, 73, 74].

В 2015 году А. Н. Камшилиным и П. А. Казначеевым предложено применение сейсмoeлектрического мониторинга для контроля состояния геологической среды при техногенных воздействиях. Проведены полевые работы и лабораторные исследования по преобразованию сейсмической энергии в электрическую на образцах горных пород для изучения процессов образования и развития подземных полостей.

Сделан вывод о возможности определения изменения флюидонасыщенности горных пород, типа и свойства насыщающего их флюида по исследованию сейсмoeлектрических преобразований [19].

В 2017 году С. А. Рябовой и А. А. Спиваком проведен анализ сейсмических сигналов и наведенных вариаций напряженности электрического поля на геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН в зоне влияния глубинной тектонической структуры, в которой отмечено наличие сейсмoeлектрического эффекта, хорошо регистрируемого в отсутствие сильных возмущений, вызванных другими источниками такими как динамика атмосферных фронтов, грозовые, ветреные явления и т. д. Определено, что распространение сейсмических волн, вызванных землетрясениями и массовыми взрывами на карьерах, через разломную

зону приводит к возникновению напряженности электрического поля на земной поверхности за исключением периодов сильных возмущений электрического поля источниками несейсмического происхождения в виде атмосферных холодных грозových или низких плотных облачных фронтов. Сделан вывод о том, что интенсивность преобразования механической энергии сейсмических волн в электрическую определяется амплитудой сейсмического сигнала. Отмечено, что наведенные вариации электрического поля возникают либо синхронно с сейсмическими возмущениями, либо с запаздываниями до нескольких минут, при этом начало вариаций совпадает с приходом сейсмического сигнала, что очевидно связано с характером сейсмического воздействия (амплитудные, спектральные характеристики, угол выхода сигнала на поверхность и т. д.). Получена количественная зависимость сейсмического сигнала от вызванного электрического. Отмечено, что при увеличении амплитуды сейсмического сигнала, амплитуда вариаций электрического поля на земной поверхности растет с амплитудой сейсмического возмущения. Оценена перспектива использования эффекта E для картирования разломных зон и оценке их современной активности [49].

В 2018 году В. И. Костицыным и В. А. Хмелевским описано практическое применение явления сейсмоэлектрического эффекта в сейсморазведке. Показано, что сейсмоэлектрический эффект обусловлен электрокинетическими процессами влагосодержащих горных пород и определяется их минеральным составом, структурой и текстурой, а в основном пористостью, влажностью, составом и концентрацией растворенных в воде солей [22, 73].

В 2019 году И. Я. Чеботаревой и А. Н. Камшилиным проведены лабораторные исследования по изучению особенностей сейсмоэлектрического эффекта второго рода при сильной латеральной неоднородности насыщения с использованием керна песчаника, насыщенного керосином или водными растворами NaCl . Сделан вывод о том, что для неполярной жидкости при наличии петрофизической латеральной неоднородности по насыщению изменение электрического отклика на близких частотах существенно отличается.

Рекомендовано для получения достоверных результатов при акустическом воздействии использовать не одну частоту, а линейно модулированный по частоте сигнал с широким диапазоном частот воздействия [63, 74].

В 2019 году А. Н. Камшилиным и П. А. Казначеевым освещены теоретические предпосылки нелинейных механоэлектрических преобразований в пористых насыщенных средах. Выявлены основные возможные источники нелинейности в теории сейсмоэлектрических явлений такие как градиент температуры, градиент концентрации растворенных во флюиде веществ, отмечено обратное влияние вторичного электрического поля на упругое.

Подчеркнута слабая изученность нелинейности механоэлектрических явлений при воздействии упругих колебаний в пористых насыщенных средах.

К механоэлектрическим явлениям отнесены следующие сейсмоэлектрические явления во взаимосвязи друг с другом: пьезоэлектрический эффект, сейсмоэлектрический эффект 2-го рода, сейсмоэлектрический эффект 1-го рода, механоэлектрические преобразования в пористых средах не полностью насыщенных флюидом.

Отмечены характерные особенности традиционных моделей пористых насыщенных сред, приводящие к нелинейности: градиенты температуры и концентрации примесей, растворенных во флюиде, а также обратное влияние вторичного электрического поля на упругое, влияние которых обычно не учитывается.

Намечена перспектива разработки экспериментальной методики исследования нелинейностей и сформулированы базовые требования к ней [18].

В 2020 году В. А. Давыдовым проведены исследования на плотине Ельчевского пруда-отстойника и по их результатам построены разрезы различных сейсмоэлектрических параметров, хорошо отображающих основные характеристики и структурные особенности плотины. Введенный параметр усиления амплитуды электрического сигнала при прохождении упругой волны позволил наглядно представить характер поведения фильтрационного потока в разрезе плотины [13, 74].

В 2020 году И. Я. Чеботаревой и А. Н. Камшилиным проведены эксперименты, свидетельствующие о влиянии характера насыщения горных пород на особенности проявления в них сейсмоэлектрического эффекта [64, 74].

В 2022 году Д. А. Алексеевым, М. Б. Гохбергом, А. А. Гончаровым и А. О. Плисс выполнена работа по численному моделированию сейсмоэлектрического эффекта на основе уравнения движения изотропной упругой среды, уравнения Френкеля для пороупругой среды Био, а также уравнения Максвелла для электромагнитного поля.

Исходя из полученных данных оценена перспектива применения сейсмоэлектрического сигнала для определения петрофизических свойств исследуемых геологических сред и границ насыщенных коллекторов в зависимости от фильтрационно-емкостных свойств, типа флюида и других параметров среды [1, 71].

1.2 Особенности возникновения и характер сейсмоэлектрического эффекта в горных породах

Сейсмоэлектрический эффект [70] связан с электрокинетическими явлениями, изучаемыми коллоидной химией [9]. Его объяснение строится на основе методов теории электромагнитного поля, гидродинамики, упругости и электрокинетики.

Сейсмоэлектрический эффект 1-го рода характеризуется изменением электропроводности горных пород при воздействии на них упругими волнами [18].

Сейсмоэлектрический эффект 2-го рода характеризуется возникновением вторичного электрического поля в горных породах при прохождении упругих волн [18].

В результате обобщения рассмотренного в обзоре литературных источников материала по результатам теоретических, лабораторных, полевых и скважинных исследований сейсмоэлектрического эффекта, выполненных с момента его обнаружения рядом русских и зарубежных ученых, можно выделить следующие основные аспекты возникновения сейсмоэлектрического эффекта в горных

породах и влияние на его величину и характер особенностей акустического воздействия, строения и состояния геологической среды и других факторов:

- при воздействии упругим полем на пористые насыщенные горные породы в них возникает сейсмoeлектрический эффект: происходит увеличение их электропроводности (эффект I), а также возникновение в них вторичного электрического поля (эффект E);

- возникновение сейсмoeлектрического эффекта в горных породах происходит за счет преобразования энергии переменного упругого поля в электрическое, при этом на его параметры влияет дополнительное акустическое поле (двойное обратное влияние).

- электрическое поле, образующее сейсмoeлектрический эффект в определенном объеме горных пород, вызванное акустическим воздействием, сопровождается изменением давления в направлении распространения упругих волн;

- объем горных пород, в котором возникает сейсмoeлектрический эффект, определяется геологическим строением исследуемого разреза, частотным диапазоном сейсмического возбуждения и частотным диапазоном регистрации сейсмoeлектрического эффекта;

- сейсмoeлектрический эффект не регистрируется или величина его ничтожно мала в объеме сухих плотных кристаллических горных пород;

- с увеличением пористости, трещиноватости и проницаемости горной породы величина сейсмoeлектрического эффекта уменьшается;

- с увеличением водонасыщенности горной породы величина сейсмoeлектрического эффекта возрастает;

- с ростом концентрации раствора электролита в объеме горной породы величина сейсмoeлектрического эффекта уменьшается;

- с ростом углеводородосодержания в объеме горной породы величина сейсмoeлектрического эффекта уменьшается;

- с понижением температуры величина сейсмoeлектрического эффекта уменьшается;

- с увеличением сопротивления горной породы величина сейсмoeлектрического эффекта возрастает;
- акустическое воздействие изменяет сопротивление геологической среды на 10 % за счет изменения структуры минеральных зерен;
- максимальные значения величины сейсмoeлектрического эффекта отмечаются в плотных низкопористых, слабопроницаемых, нетрещиноватых и некавернозных горных породах;
- с увеличением частоты и мощности акустического воздействия величина сейсмoeлектрического эффекта возрастает;
- конструкция, форма, материал и масса измерительных электродов не оказывает значительного влияния на величину сейсмoeлектрического эффекта при его регистрации;
- контактные явления электродов с исследуемыми горными породами не оказывают значительного влияния на величину сейсмoeлектрического эффекта при его регистрации.

Выводы по главе 1

- Сейсмoeлектрические явления в горных породах широко освещены в многочисленных научных трудах, из которых следует, что сейсмoeлектрический эффект может быть эффективно применен в нефтепромысловой геофизике.
- Область сейсмoeлектрического каротажа нефтяных скважин недостаточно изучена, что обуславливает необходимость расширения спектра исследований для решения задач, связанных с повышением информативности, расширения области применения и возможностей метода потенциалов собственной поляризации за счет акустического воздействия на околоскважинное пространство.
- Применение акустического воздействия при измерениях методом потенциалов собственной поляризации может быть использовано для решения ряда геологических и технических задач при литологическом расчленении геологических разрезов скважин в открытом стволе и при определении интервалов

и качества перфорации обсадных эксплуатационных колонн в обсаженных скважинах, увеличивая информативность исследований.

2 МЕТОД ПОТЕНЦИАЛОВ СОБСТВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

2.1 Естественные электрические поля в скважинах

Возникновение электрических полей естественных потенциалов $U_{ПС}$ в скважинах, заполненных жидкостью, обусловлено физико-химическими свойствами горных пород, слагающих скважину, а также процессами, происходящими на границе раздела твердой и жидкой фаз (горной породы и скважинной жидкости).

Естественные электрические поля в скважинах в основном образуют диффузионно-адсорбционные, фильтрационные и окислительно-восстановительные потенциалы.

Превалирующую роль в формировании естественных полей в скважинах играют диффузионно-адсорбционные явления на границах пластов, насыщенных жидкостями различной минерализации и на контакте глинистого раствора и пористой горной породы, насыщенной жидкостью иной минерализации [38].

Способность горных пород образовывать в скважине естественные электрические поля принято называть их собственной (естественной) электрохимической активностью.

Наибольшие изменения величины естественных электрических потенциалов отмечаются на границах горных пород с различными физико-химическими свойствами.

Метод потенциалов собственной поляризации (ПС) является методом оценки электрохимической активности горных пород и основан на изучении и анализе возникновения и взаимодействия естественных электрических полей в скважинах.

Образование самопроизвольно возникающего электрического поля в скважинах обнаружено в 1928 году французскими учеными братьями Конрадом и Марселем Шлюмберже.

Это явление принято называть собственной, самопроизвольной, или спонтанной поляризацией $U_{\text{ПС}}$.

По диаграммам $U_{\text{ПС}}$ производится литолого-стратиграфическое расчленение геологического разреза, вскрытого скважиной.

Изучение и комплексный анализ свойств электрического поля естественных потенциалов $U_{\text{ПС}}$ в скважинах могут быть использованы для определения: мощности пластов горных пород и проницаемых интервалов, пористости коллекторов, глинистости горных пород, величины пластовых давлений, а также для определения интервалов и качества перфорации обсадных колонн.

Регистрация параметра естественного электрического поля $U_{\text{ПС}}$ производится посредством замера параметра разности электрических потенциалов между двумя электродами: перемещаемым по скважине измерительным электродом М и заземленным на поверхности электродом N (рис. 2.1).

Для управления режимами прибора, визуализации и записи каротажных диаграмм используется наземный цифровой регистратор [71]. Величина потенциала электрода N постоянна. Таким образом, для разности потенциалов между электродами М и N справедливо выражение:

$$\Delta U_{\text{ПС}}^{MN} = U_{\text{ПС}}^M - U_{\text{ПС}}^N = U_{\text{ПС}}^M - \text{const} \quad (2.1)$$

Диаграмма ПС отображает изменение значения потенциала естественного поля (скважинного потенциала) у измерительного электрода М с изменением глубины.

К электроду М, соответственно, относится точка записи измеряемого параметра.

Единицей измерения параметра разности потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}^{MN}$ является мВ.

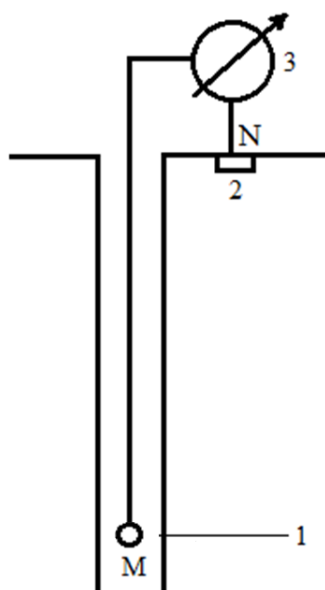


Рис. 2.1. Схема регистрации разности электрических потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$.
1 – подвижный измерительный электрод М; 2 – электрод N, заземленный на поверхности; 3 – наземный цифровой регистратор

При каротажных исследованиях методом ПС измеряется разность электрических потенциалов (2.1). За линию нулевых значений отсчета скважинных потенциалов условно принимается «линия глин» - прямая, параллельная оси глубин, проведенная по значениям $\Delta U_{\text{ПС}}^{MN}$, соответствующим глинистым горным породам, а вместо масштабной шкалы в верхней части диаграммы размещается отрезок длиной 2 см, на котором отображается сколько милливольт соответствует этому отрезку (рис. 2.2).

Масштаб выбирается таким образом, чтобы аномалии разности потенциалов четко отображались на каротажных диаграммах и укладывались в пределах ширины масштабной сетки, не выходя часто за ее пределы. Как правило на практике применяются следующие масштабы: 25, 10, 5 мВ в 2 см. Рекомендуется применять единый масштаб для всех скважин, охватывающих район геофизических работ.

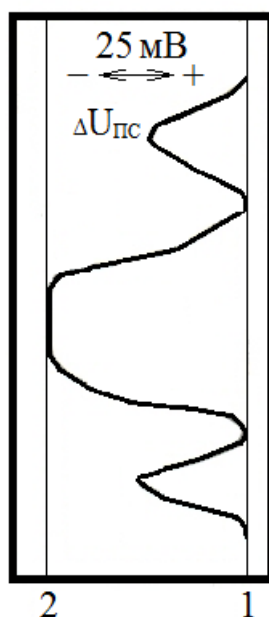


Рис. 2.2. Диаграмма разности электрических потенциалов в скважине $\Delta U_{\text{Пс}}$.

1 – линия глиин; 2 – линия максимального отклонения амплитуды
относительно линии глиин

При записи диаграмм методом ПС между электродами возникает электродная разность потенциалов (поляризация), по причине их неоднородности и неоднородности сред, в которых они находятся. Это приводит к постепенному смещению диаграммы ПС.

При измерении параметра $U_{\text{Пс}}$ между измерительным электродом и скважинной жидкостью возникает электродная разность потенциалов, по причине того, что атомы металла погруженного в жидкость электрода перемещаются в нее в виде катионов, а избыточные электроны атомов металла, переместившихся в жидкость, образуют вдоль поверхности металла электрода двойной электрический слой из электронов и ионов, сообщая ему отрицательный потенциал. Электродная разность потенциалов исключается посредством введения в схему измерительной установки разности потенциалов, равной по модулю значению электродной разности потенциалов и противоположной по знаку [17].

Для исключения электродной разности потенциалов служит устройство, называемое компенсатором поляризации, которое представляет из себя элемент, замкнутый на резистор, создающий в измерительной цепи соответствующее падение потенциала от тока в цепи элемента. С помощью компенсатора возможно изменять полярность разности потенциалов, приложенной от элемента в измерительную цепь [17].

Также в настоящее время в измерительных установках ПС для исключения электродной поляризации применяются неполяризующиеся электроды, обладающие постоянным электродным потенциалом, изготовленные обычно преимущественно из свинца, так как при контакте с кислородосодержащей средой он образует пленку PbO и имеет достаточно устойчивое значение электродного потенциала по сравнению с другими металлами.

Электрические электродные потенциалы, потенциалы гальванокоррозии, потенциалы трибополяризации (движения), седиментационные потенциалы (осаждения), потенциалы теллурических (переменных земных) и блуждающих токов от различных промышленных процессов и производств являются помехами и оказывают негативное влияние на качество диаграмм ПС и при проведении каротажных измерений должны быть полностью исключены.

2.1.1 Диффузионно-адсорбционные электрические поля

Диффузионно-адсорбционные электрические поля в скважинах образуются при различии химического состава и параметра концентрации солей пластовых вод и скважинной жидкости.

При контакте растворов электролита различной концентрации или состава происходит диффузия ионов, на которые диссоциирует электролит из более концентрированного раствора в менее концентрированный. Скорость диффузии катионов (+) при этом меньше, чем у анионов (-). Со временем в более слабом растворе накапливается избыточное количество отрицательно заряженных ионов, а в более сильном растворе – положительно заряженных ионов по причине их различной подвижности (рис. 2.3).

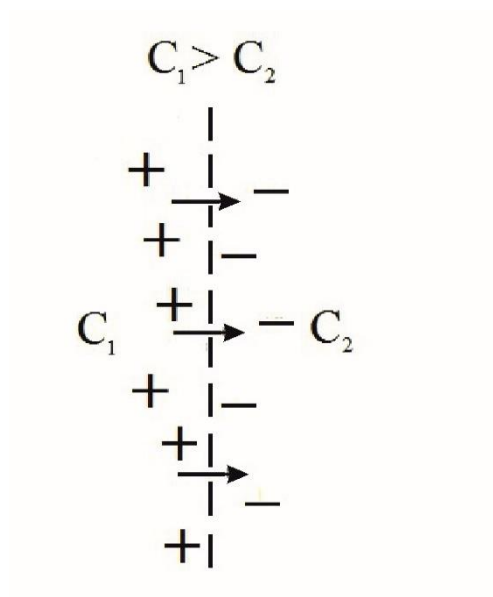


Рис. 2.3. Схема образования диффузионных потенциалов на контакте двух растворов электролита различной концентрации.

c_1 – положительно заряженные ионы (катионы); c_2 – отрицательно заряженные ионы (анионы)

Разность потенциалов E_d между двумя растворами электролита различной концентрации описывается уравнением В. Нернста:

$$E_d = \frac{RT}{nF} \cdot \frac{u-v}{u+v} \cdot \ln \frac{c_1}{c_2} \quad , \quad (2.2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/К·моль;

T – абсолютная температура, К;

n – валентность ионов;

F – постоянная Фарадея, равное 96 500 Кл/моль;

u и v – подвижности катиона и аниона, см/с;

c_1 и c_2 – концентрация электролита в растворе 1 и растворе 2, г-экв/л;

При постоянной температуре величины перед логарифмом принимают соответственно постоянные значения и образуют коэффициент диффузионных потенциалов K_d .

$$E_d = 2,3 \frac{RT}{nF} \cdot \frac{u-v}{u+v} \cdot \lg \frac{c_1}{c_2} = K_d \cdot \lg \frac{c_1}{c_2} \quad (2.3)$$

Уравнение Нернста применимо к сильно разбавленным растворам солей.

Скважинную жидкость и пластовые воды в нефтяных скважинах принято условно считать растворами хлористого натрия (NaCl).

Подставив значения абсолютной подвижности иона Na^+ и иона Cl^- в формулу K_d , получаем

$$K_d = 2,3 \frac{RT}{n \cdot F} \cdot \frac{u-v}{u+v} = 2,3 \frac{8,314 \cdot 2,93}{96500 \cdot 1} \cdot \frac{0,00045 - 0,00067}{0,00045 + 0,00067} = -11,6 \text{ мВ}, \quad (2.4)$$

где u – абсолютная подвижность иона Na^+ , равная 0,00045 см/с;

v – абсолютная подвижность иона Cl^- , равная 0,00067 см/с по справочным данным при температуре 20 °С.

Следовательно

$$E_d = -1,16 \cdot \lg \frac{c_1}{c_2} = -1,16 \cdot \lg \frac{\rho_1}{\rho_2} \text{ мВ} \quad , \quad (2.5)$$

где ρ_1 – сопротивление пластовых вод;

ρ_2 – сопротивление скважинной жидкости.

Для различных растворов солей величина диффузионного потенциала E_d различна.

Величина K_d изменяется с изменением температуры:

$$K_d^t = K_d^{20} \frac{273+t}{293}. \quad (2.6)$$

Перегородка из горных пород (мембрана), разделяющая два различно концентрированных раствора электролита, сорбирует (задерживает) некоторые ионы. Поэтому значение потенциала, возникающего в таких условиях, отличается от величины потенциала Нернста. Такой потенциал называется диффузионно-адсорбционным или мембранным $E_{\text{ДА}}$.

Диффузионно-адсорбционный потенциал по аналогии с выражением (2.3) равен:

$$E_{\text{ДА}} = K_{\text{ДА}} \cdot \lg \frac{c_1}{c_2}. \quad (2.7)$$

Коэффициент диффузионно-адсорбционных потенциалов $K_{\text{ДА}}$ отличается от коэффициента диффузионных потенциалов $K_{\text{Д}}$ по величине и по знаку и зависит от адсорбционных свойств мембраны.

В нефтяных скважинах диффузионно-адсорбционный потенциал равен:

$$E_{\text{ДА}} = K_{\text{ДА}} \cdot \lg \frac{\rho_2}{\rho_1} = K_{\text{ДА}} \cdot \lg \frac{\rho_{\text{ф}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (2.8)$$

где ρ_1 ($\rho_{\text{в}}$) – сопротивление первого раствора электролита (пластовая вода);
 ρ_2 ($\rho_{\text{ф}}$) – сопротивление второго раствора электролита (скважинная жидкость – фильтрат бурового раствора);

Разность потенциалов на границе контакта двух пластов с различными диффузионно-адсорбционными свойствами равна:

$$\Delta E = E_{\text{ДА}_1} - E_{\text{ДА}_2} = (K_{\text{ДА}_1} - K_{\text{ДА}_2}) \cdot \lg \frac{\rho_{\text{ф}}}{\rho_{\text{в}}} = K_{\text{ПС}} \cdot \lg \frac{\rho_{\text{ф}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (2.9)$$

где $K_{\text{ПС}}$ – коэффициент разности потенциалов собственной поляризации.

Максимальными значениями разность диффузионно-адсорбционных потенциалов отмечается на контакте горных пород, с минимальной и максимальной адсорбционной активностью.

Коэффициент диффузионно-адсорбционной активности чистых кварцевых песчаников с нулевой адсорбционной активностью равен $K_{ДА} = K_D = -11,6$ мВ, а для тонкодисперсных глин с максимальной адсорбционной активностью $K_{ДА} = K_{ДА}^{max} = 58$ мВ при температуре 20 °С.

$$\Delta E^{max} = E_D - E_{ДА}^{max} = -11,6 \cdot \lg \frac{\rho_{\Phi}}{\rho_{В}} - 58 \cdot \lg \frac{\rho_{\Phi}}{\rho_{В}} = -69,6 \cdot \lg \frac{\rho_{\Phi}}{\rho_{В}} \text{ мВ. (2.10)}$$

Таким образом, максимальное значение коэффициента разности потенциалов собственной поляризации $K_{ПС} = 69,6$ мВ ≈ 70 мВ при температуре 20 °С.

В нефтяных скважинах, как правило, минерализация пластовых вод $c_{В}$ больше минерализации скважинной жидкости c_0 .

На рис. 2.4 приведен пример возникновения диффузионно-адсорбционного электрического поля на примере пористого продуктивного пласта нефтяной скважины. Коллектор, насыщенный пластовой минерализованной водой, в целом не влияет на процесс диффузии и на движение ионов, поэтому против него менее концентрированная скважинная жидкость (буровой раствор) имеет отрицательный заряд, а сам пласт - положительный. В данном случае учитывается контакт пластовой воды со скважинной жидкостью через глину, образующую мембрану. Так как глина не пропускает анионы (-), а пропускает только катионы (+), в дальнейшем менее концентрированный раствор приобретает положительный заряд по отношению к раствору с большей концентрацией. Вследствие этого скважинная жидкость против глин имеет положительный заряд, против песчаников и известняков – отрицательный. Это происходит при условии, если $c_{В} > c_0$, что характерно для реальных условий нефтяных скважин и называется «прямым полем» ПС [14].

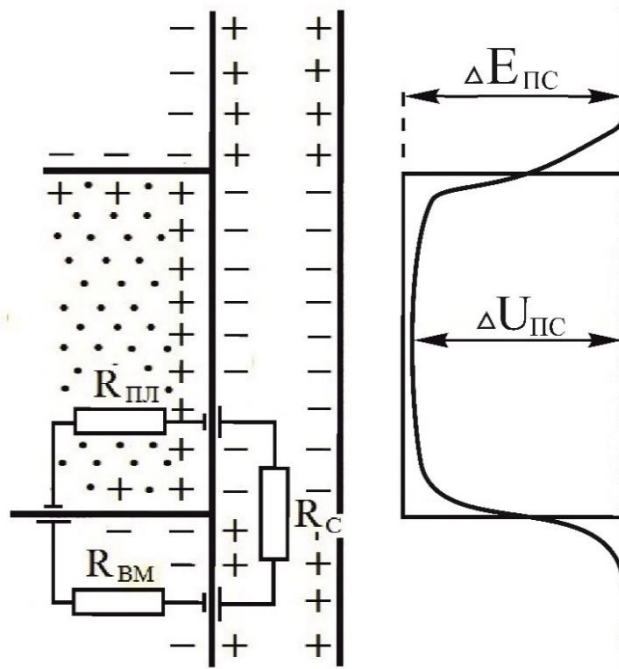


Рис. 2.5. Эквивалентная электрическая схема поля собственной поляризации в нефтяной скважине в виде замкнутого электрического контура

$$\Delta U_{\text{ПC}} = i_{\text{ПC}} \cdot R_{\text{C}} = E_{\text{ПC}} - i_{\text{ПC}} (R_{\text{П}} + R_{\text{ВМ}}). \quad (2.11)$$

Для мощных пластов наибольшее сопротивление циркуляции токов оказывает сама скважина, в которой отмечается практически все падение электрического потенциала. Сопротивления $R_{\text{ВМ}}$ и $R_{\text{П}}$ значительно меньше R_{C} , так как сечение проводника R_{C} значительно мало по сравнению с сечениями проводников $R_{\text{ВМ}}$ и $R_{\text{П}}$ и ими можно пренебречь, соответственно $\Delta U_{\text{ПC}} \approx E_{\text{ПC}}$.

Для маломощных пластов $\Delta U_{\text{ПC}} < E_{\text{ПC}}$, так как в данном случае величина сопротивления пласта высока и амплитуда измеряемой разницы потенциалов $\Delta U_{\text{ПC}}$ значительно отличается от статической амплитуды $E_{\text{ПC}}$.

Таким образом:

$$\frac{\Delta U_{\text{ПC}}}{E_{\text{ПC}}} = \beta < 1, \quad (2.12)$$

где β – коэффициент учета мощности (коэффициент снижения амплитуды).

В настоящее время существуют теоретические и палеточные модели распределения потенциала $\Delta U_{\text{ПС}}$ в нефтяных скважинах.

Номограмма определения коэффициента β представлена на рис. 2.6.

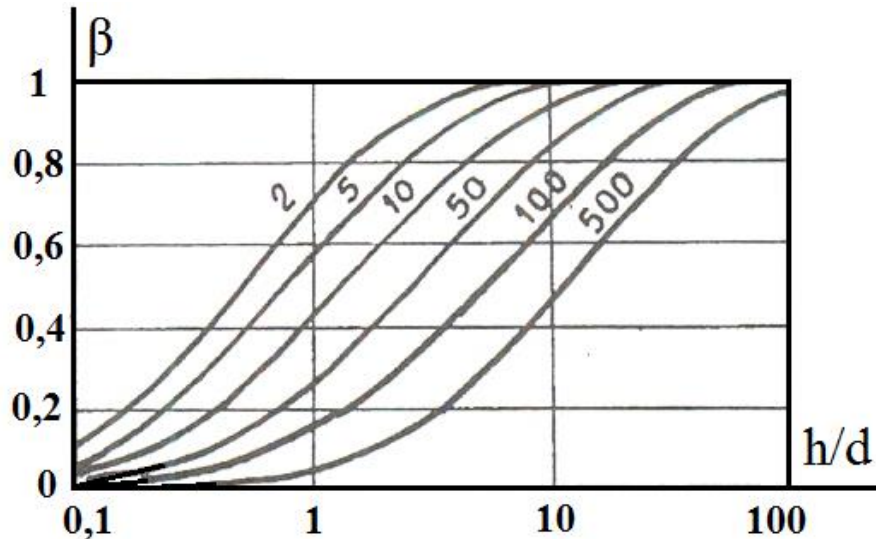


Рис. 2.6. Номограмма определения коэффициента учета мощности пластов β в зависимости от отношения мощности пласта h к диаметру скважины d . Шифр кривых - отношение удельного сопротивления пласта $\rho_{\text{П}}$ к удельному сопротивлению вмещающих пород $\rho_{\text{ВМ}}$

Проникновение фильтрата бурового раствора в пласт приводит к уменьшению амплитуды измеряемой разницы потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$, так как это эквивалентно увеличению диаметра скважины d и уменьшению отношения h/d .

Понижение амплитуды $\Delta U_{\text{ПС}}$ с увеличением зоны проникновения представлено на рис. 2.7.

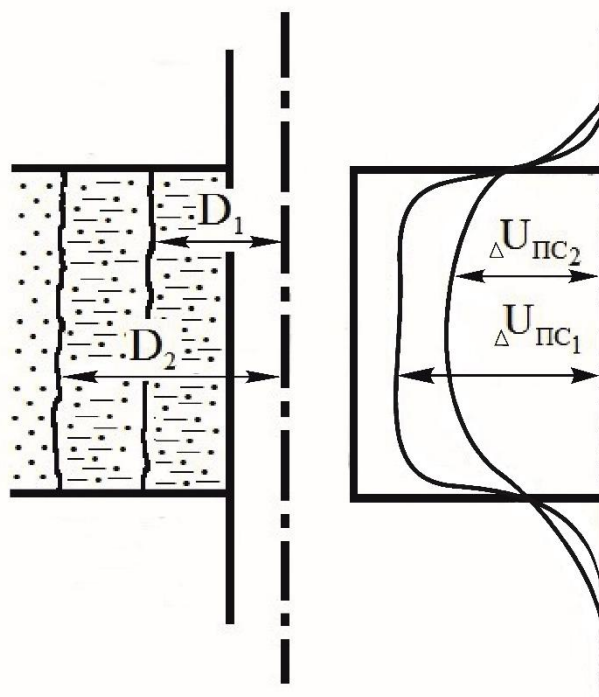


Рис. 2.7. Влияние зоны проникновения на амплитуду $\Delta U_{\text{Пс}}$

Величина диффузионно-адсорбционного потенциала $E_{\text{Пс}}$ мощного пласта песчаника или известняка в скважинах, залегающего среди глин, зависит от соотношения концентраций пластовой воды $C_{\text{П}}$ и глинистого раствора $C_{\text{С}}$. В таблице 2.1 приведены значения $E_{\text{Пс}}$ в зависимости от соотношения $C_{\text{П}}/C_{\text{С}}$. Таким образом, чем больше отношение $C_{\text{П}}/C_{\text{С}}$, тем больше значение диффузионно-адсорбционного потенциала $E_{\text{Пс}}$.

Таблица 2.1

Значения $E_{\text{Пс}}$ в зависимости от соотношения $C_{\text{П}}/C_{\text{С}}$ [21]

$C_{\text{П}} / C_{\text{С}}$	1	2	5	10	20	50	100
$E_{\text{Пс}}, \text{ мВ}$	0	18	42	60	78	102	120

2.1.2 Фильтрационные электрические поля

Электродвижущие силы фильтрации в скважинах возникают в результате движения скважинной жидкости в пласт, либо при движении флюида из пласта в скважину и называются фильтрационными потенциалами или потенциалами течения.

Во избежание нефтегазоводопрооявлений при буровых работах давление столба жидкости в скважине всегда больше значения пластового давления.

Фильтрационные потенциалы образуются вследствие адсорбции ионов поверхностью частиц горной породы, т. е. при фильтрации жидкости через поры горной породы параллельно их стенкам происходит смещение подвижного слоя жидкости, захватывающего часть избыточных ионов. Таким образом в неподвижном слое под действием давления, в направлении движения жидкости отмечается недостаток ионов того же знака, а на противоположном конце - их избыток, в результате чего возникает разность электрических потенциалов между концами порового канала горной породы (Рис. 2.8).

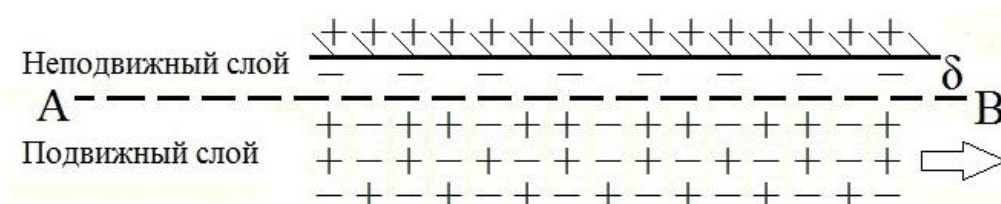


Рис. 2.8. Схема возникновения фильтрационных потенциалов в поровом канале пласта. АВ – граница между подвижным и неподвижным слоями жидкости; δ – толщина неподвижного слоя

Разность потенциалов фильтрации E_{Φ} в пористой насыщенной среде описывается уравнением Г. Гельмгольца:

$$E_{\Phi} = \frac{\varepsilon \xi \rho_{\Phi}}{4\pi\eta} \Delta p, \quad (2.13)$$

где ε – диэлектрическая постоянная жидкости;

ρ_f – удельное электрическое сопротивление жидкости, движущейся в поровом пространстве, Ом·м;

η – вязкость жидкости, П;

Δp – перепад давлений, атм;

ξ – электрокинетический потенциал (разность электрических потенциалов между подвижным и неподвижным слоями жидкости), мВ;

Электрокинетический потенциал (ξ – потенциал) может менять свой знак на обратный. Его величина определяется природой адсорбированных ионов. При повышении валентности катиона абсолютная величина электрокинетического потенциала уменьшается и для трех- и четырехвалентных ионов изменяет свой знак, вследствие чего неподвижная адсорбированная часть раствора становится положительно заряженной по отношению к подвижной. Соответственно знак фильтрационного потенциала зависит от знака электрокинетического потенциала и направления фильтрационного потока.

Величины ε , ρ_f и η всегда обладают положительными значениями и не влияют на знак фильтрационного потенциала.

Чем больше значение сопротивления фильтрующейся жидкости, а также давления в скважине и в пласте, тем больше величина разности фильтрационных потенциалов.

Величина разности потенциалов фильтрации в скважинах незначительна и варьируется в пределах от 4 до 10 мВ [17].

Зная значение величины разности фильтрационных потенциалов можно определить величину пластовых давлений в скважинах.

$$\Delta p = p_{\text{скв}} - p_{\text{пл}}, \quad (2.14)$$

где $p_{\text{скв}}$ – давление столба жидкости в скважине;

$p_{\text{пл}}$ – пластовое давление;

В выражении (2.13) все величины, стоящие перед Δp постоянные, $p_{\text{СКВ}}$ вычисляется по высоте столба жидкости в скважине.

Следовательно:

$$E_{\text{ф}} = K_{\text{ф}}(p_{\text{СКВ}} - p_{\text{пл}}). \quad (2.15)$$

Для определения величины пластового давления сначала измеряется значение разности фильтрационных потенциалов в скважине, заполненной буровым раствором с гидростатическим давлением $p_{\text{СКВ}}$, затем посредством долива или откачки бурового раствора производится изменение гидростатического давления на $p'_{\text{СКВ}}$ и измеряется значение разности потенциалов течения $E'_{\text{ф}}$:

$$E'_{\text{ф}} = K_{\text{ф}}(p'_{\text{СКВ}} - p_{\text{пл}}). \quad (2.16)$$

Таким образом из выражений (2.15) (2.16) получается система уравнений с двумя неизвестными при решении которой определяются величины коэффициента $K_{\text{ф}}$ и пластового давления $p_{\text{пл}}$ [56].

$$\begin{cases} E_{\text{ф}} = K_{\text{ф}}(p_{\text{СКВ}} - p_{\text{пл}}) \\ E'_{\text{ф}} = K_{\text{ф}}(p'_{\text{СКВ}} - p_{\text{пл}}) \end{cases} \quad (2.17)$$

2.1.3 Электрические поля, связанные с окислительно-восстановительными процессами

Окислительно-восстановительные электродвижущие силы обусловлены различными химическими и электрохимическими процессами, происходящими в скважинах. Они возникают вследствие окислительно-восстановительных реакций, происходящих на контакте горных пород, имеющих электронную проводимость, с электролитами промывочной жидкости и пластовых вод.

В результате таких реакций окисляющаяся среда отдает электроны и заряжается положительно, а восстанавливающаяся среда присоединяет электроны и заряжается отрицательно.

Разность потенциалов, связанных с окислительно-восстановительными процессами описывается уравнением:

$$E_{ОВ} = \frac{RT}{nF} \ln K \frac{c'}{c''}, \quad (2.18)$$

где K – константа равновесия окислительно-восстановительной реакции среды;

c' и c'' – концентрация веществ, находящихся в высшей и низшей степени окисления [56].

Окислительно-восстановительные потенциалы образуются в скважинах, вскрывших рудные, угольные, сланцевые залежи, в результате окисления сульфидных рудных горных пород, ископаемых углей и пород, содержащих окислы металлов, кислородом, растворенным в буровом растворе или в подземных водах.

В открытом стволе нефтяных скважин в процессе их строительства окислительно-восстановительные потенциалы не имеют значительного распространения и для изучения таких разрезов малоперспективны.

В обсаженных скважинах потенциалы $E_{ОВ}$ могут наблюдаться на контакте обсадных труб со скважинной жидкостью, а также в зонах перфорации эксплуатационных колонн.

2.2. Особенности естественных геоэлектрических полей в карбонатных разрезах скважин

Выделение пластов углеводородов в карбонатных разрезах является важной и актуальной задачей, решаемой геофизическими методами исследования скважин.

Зачастую в карбонатных насыщенных пластах со сложной геологической структурой могут содержаться трудноизвлекаемые запасы углеводородов. Поэтому такие коллекторы требуют детального изучения [48].

При прямом поле отрицательными значениями на диаграмме ПС выделяются чистые (неглинистые) карбонатные пласты – мелко-, средне-, крупнозернистые известняки и доломиты, а также плотные коллекторы с низкой пористостью и высокой плотностью.

Величина амплитуды диаграммы ПС, следовательно, и значение коэффициента диффузионно-адсорбционного потенциала сильно зависит от глинистости карбонатных горных пород. Глинистые карбонатные пласты выделяются на диаграммах ПС высокими значениями амплитуды. Если глинистость карбонатных пластов максимальна, на диаграммах ПС они выделяются так же, как и глины.

Существенное влияние на изменение значений диффузионно-адсорбционной активности карбонатных горных пород оказывают: размер и характер порового пространства, степень дисперсности глинистого вещества, содержание песчаных, гипсовых, ангидритовых, кремнистых, пиритовых, галогеновых и других фракций, присутствие в растворах солей CaCl_2 и MgCl_2 .

Зачастую высокопористые и проницаемые карбонатные пласты отмечаются на каротажных диаграммах более высокими значениями амплитуд, по сравнению с непористыми и непроницаемыми карбонатами, но разница этих значений как правило незначительна. Поэтому литологическое расчленение карбонатных разрезов по диаграммам ПС на пористые и непористые пласты затруднительно.

В большинстве случаев по диаграмме ПС можно отличить глинистые карбонатные пласты от неглинистых. Чистые карбонатные горные породы, обладающие высокой пористостью и проницаемостью, могут выделяться на диаграмме ПС так же, как и чистые низкопористые и непроницаемые карбонатные горные породы.

В карбонатных разрезах нефтегазонасыщенные пласты не проявляют тех характерных признаков, наблюдаемых на диаграммах ПС в терригенных разрезах.

2.3. Интерпретация диаграмм метода потенциалов собственной поляризации

2.3.1 Качественная интерпретация диаграмм ПС

При качественной интерпретации диаграмм метода потенциалов собственной поляризации производится литолого-стратиграфическое расчленение геологических разрезов скважин, а также определение мощности и границ пластов по различию физических параметров горных пород.

По своему литологическому составу коллекторы нефти и газа отличаются от вмещающих пород и выделяются на каротажных диаграммах по электрохимической активности (ПС) [14].

В большинстве случаев при строительстве скважин величина минерализации бурового раствора меньше величины минерализации пластовых вод ($c_b > c_o$), поэтому имеет место «прямое поле ПС» [14, 74]. Таким образом, максимумами на диаграммах ПС выделяются плотные непроницаемые глинистые горные породы, а минимумами, соответственно проницаемые известняки и песчаники.

В терригенных разрезах скважин применение метода ПС имеет широкое применение и высокую эффективность, так как горные породы песчано-глинистых разрезов характеризуются различной диффузионно-адсорбционной активностью.

В карбонатных разрезах горные породы не проявляют тех характерных признаков, наблюдаемых в терригенных разрезах [74], соответственно интерпретация диаграмм метода ПС в карбонатных разрезах вызывает большие трудности и имеет ряд ограничений в связи с низкими значениями амплитуд и контраста аномалий.

Определение границ пластов

Определение границ пластов по различию физических параметров горных пород осуществляется по правилу полумаксимума (или полуминимума) аномалии диаграммы ПС (рис. 2.9).

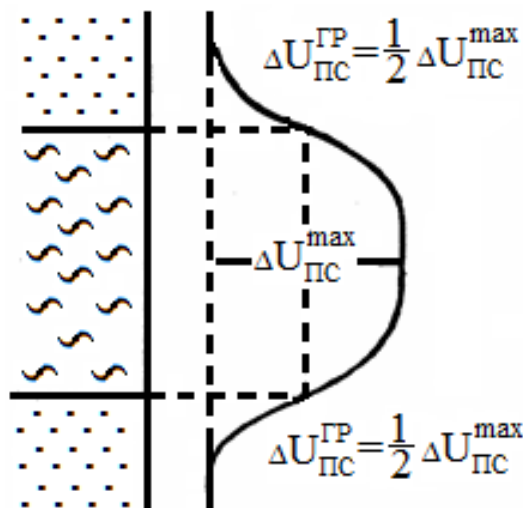


Рис. 2.9. Схема определения границ пластов по диаграммам ПС по правилу полумаксимума

2.3.2 Количественная интерпретация диаграмм ПС

Количественная интерпретация диаграмм ПС предусматривает решение таких задач, как определение мощности пластов, определение минерализации пластовых вод, определение пористости и глинистости коллекторов и др.

Определение минерализации пластовых вод

Если естественные электрические поля в скважинах имеют преимущественно диффузионно-адсорбционное происхождение, то по диаграммам ПС можно определить минерализацию пластовых вод.

Из выражений (2.3), (2.12) следует:

$$\Delta U_{\text{ПС}} = \beta \cdot K_{\text{ПС}} \cdot \lg \frac{\rho_0}{\rho_{\text{в}}}, \quad (2.19)$$

где β — коэффициент ослабления (учета) мощности (коэффициент снижения амплитуды);

$K_{\text{ПС}}$ — коэффициент собственной поляризации горных пород;

$\rho_{\text{в}}$ — удельное электрическое сопротивление пластовых вод;

ρ_0 – удельное электрическое сопротивление скважинной жидкости;

За точку отсчета условно выбирается линия глин – уровень самых высоких значений на диаграмме, учитывая ее масштаб.

Значение коэффициента β выбирается по номограмме определения коэффициента учета мощности пластов в зависимости от отношения мощности пласта h к диаметру скважины d (рис. 2.6) [56].

Значение коэффициента $K_{\text{ПС}}$ определяется по результатам исследования керна в лабораторных условиях.

Для определения величины коэффициента $K_{\text{ПС}}$ также может применяться метод двух растворов, который заключается в измерении разности сейсмoeлектрических потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$ в скважине, заполненной буровым раствором с удельным электрическим сопротивлением ρ_0^1 и последующей заменой бурового раствора на другой с удельным электрическим сопротивлением ρ_0^2 для последующего измерения параметра $\Delta U_{\text{ПС}_2}$.

Таким образом, получается система уравнений с двумя неизвестными, при решении которой определяются величины коэффициента $K_{\text{ПС}}$ и удельного электрического сопротивления $\rho_{\text{в}}$.

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{ПС}} = \beta \cdot K_{\text{ПС}} \cdot \lg \frac{\rho_0^1}{\rho_{\text{в}}} \\ \Delta U_{\text{ПС}_2} = \beta \cdot K_{\text{ПС}} \cdot \lg \frac{\rho_0^2}{\rho_{\text{в}}} \end{cases} \quad (2.20)$$

Также можно воспользоваться номограммами, решив систему уравнений (2.20) графическим способом, соблюдая условие $\rho_0^1 > \rho_{\text{в}} > \rho_0^2$. Соответственно при смене бурового раствора ρ_0^1 на ρ_0^2 знак параметра разности потенциалов поменяется на противоположный. Удельное электрическое сопротивление бурового раствора $\rho_{\text{в}}$, при котором значение разности электрических потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$ равно нулю будет равным значению удельного электрического сопротивления пластовых вод $\rho_{\text{в}}$. Номограмма определения удельного электрического сопротивления пластовых вод $\rho_{\text{в}}$ методом двух растворов представлена на рис. 2.10.

Величина удельного электрического сопротивления бурового раствора ρ_o может быть определена также при помощи скважинного резистивиметра, или лабораторным методом.

Таким образом, решив уравнение (2.19) с одной неизвестной находим ρ_v – удельное электрическое сопротивление пластовых вод. Далее, зная удельное электрическое сопротивление пластовых вод ρ_v и температуру t находим значение минерализации пластовых вод c_v по формуле:

$$c_v = \frac{10}{(1+0,04t) \cdot \rho_v}, \quad (2.21)$$

Значение удельного электрического сопротивления пластовых вод также можно получить по номограммам, решив задачу графическим способом [56].

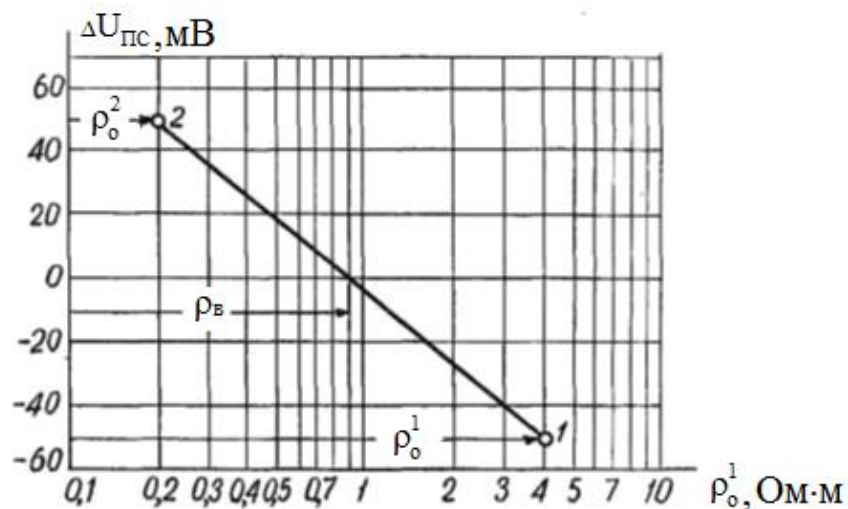


Рис. 2.10. Номограмма определения удельного электрического сопротивления пластовых вод ρ_v методом двух растворов

Определение пористости коллекторов

Пористость коллекторов по диаграммам ПС определяется по связи значений коэффициента пористости K_{Π} со значениями амплитуды регистрируемого сигнала, определенной путем сопоставления каротажных диаграмм с результатами

исследований керна. Так как величина измеряемого параметра зависит от мощности пласта, а также от соотношения значений удельного электрического сопротивления пластовых вод ρ_v и удельного электрического сопротивления скважинной жидкости ρ_o , то измеренная величина разности электрических потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$ пересчитывается – приводится к стандартным условиям ($h = \infty, \rho_o = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), или находится параметр $\alpha_{\text{ПС}}$ по формуле:

$$\alpha_{\text{ПС}} = \frac{U_{\text{ПС}}^X}{U_{\text{ПС}}^{\text{ОП}}}, \quad (2.22)$$

где $\alpha_{\text{ПС}}$ – двойной разностный параметр;

$U_{\text{ПС}}^X$ – амплитуда аномалии сигнала в интерпретируемом пласте;

$U_{\text{ПС}}^{\text{ОП}}$ – максимальная амплитуда аномалии сигнала в изучаемом геологическом разрезе, соответствующая наименее глинистым коллекторам.

Шифр кривых – глинистость $C_{\text{ГЛ}}$, %

На рис. 2.11 представлена номограмма определения пористости коллекторов по параметру $\alpha_{\text{ПС}}$ при известном значении их глинистости.

Недостатками метода определения пористости по параметру $\alpha_{\text{ПС}}$ является большая погрешность измерений в связи с неоднородностью исследуемых насыщенных пористых сред.

Этот метод эффективен при постоянстве значений концентрации солей пластовых вод, при однородном составе глинистого цемента и при отсутствии карбонатного цемента в изучаемом геологическом разрезе скважины, поэтому в настоящее время используется редко [56].

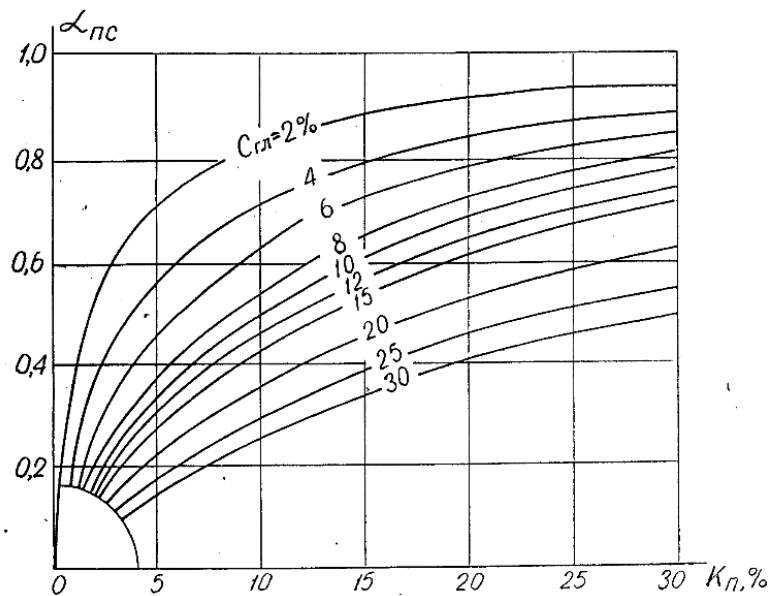


Рис. 2.11. Номограмма определения пористости коллекторов по параметру $\alpha_{пс}$ при известном значении их глинистости по В.Н. Дахнову.

Определение глинистости коллекторов

Глинистость коллекторов по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа определяется по зависимости адсорбционной активности, соответственно и амплитуды регистрируемого сигнала против продуктивных пластов от содержания в них глинистой составляющей.

При нахождении параметра глинистости коллекторов вычисляется параметр $\alpha_{пс}$ по формуле (2.22) и применяются номограммы зависимости параметра $\alpha_{пс}$ от параметра глинистости, полученные лабораторным методом.

На рис. 2.12 в качестве примера представлена номограмма определения глинистости водонасыщенных коллекторов по параметру $\alpha_{пс}$. Эти зависимости справедливы для высокопористых водонасыщенных песчаников [56].

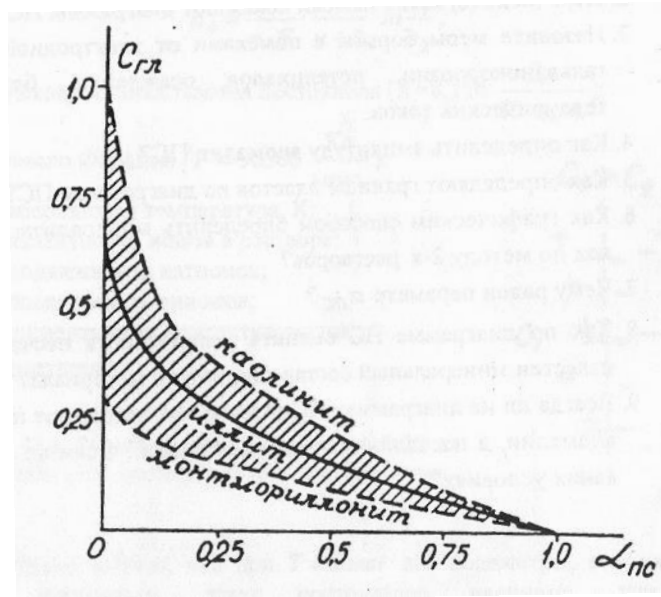


Рис. 2.12. Номограмма определения глинистости водонасыщенных песчаных коллекторов по параметру $\alpha_{\text{пс}}$ по Р. Дебранду

Выводы по главе 2

- Метод ПС является одним из основных методов электрометрии скважин при исследовании их геологических разрезов, который отличается относительно невысокой себестоимостью, простотой и доступностью.
- Метод ПС имеет ряд недостатков: невысокую точность, недостаточную информативность, а также может работать не во всех скважинных условиях.
- Применение метода ПС в карбонатных разрезах для определения интервалов продуктивных объектов и оценки их эксплуатационных характеристик является малоэффективным из-за низкой информативности.

3 СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

3.1 Сейсмoeлектрические явления в горных породах

Сейсмoeлектрические явления – это совокупность процессов, происходящих в горных породах под действием упругих колебаний.

К сейсмoeлектрическим явлениям относятся: пьезoeлектрический эффект, сейсмoeлектрический эффект I рода I, сейсмoeлектрический эффект II рода E, трибоeлектрический эффект и др., а также их суммарное проявление.

При воздействии упругим полем на пористую насыщенную среду происходит увеличение её электропроводности (эффект I) и возникновение в ней вторичного электрического поля (эффект E). При этом происходит двойное обратное влияние: сначала энергия переменного упругого поля преобразуется в электрическую - сейсмoeлектрический эффект. На его параметры влияет дополнительное акустическое поле, также происходит обратное влияние вторичного электрического поля на упругое.

Многие авторы, изучающие эти явления, убеждены, что при акустическом воздействии на пористую насыщенную среду электрокинетический механизм возникновения сейсмoeлектрического эффекта E является основным [35].

При наложении акустического поля на насыщенную горную породу между двумя ее соседними точками возникает разность электрических потенциалов [74] при смещении жидкой фазы относительно твердого скелета породы, называемая сейсмoeлектрическим эффектом второго рода E.

Эффект E относится к электрокинетическим явлениям, изучаемым коллоидной химией.

А. Г. Ивановым [15, 16], открывшим явление сейсмoeлектрического эффекта при полевых геофизических исследованиях в 1939 году в осадочных горных породах, предложена фильтрационная гипотеза этого явления, заключающаяся в том, что на границе раздела твердой и жидкой фаз присутствует двойной

электрический слой, образующийся вследствие адсорбции ионов в случае их избытка на поверхности твердой фазы.

Избыточные ионы создают электростатическое поле, под действием которого ионы, находящиеся на расстоянии радиуса сферы молекулярного притяжения, адсорбируются твердой фазой.

Происходит это обычно с ионами, способными достраивать кристаллическую решетку. В случае их отсутствия происходит избирательная адсорбция ионов, обладающих большими значениями валентности и меньшего гидратного радиуса. За счет этих ионов и молекул прочно связанной жидкости на поверхности твердой фазы возникает неподвижный адсорбционный слой.

В скважинах двойной электрический слой возникает на контакте горной породы и скважинной жидкости (твердой и жидкой фаз), образуя разность электрических потенциалов.

Ионы и молекулы жидкости, близкие к поверхности горной породы под действием электростатических сил образуют адсорбционный слой.

Ионы, находящиеся за пределами этого слоя подвержены влиянию двух противоположно направленных явлений. С одной стороны – силам молекулярного теплового движения, стремящегося к их равномерному распределению, с другой – воздействию электростатического поля зарядов (разности между поверхностной плотностью зарядов горной породы и плотностью зарядов адсорбционного слоя).

Под влиянием равнодействующей этих сил плотность ионов уменьшается по мере удаления от границы адсорбционного слоя и образуется подвижный диффузный слой с рассеянным распределением ионов, менее надежно связанный с горной породой.

Рис. 3.1 отображает границу смещения жидкой фазы относительно твердого скелета горной породы и распределение заряда у поверхности этой границы.

На графике отображена схема двойного электрического слоя в скважинах, отображающая распределение заряда у поверхности раздела жидкой и твердой фаз и границу их смещения относительно друг друга. Из графика следует, что плотность заряда диффузного слоя и свободного раствора меньше плотности

заряда адсорбционного слоя. Следовательно, при движении жидкости лишь часть зарядов участвует в электрокинетических процессах.

Падение значения потенциала на расстоянии от линии смещения ББ до середины капилляра, заполненного раствором, называется электрокинетическим потенциалом ξ [35].

Иными словами, ξ – потенциал – это разность электрических потенциалов между неподвижным слоем ионов адсорбционного слоя и подвижным диффузным слоем [56].

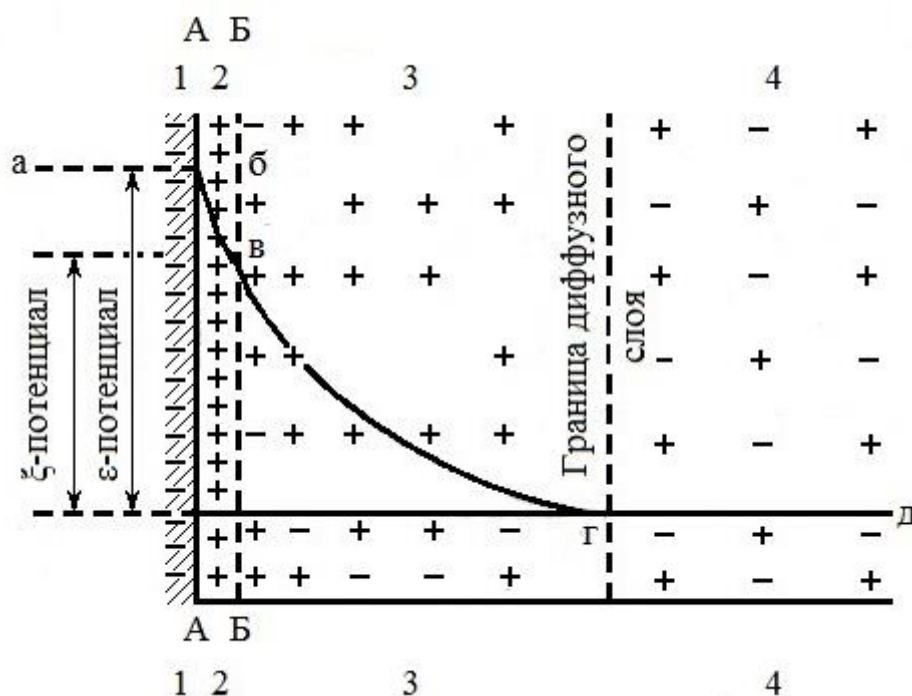


Рис. 3.1. Схема двойного электрического слоя в скважинах [32].

1–1 – отрицательно заряженная поверхность горной породы (слой потенциалоопределяющих ионов);

2–2 – неподвижный слой противоионов;

3–3 – диффузный слой;

4–4 – свободный раствор;

а – уровень потенциала в горной породе;

б–в – падение потенциала в неподвижной части двойного электрического слоя;

в–г – падение потенциала в подвижной части двойного электрического слоя;

г–д – уровень потенциала в свободном растворе;

А–А – граница раздела горной породы и скважинной жидкости (жидкой и твердой фаз);

Б–Б – граница раздела подвижной и неподвижной частей слоя (линия смещения).

ξ – электрокинетический потенциал;

ε – термодинамический потенциал

Величина ξ – потенциала всегда меньше величины термодинамического потенциала ε – полного скачка потенциала между точками в середине твердой фазы и в середине насыщенного капилляра.

При акустическом воздействии равновесное состояние двойного электрического слоя нарушается за счет относительного смещения электролита и твердой фазы. При этом в горных породах образуются потенциалы фильтрации U , мгновенные значения которых определяются формулой Гельмгольца-Смолуховского [71] на протяжении части длины упругой волны:

$$U = \frac{1}{4\pi} \int_{p_2}^{p_1} \frac{k\varepsilon\xi}{\eta\sigma} dp, \quad (3.1)$$

где p_1 и p_2 – мгновенные значения давления, атм;

k – коэффициент, учитывающий динамику распространения упругой волны;

ε – диэлектрическая проницаемость жидкости;

ξ – электрокинетический потенциал (разность электрических потенциалов между подвижным и неподвижным слоями жидкости), мВ;

η – вязкость жидкости, П;

σ – проводимость среды, См/м.

Я. И. Френкелем [61] на основе проведенного математического анализа подтверждена фильтрационная гипотеза сейсмoeлектрического эффекта E , предложенная А. Г. Ивановым. Им рассмотрены особенности сжатия и растяжения частиц, пор и заполняющей их жидкости при акустическом воздействии и выведено уравнение распространения продольных и поперечных колебаний в двухфазной среде. На основе формулы Гельмгольца-Смолуховского получена зависимость для вычисления сейсмoeлектрического потенциала:

$$E = i \frac{4\varepsilon\xi k w^2}{\pi \sigma r^2 \mu} f \rho_2 \left(\frac{K_2 \beta}{\rho_2 \beta' w_0^2} - 1 \right) \cdot u, \quad (3.2)$$

где μ – коэффициент вязкости среды;

i – комплексное значение напряженности электрического поля;

$$\beta = \frac{1}{f(1+\alpha)};$$

α – параметр, характеризующий механические свойства породы;

$$\beta' = 1 + \frac{K_2(\beta-1)}{K_0}, \quad K_0 \text{ – модуль сжимаемости твердой фазы};$$

$$k = \frac{K_1}{f} \text{ – коэффициент проницаемости};$$

r – радиус пор;

f – степень пористости;

ρ_2 – плотность поровой жидкости;

K_2 – модуль сжимаемости жидкости;

w_0 – скорость распространения продольных упругих волн;

w – частота колебаний продольных упругих волн;

u – смещение частиц горной породы.

Из формулы (3.2) следует, что величина напряженности электрического поля прямо пропорциональна коэффициенту пористости при постоянстве значений всех остальных параметров за исключением пористости.

Стоит отметить, что формула (3.2) не всегда справедлива для экспериментально полученных закономерностей, так как горная порода как правило имеет сложную структуру и состав [31, 35].

3.2 Влияние акустического воздействия на естественные электрические поля в скважинах и на физические свойства горных пород

3.2.1 Влияние акустического воздействия на электропроводность коллекторов нефти и газа

Геодинамическое состояние продуктивных пластов в скважинах характеризуется физико-химическими процессами, происходящими в них, в том числе техногенным влиянием добычи углеводородов [4].

Электропроводность коллекторов нефти и газа в скважинах также зависит от их напряженно-деформированного состояния. Зависимость коэффициента электропроводности пористой насыщенной среды от ее напряженно-деформированного состояния устанавливается опытным путем или посредством математического моделирования, учитывая структуру порового пространства и основные механизмы влияния напряжений на ее электрическую проводимость.

В качестве примера рассмотрим модель [5, 47], поровое пространство которой состоит из сферических пор, связанных дисковидными трещинами. Пористость среды α_1 равна:

$$\alpha_1 = \alpha'_1 + \alpha''_1, \quad (3.3)$$

где α'_1 – первая составляющая пористости (сферические поры);

α''_1 – вторая составляющая пористости (дисковидная трещиноватость).

Если флюид и вмещающая горная порода электропроводны, то для определения электропроводности среды справедливо следующее выражение [5]:

$$\sigma = \frac{2(\alpha_2 + 3\alpha'_1)\sigma_2 + 3\alpha''_1\sigma_1}{3\alpha_1}, \quad (3.4)$$

где σ_1 – удельная электропроводность флюида;

σ_2 – удельная электропроводность каркаса вмещающей горной породы;

$\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ – доля объема каркаса вмещающей горной породы.

Для диэлектрического каркаса электропроводность среды определяется следующим выражением:

$$\sigma = \frac{\alpha_1'' \sigma_1}{3\alpha_1}, \quad (3.5)$$

Основным механизмом влияния напряжений на электропроводность пористой насыщенной среды принят механизм открытия и закрытия трещин вследствие изменения напряженно-деформированного состояния, что приводит к изменению пористости и направлению потока флюида. Значение пористости α_1' меняется при этом несущественно. Соответственно его влияние на проводимость среды незначительно.

Значение пористости α_1'' зависит от эффективного давления $p_f = -\sigma_f$ и равно:

$$\alpha_1''(p_f) = \alpha_1''(0) = \int_{\delta(p_f)}^{\delta_{max}} f(\delta) d\delta, \quad (3.6)$$

где α_1'' – пористость напряженно-деформированной среды;

$f(\delta)$ – функция распределения трещинной пористости в виде:

$$\delta(p_f) = \frac{4(1-\nu_2^2)}{3\pi(1-2\nu_2)} \frac{p_f}{K_2}, \quad (3.7)$$

где ν_2 – коэффициент Пуассона горной породы коллектора;

δ – параметр раскрытия трещин;

δ_{max} – максимальное значение параметра раскрытия трещин ($\delta_{max} < 10^{-2}$);

K_2 – модуль сжатия горной породы коллектора;

Из выражения (3.6) следует, что изменение параметра пористости α_1'' напряженно-деформированной среды и ее проводимости соответственно при приложенном эффективном давлении p_f значительно зависит от вида функции распределения $f(\delta)$, которая может быть описана экспонентой:

$$f(\delta) = \begin{cases} ae^{-\beta\delta} & 0 < \delta < \delta_{max}, \\ 0 & \delta > \delta_{max}, \end{cases} \quad (3.8)$$

где $a = \beta/[1 - \exp(-\beta\delta_{max})]$;

δ – параметр распределения трещин по раскрытию;

Таким образом, исходя из выражений (3.5), (3.6), (3.8) для электропроводности среды получается следующее выражение:

$$\sigma_{p_f} = \frac{\alpha_1''(0)\sigma_1(e^{-\beta\delta(p_f)} - e^{-\beta\delta_{max}})}{(\alpha_1')(1 - e^{-\beta\delta_{max}}) + \alpha_1''(0)(e^{-\beta\delta(p_f)} - e^{-\beta\delta_{max}})}. \quad (3.9)$$

При воздействии периодических упругих колебаний на пористую насыщенную среду эффективное давление будет равно $p_f = p_a \cos \omega t$, где p_a – амплитуда.

Из выражения (3.9) следует, что электропроводность среды есть периодическая функция времени (парная функция), которая может быть разложена в ряд Фурье по косинусам:

$$\sigma_{p_f} = \sigma_{p_a}^{(0)} + \sigma_{p_a}^{(1)} \cos \omega t + \sigma_{p_a}^{(2)} \cos 2\omega t + \dots, \quad (3.10)$$

$$\sigma_{p_a}^{(n)} = \frac{1}{-\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sigma(p_a \cos \pi) \cos n\pi d\pi, \\ n = 0, 1, 2, \dots, \quad \tau = \omega t. \quad (3.11)$$

Соответственно, в условиях воздействия периодических упругих колебаний на пористую насыщенную среду, наряду с усредненной составляющей $\sigma_{pa}^{(0)}$ электропроводности, возникают периодические составляющие с частотами ω , 2ω и так далее, которые и определяют сейсмoeлектрический эффект I. Амплитуды этих составляющих зависят от амплитуды акустического воздействия. Учитывая, что $\alpha_1''(0) \gg \alpha_1'$ выражение (3.9) принимает следующий вид:

$$\sigma_{pf} = \sigma_0 (e^{\beta A_0 p_f} - e^{-\beta \delta_{max}}), \quad (3.12)$$

$$\text{где } \sigma_0 = \frac{\alpha_1''(0)\sigma_1}{\alpha_1'(1-e^{\beta \delta_{max}})}; A = \frac{4(1-v_2^2)}{3\pi(1-v_2)K_2}.$$

Соответственно, из выражений (3.7) и (3.8) получается:

$$\begin{aligned} \sigma_{pa}^{(0)} &= 2\sigma_0 [I_0(\beta A_0 p_a) - \exp(-\beta \delta_{max})], \\ \sigma_{pa}^{(n)} &= (-1)^n 2\sigma_0 I_n(\beta A_0 p_a), \quad n = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (3.13)$$

где $I_m (m = 0, 1, 2 \dots)$ – модифицированные функции Бесселя -го порядка, которые монотонно растут с повышением аргумента. Здесь $I_0(0) = 1$; $I_n(0) = 0$ ($n = 1, 2, 3$). Таким образом, чем больше номер n , тем меньше значение функции I_m для того же p_a . Соответственно, чем выше частота колебаний электропроводности среды, тем меньше их амплитуда.

Величина усредненной составляющей электропроводности пористой насыщенной среды зависит от амплитуды колебаний p_a , от характеристик пласта-коллектора K_2 , v_2 , параметра распределения пор β , параметров пористости $\alpha_1''(0)$, α_1' и от многих других факторов.

Таким образом, величина электропроводности пористой насыщенной среды $\sigma_{pa}^{(0)}$, а также амплитуды $\sigma_{pa}^{(n)}$ могут служить интерпретационными параметрами при изучении и анализе сейсмoeлектрических явлений, возникающих в продуктивных пластах нефтяных и газовых скважин.

Применение рассмотренной выше модели пористой насыщенной среды при воздействии на нее упругим полем ограничено, так как для реальных геологических сред зависимость параметров электропроводности от их напряженно-деформированного состояния носит более сложный характер. Здесь не учитывается множество факторов, влияющих на величину электрической проводимости среды, таких как глинистость, проницаемость вмещающих пород, минерализация, удельное электрическое сопротивление скважинной жидкости и пластовых вод, физико-химические свойства углеводородов, пластовое давление, температура и др.

Исходя из вышеизложенного следует, что изучение и анализ влияния акустического воздействия на параметры электропроводности пористых насыщенных сред является актуальным и перспективным в области геофизических исследований скважин.

3.2.2 Влияние акустического воздействия на фильтрационные свойства горных пород

При наложении акустического поля на исследуемую среду изменяется структура адсорбционного слоя, вызывая одновременно ускорение потока фильтрации флюида [50].

По результатам изучения характера влияния акустического воздействия на фильтрационные свойства горных пород установлен рост коэффициента фильтрации в условиях акустического воздействия и зависимость его величины от параметров упругих колебаний и свойств среды [25, 57]. Характер влияния акустического воздействия на коэффициент фильтрации (проницаемости) коллекторов нефти и газа в диапазоне низких частот аналогичен характеру влияния упругих колебаний на электропроводность пористых насыщенных сред. Пусть по данным экспериментальных исследований или результатам математического моделирования известна зависимость коэффициента фильтрации K_f от давления p_1 . Как правило основополагающей является зависимость коэффициента

фильтрации от величины эффективного давления p_f . Соответственно коэффициент фильтрации k_f является функцией p_f :

$$k_f = k_f(p_f). \quad (3.14)$$

Так как коэффициент фильтрации является функцией периодического (гармонического) давления, то ее можно разложить в ряд Фурье по косинусам аналогично (3.10):

$$k_\Phi(p_a \cos \omega t) = k_\Phi^{(0)}(p_a) + k_\Phi^{(1)}(p_a) \cos \omega t + \dots, \quad (3.15)$$

где $k_\Phi^{(0)}(p_a)$ – зависимость усредненной составляющей коэффициента фильтрации от амплитуды упругих колебаний. При акустическом воздействии происходит изменение скорости фильтрационного потока жидкости:

$$\bar{v}_0 = k_\Phi^{(0)}(p_a) \text{grad } p_1. \quad (3.16)$$

$k_\Phi^{(1)}(p_a) \cos \omega t$ и последующие слагаемые в уравнении (3.16) при $\text{grad } p_1 = \text{const}$ выражают периодические изменения скорости фильтрационного потока пластового флюида во времени, которые могут отмечаться в виде параметрических колебаний исследуемой геологической среды или периодических составляющих потенциалов течения.

3.2.3 Влияние акустического воздействия на естественные электрические поля в скважинах

При акустическом воздействии на пористую насыщенную геологическую среду происходит изменение величин диффузионно-адсорбционных, фильтрационных и окислительно-восстановительных потенциалов. Это приводит к изменению их усредненных составляющих и возникновению составляющих,

изменяющихся периодически во времени. Например, фильтрационную разность потенциалов ΔU_{Φ} можно представить в следующем виде:

$$\Delta U_{\Phi} = A_{\Phi} \Delta p, \quad (3.17)$$

где A_{Φ} – фильтрационная активность горной породы ($A_{\Phi} \sim k_{\Phi}$).

Фильтрационная активность зависит от механических напряжений среды. Если напряжения периодические (гармонические), то A_{Φ} можно разложить в ряд Фурье по косинусам аналогично (3.10). Соответственно и фильтрационная разность потенциалов может быть разложена в ряд Фурье, нулевой член которого отражает изменение усредненной составляющей вследствие акустического воздействия ΔU_0 , а остальные слагаемые описывают периодические изменения разности потенциалов фильтрации.

Акустическое воздействие на исследуемую геологическую среду приводит к изменению коэффициентов диффузии различных составляющих порового флюида, что вызывает изменение величины диффузионно-адсорбционных и окислительно-восстановительных потенциалов.

Также изменения электропроводности и фильтрации при акустическом воздействии, влияют на величину соответствующих электрических токов протекания и возникающих вследствие этого магнитных полей [47].

Таким образом, изменение характера естественных электрических полей в скважинах за счет применения акустического воздействия на исследуемую геологическую среду вызывают большой практический интерес и являются научной базой для разработки и внедрения новых геофизических методов исследования скважин и устройств [71].

3.3 Метод сейсмoeлектрического каротажа

При сейсмoeлектрическом каротаже измеряется параметр электрического поля $U'_{\text{ПС}}$ при наложении акустического поля на исследуемую геологическую среду, включающий в себя составляющие естественных электрических полей и потенциалов акустически вызванной поляризации (сейсмoeлектрических потенциалов). Регистрация диаграмм $U'_{\text{ПС}}$ производится аналогично методу ПС путем измерения значений разности электрических потенциалов между перемещаемым по скважине измерительным электродом М и заземленным на поверхности электродом N при одновременном акустическом воздействии на околоскважинное исследуемое пространство посредством магнитострикционного акустического излучателя И [66] (рис. 3.2).

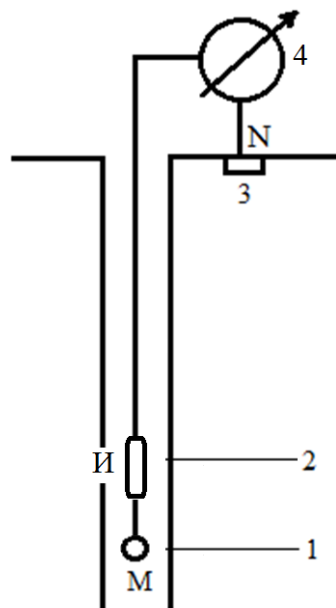


Рис. 3.2. Схема регистрации диаграмм сейсмoeлектрического каротажа.

1 – измерительный электрод М; 2 – магнитострикционный акустический излучатель; 3 – электрод N, заземленный на поверхности; 4 – наземный цифровой регистратор [73]

Диаграмма сейсмoeлектрического каротажа [73] отображает изменение значения скважинного потенциала у измерительного электрода М с изменением глубины при одновременном влиянии акустического поля.

К электроду М, соответственно, относится точка записи измеряемого параметра.

При каротажных исследованиях данным методом сначала измеряется разность потенциалов физического параметра исследуемой среды без акустического воздействия (фоновый замер).

Затем производится запись диаграмм при акустическом воздействии, которое повышает контраст аномалий кривой $U'_{\text{ПС}}$. Акустическое воздействие производится непрерывно на всем протяжении измерения ПС. Интерпретация результатов сейсмoeлектрического каротажа производится аналогично методу ПС, при этом диаграммы фонового замера сопоставляют с диаграммами, полученными при акустическом воздействии, извлекая из их сравнения дополнительную информацию.

3.4. Применение сейсмoeлектрического каротажа в открытом стволе

В процессе строительства скважин по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа в открытом стволе производится детальное литологическое расчленение исследуемого геологического разреза (определение мощности пластов и их границ).

Литологическое расчленение геологического разреза скважины осуществляется по изменению значений разности электрических потенциалов горных пород при одновременном акустическом воздействии на околоскважинное пространство.

Каротажные исследования проводятся следующим образом.

Сначала осуществляется фоновый замер разности электрических потенциалов без наложения акустического поля на зону исследования для предварительной оценки физических свойств исследуемых горных пород.

Далее производится измерение разности электрических потенциалов горных пород с применением акустического воздействия на околоскважинное пространство для сопоставления с результатами фоновой записи.

На рис. 3.3 представлены диаграммы разности электрических потенциалов горных пород, полученные без наложения акустического поля ЭП-1 (фоновый замер), диаграммы разности электрических потенциалов горных пород, полученные при применении акустического воздействия на исследуемое околоскважинное пространство ЭП-2.

Литологическое расчленение геологического разреза скважины производится на качественном уровне путем сравнения и анализа двух полученных каротажных диаграмм.

Мощность пластов определяется по правилу полумаксимума или полуминимума. Глины и глинистые породы отмечаются максимальными, а песчаники и известняки минимальными значениями разности электрических потенциалов, при условии, если величина минерализации скважинной жидкости меньше минерализации пластовых вод [56, 71].

Диаграмма ЭП-2 демонстрирует эффективность применения акустического воздействия, которое повышает контраст аномалий измеряемого сигнала относительно фонового замера и позволяет с более высокой точностью определять физические свойства горных пород, слагающих исследуемый геологический разрез. На диаграмме ЭП-2 более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения на участках литологических неоднородностей относительно фонового замера [71].

Глинистые породы (аргиллиты) отмечаются максимальными значениями ПС, интервалы проницаемых нефтенасыщенных песчаников отмечаются минимальными значениями ПС, известняки также отмечаются минимальными отклонениями.

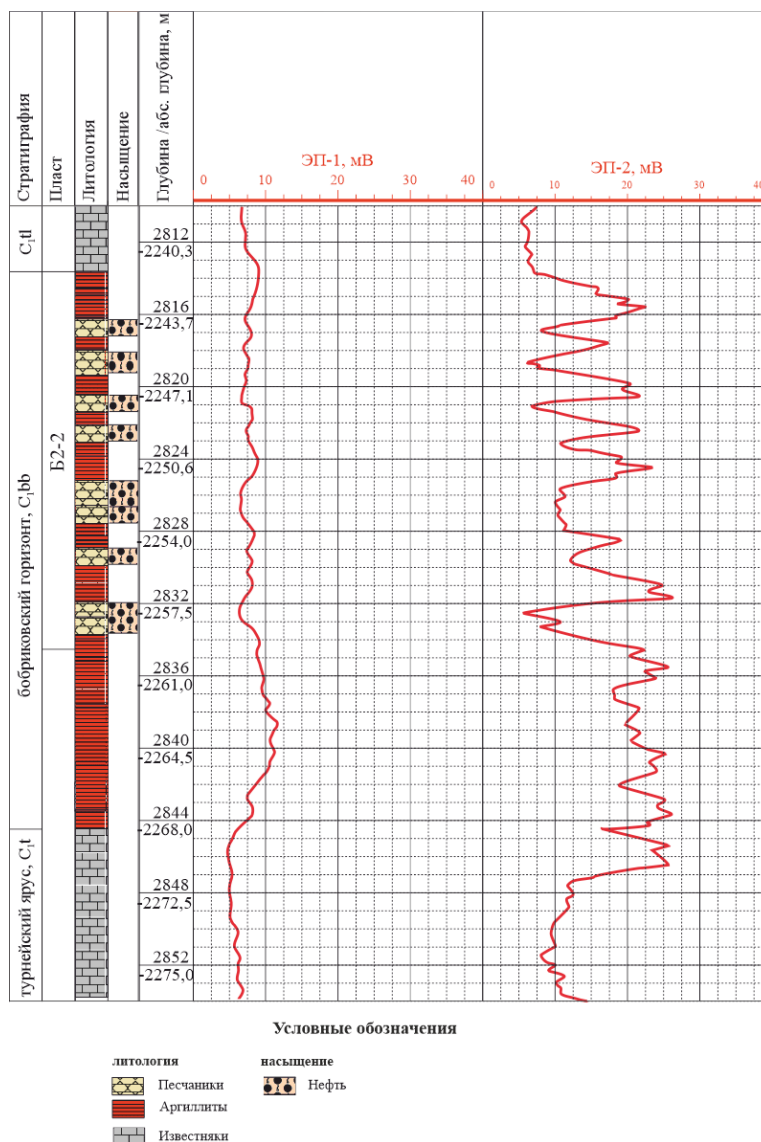


Рис. 3.3. Пример литологического расчленения геологического разреза скважины по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа.

ЭП-1 – фондовый замер;

ЭП-2 – запись при акустическом воздействии

Дополнительные приращения сигнала на диаграмме ЭП-2 связаны с литологическими неоднородностями и более детально отображают геологию разреза, выделяя дополнительные пропластки, отсутствующие на диаграмме фонового замера.

Увеличение контраста аномалий измеряемого параметра связано с возникновением дополнительных электрокинетических потенциалов.

При акустическом воздействии на исследуемую пористую насыщенную среду в ней возникает сейсмoeлектрический эффект I рода I, приводящий к увеличению её электропроводности, также в среде возникает сейсмoeлектрический эффект II рода E, вызывающий вторичное электрическое поле. При этом на параметры вторичного электрического поля оказывает влияние дополнительное акустическое поле, а также вторичное электрическое поле влияет на упругое. За счет суммарного проявления этих явлений происходит возникновение дополнительных электрокинетических потенциалов.

Сейсмoeлектрический каротаж в открытом стволе может быть также эффективно применен для определения минерализации пластовых вод, пористости и глинистости коллекторов, пластовых давлений.

Применение сейсмoeлектрического каротажа показывает высокую эффективность при литологическом расчленении геологических разрезов скважин в открытом стволе в процессе их строительства.

Акустическое воздействие на исследуемое околоскважинное пространство при измерении значений разности электрических потенциалов горных пород повышает точность и детальность геофизических исследований при литологическом расчленении геологических разрезов скважин.

3.5. Применение сейсмoeлектрического каротажа в обсаженных скважинах

В обсаженных скважинах по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа определяются границы интервалов перфорации и качество прострелочно-взрывных работ [73].

Определение интервала перфорации и оценка степени гидродинамической сообщаемости продуктивного пласта с внутренней полостью обсадной колонны осуществляется по изменению значений разности электрических потенциалов

колонны при одновременном акустическом воздействии [38, 71] на объект перфорации после прострелочно-взрывных работ.

Определение границ интервала и качество перфорации осуществляется следующим образом.

После проведения прострелочно-взрывных работ сначала осуществляется фоновый замер разности электрических потенциалов обсадной колонны без наложения акустического поля для предварительной оценки степени гидродинамической сообщаемости полости колонны с заколонным пространством и пластом [73].

Далее производится измерение разности электрических потенциалов обсадной колонны с применением акустического воздействия на исследуемый интервал перфорации для сопоставления с результатами фоновой записи [39, 40, 73].

На рис. 3.4 представлены диаграммы разности электрических потенциалов обсадной эксплуатационной колонны, полученные без наложения акустического поля ЭП-1 (фоновый замер), диаграммы разности электрических потенциалов обсадной колонны, полученные при применении акустического воздействия на исследуемый интервал перфорации ЭП-2.

Определение интервала и качества прострела обсадной колонны производится на качественном уровне путем сравнения и анализа двух полученных каротажных диаграмм.

Фоновая запись параметра разности электрических потенциалов обсадной колонны, полученная без наложения акустического поля ЭП-1 отражает границы интервала перфорации, определяемые по правилу полумаксимума амплитуды аномалии измеряемого сигнала, участки прострела колонны в исследуемом интервале перфорации отмечаются незначительными положительными отклонениями.

Диаграмма ЭП-2 демонстрирует эффективность применения акустического воздействия, в результате которого наблюдается повышение контраста аномалий относительно фонового замера. Акустическое воздействие на исследуемый объект

позволяет с более высокой точностью и достоверностью судить о степени гидродинамической сообщаемости пласта с внутренней полостью обсадной колонны. На диаграмме, полученной при акустическом воздействии, более детально отбиваются границы интервала перфорации, просматриваются дополнительные приращения в местах прострела относительно фонового замера [73].

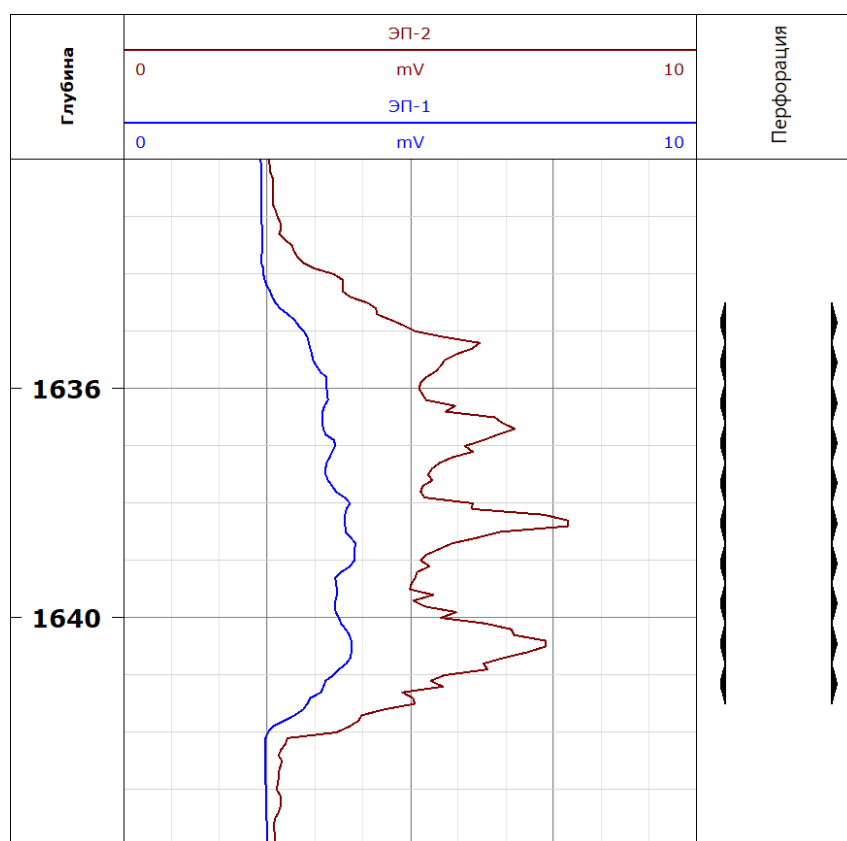


Рис. 3.4. Пример определения интервала перфорации и качества прострела обсадной колонны по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа.

ЭП-1 – фоновый замер;

ЭП-2 – запись при акустическом воздействии

Приращения амплитуды аномалий на диаграмме разности электрических потенциалов связаны с возникновением дополнительных электрических потенциалов за счет акустического воздействия на исследуемую зону перфорации [73].

Во-первых, за счет акустического воздействия на исследуемую среду в ней возникает сейсмoeлектрический эффект I рода I, приводящий к увеличению её электропроводности, во-вторых в исследуемой среде возникает сейсмoeлектрический эффект II рода E, вызывающий вторичное электрическое поле. Также на параметры вторичного электрического поля оказывает влияние дополнительное акустическое поле, при этом вторичное электрическое поле влияет на упругое. За счет суммарного проявления этих явлений происходит возникновение дополнительных электрокинетических потенциалов.

Сейсмoeлектрический каротаж в обсаженных скважинах может быть также эффективно применен для исследования интервалов перфорации слабопроницаемых продуктивных пластов и пластов, насыщенных высоковязкими углеводородами, а также при определении интервалов нарушения целостности обсадных колонн в местах притока пластового флюида или поглощения скважинной жидкости [73].

Применение сейсмoeлектрического каротажа показывает высокую эффективность при определении границ интервалов и качества перфорации обсадных эксплуатационных колонн в обсаженных скважинах [73].

Применение акустического воздействия на исследуемый интервал перфорации при измерении значений разности электрических потенциалов эксплуатационной колонны повышает точность и детальность геофизических исследований при оценке гидродинамической сообщаемости пласта с внутренней полостью обсадной колонны.

Акустическое воздействие на объект исследования повышает информативность геофизических исследований и позволяет с более высокой объективностью определять качество прострелочно-взрывных работ в нефтяных и газовых скважинах [73].

Выводы по главе 3

- Акустическое воздействие на горные породы оказывает влияние на их физико-химические свойства и происходящие в них электромагнитные процессы, а именно на естественные электрические поля в скважинах, электропроводность исследуемых пористых сред, а также на фильтрационные свойства горных пород.

- Сейсмoeлектрический каротаж показывает высокую эффективность применения в открытом стволе скважин в процессе их строительства, а также в скважинах эксплуатационного фонда при прострелочно-взрывных работах и исследовании их технического состояния.

- В открытом стволе по результатам качественной интерпретации диаграмм сейсмoeлектрического каротажа производится литологическое расчленение исследуемого геологического разреза (определение мощности пластов и их границ), по результатам количественной интерпретации определяются параметры пористости, глинистости коллекторов, минерализации и удельного электрического сопротивления пластовых вод, а также пластовых давлений;

- В обсаженных скважинах по результатам интерпретации диаграмм сейсмoeлектрического каротажа определяются границы интервалов и качества перфорации их эксплуатационных колонн, а также интервалы нарушения целостности обсадных колонн.

- Применение и внедрение сейсмoeлектрического каротажа перспективно для дальнейшего изучения сейсмoeлектрических явлений в нефтяных и газовых скважинах; исследования связи сейсмoeлектрического эффекта с литологией пород и наличием углеводородов в коллекторах; разработки оптимальных методик сейсмoeлектрических наблюдений, а также для решения многочисленных задач промысловой геологии и геофизики, таких как детальное литолого-стратиграфическое расчленение исследуемого геологического разреза,

определение коллекторских свойств и характера насыщения пластов, оценка технического состояния скважин и параметров их эксплуатации.

Таким образом, акустическое воздействие на исследуемое околоскважинное пространство повышает амплитуду и контраст аномалий потенциалов собственной поляризации, увеличивая информативность исследований, что обосновывает первое защищаемое положение.

4 МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ОРЕНБУРГСКОГО РЕГИОНА

4.1 Аппаратура для скважинных геофизических исследований

В рамках настоящей работы для реализации предлагаемых способов и устройств разработан аппаратурно-методический комплекс мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа [71].

Актуальность разработки и внедрения комплекса мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа подтверждена его практическим применением на ряде нефтяных месторождений Оренбургской области при решении ряда геологических и технических задач [71].

Под мегаэлектродным сейсмоэлектрическим каротажом понимается метод потенциалов собственной поляризации при одновременном акустическом воздействии на околоскважинное пространство с применением в качестве первичного измерительного преобразователя в глубинном приборе мегаэлектродного блока для повышения разрешающей способности измерений [58].

Комплекс позволяет производить измерение параметра разности электрических потенциалов в условиях акустического воздействия на исследуемое скважинное пространство и без него [71].

Аппаратура предназначена для геофизических исследований скважин в открытом стволе и в обсаженных скважинах диаметром от 110 до 400 мм, заполненных жидкостью, с температурой до 150° С и гидростатическим давлением до 100 МПа со скоростью каротажа до 2500 м/ч.

Аппаратура рассчитана на работу с каротажными станциями, оборудованными лебедкой с грузонесущим геофизическим кабелем [11] и предназначена для измерения величины разности электрических потенциалов по

стволу скважины при одновременном акустическом воздействии на исследуемое скважинное пространство [71].

Схема измерительной установки мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа представлена на рис. 4.1. Она включает в себя скважинный прибор 1, состоящий из модуля акустического излучателя 2, мегаэлектродного блока 3, центрального измерительного электрода М 4, электрода N, заземленного на поверхности 5, и наземный цифровой регистратор 6 [66, 71].

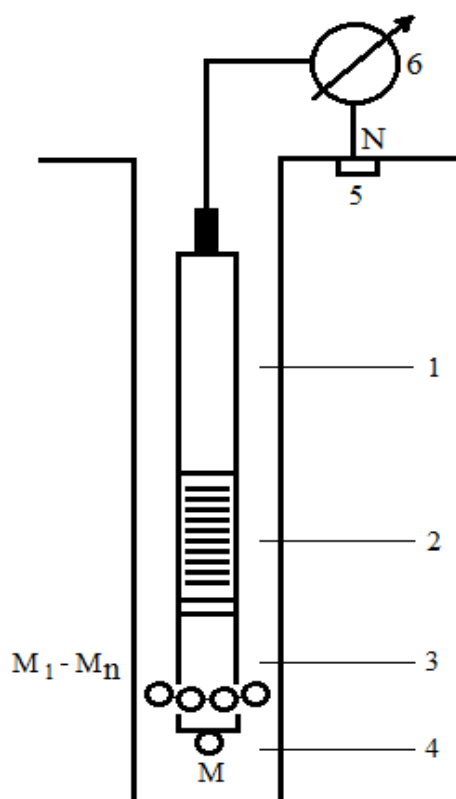


Рис. 4.1. Схема измерительной установки мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа

- 1 - скважинный прибор,
- 2 – модуль акустического излучателя,
- 3 – мегаэлектродный блок (M_1-M_n - группа измерительных электродов, расположенных на прижимных устройствах),
- 4 – центральный измерительный электрод М,

- 5 - электрод, заземленный на поверхности,
6 – наземный цифровой регистратор.

Излучатель скважинного прибора служит для создания акустического воздействия на околоскважинное пространство [67]. Он обеспечивает возбуждение упругих волн: продольных (Р), поперечных (S), волн Стоунли (St) и состоит из трех магнитострикционных сердечников, на которых намотаны катушки. Он имеет три диапазона частот: в режиме ВЧ3 – 24 кГц, в режимах: ВЧ1 – 6 кГц, ВЧ2 – 12 кГц. Излучатель резонансный, при возбуждении его мощным электрическим импульсом, он излучает колебания определенной частоты, которая зависит от размеров сердечника и количества витков катушки. В режиме ВЧ1 работают три катушки (6 кГц), в режиме ВЧ2 - две, соединенные последовательно (12 кГц), в режиме ВЧ3 работает одна катушка (24 кГц) [69].

На рис. 4.2 представлен волновой пакет акустического воздействия излучателя скважинного прибора. Длительность волнового пакета составляет 5000 мкс. (рис. 4.2).

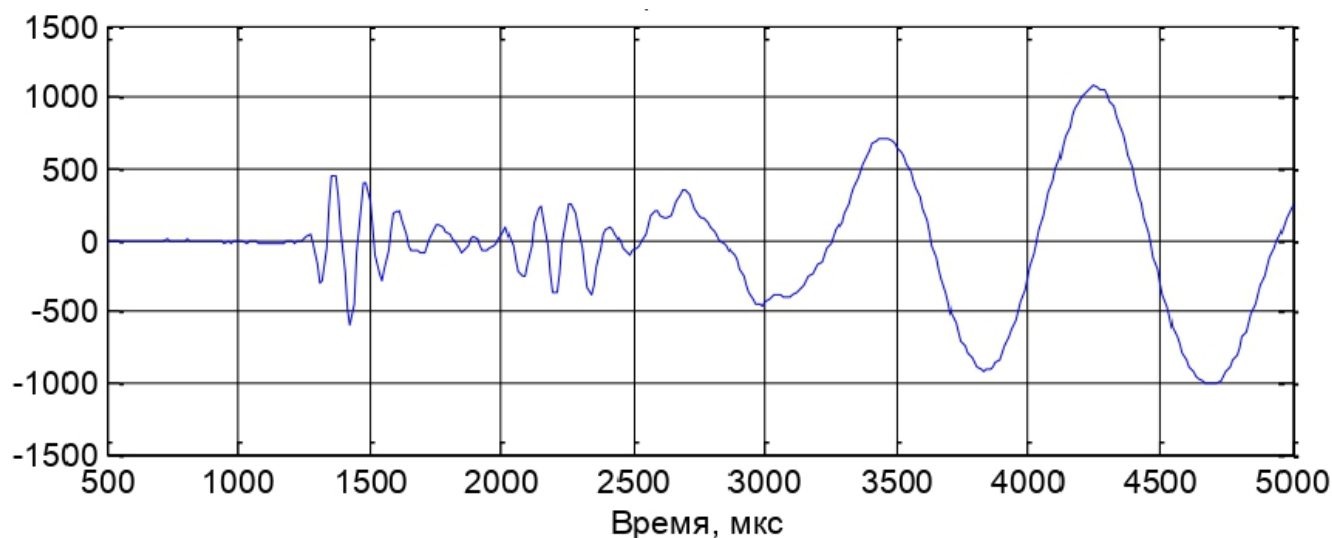


Рис. 4.2. Волновой пакет акустического воздействия магнитострикционного излучателя скважинного прибора.

Интервальное время распространения упругих волн составляет 180 мкс/м, коэффициент затухания - 4 дБ/м.

Акустическое воздействие проводится непрерывно на всем протяжении регистрации ПС.

Чувствительными элементами глубинного прибора являются центральный измерительный электрод М и мегаэлектродный блок, состоящий из группы измерительных неполяризующихся электродов M_1-M_{n+1} , расположенных радиально оси прибора на прижимном механизме [71].

На рис. 4.3 представлена принципиальная схема мегаэлектродного блока.

Мегаэлектродный блок представляет из себя модуль для измерения скважинных потенциалов.

Конструктивной основой модуля является стержень 1, на котором расположены две подвижные обоймы 3, служащие для фиксации центраторов 9. Блок имеет 24 центратора, на каждом из которых соответственно расположен измерительный электрод 8. Помимо основной функции центраторы выполняют роль прижимного устройства. Центральный измерительный электрод 7 располагается в наконечнике модуля 5. Головка 1 с помощью гайки 6 крепится к нижней части скважинного прибора посредством герметичного резьбового соединения. Кабельный канал 10 служит для ввода токоведущих жил с каждого измерительного электрода 8. После кабельного ввода внутри модуля токоведущие жилы от 24 электродов уходят в электронный блок. Аналоговые сигналы с каждого измерительного электрода поступают на соответствующие входы программируемого логического контроллера, который преобразовывает запись по всем электродам мегаэлектродного блока к одному потенциалу. Токоведущая жила центрального измерительного электрода также уходит в электронный блок скважинного прибора. Аналоговый сигнал с центрального измерительного электрода также поступает на соответствующий вход программируемого логического контроллера. После преобразования аналогового сигнала в цифровой он поступает на каротажный регистратор.

Группа измерительных электродов увеличивает степень контакта с исследуемой средой по окружности скважины.

Конструкция мегаэлектродного блока дает возможность регистрации геофизического параметра непосредственно на стенках скважины и повышает информативность исследований [74].

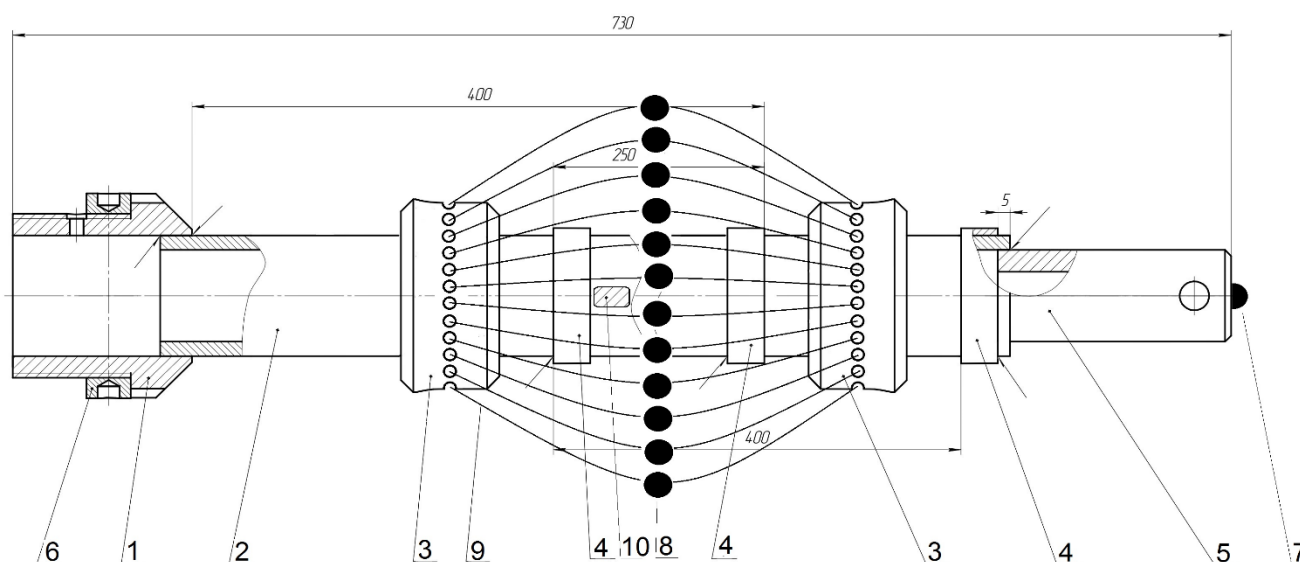


Рис. 4.3. Принципиальная схема мегаэлектродного блока

- 1 – головка,
- 2 – стержень,
- 3 – обойма,
- 4 – кольца,
- 5 – наконечник,
- 6 – гайка,
- 7 – центральный измерительный электрод M ,
- 8 - группа измерительных электродов M_n-M_{n+1} , 24 шт.,
- 9 – центраторы, 24 шт.,
- 10 – кабельный канал.

Наземный цифровой регистратор предназначен для управления скважинным прибором, визуализации и записи каротажных диаграмм, для задания режимов

частоты акустического воздействия излучателя. Выбор частоты производится с учетом особенностей влияния исследуемой геологической среды в зависимости от поставленных задач каротажных исследований.

Аппаратура мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа создана на базе стандартного используемого отечественного скважинного и наземного геофизического оборудования, поэтому является доступной и невысокой по себестоимости [71].

Все токоведущие части скважинного прибора надежно экранированы во избежание помех [73].

На рис. 4.4 представлена принципиальная схема скважинного прибора мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа.

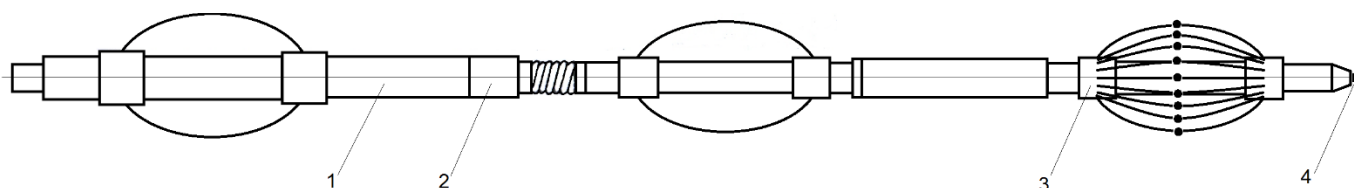


Рис. 4.4. Принципиальная схема скважинного прибора мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа

- 1 – электронный блок;
- 2 – блок излучателя;
- 3 – мегаэлектродный блок (M_1-M_{n+1} - группа измерительных электродов, расположенных на прижимном механизме);
- 4 – центральный измерительный электрод M

Электронный блок 1 служит для коммутации сигнала и связи с ЭВМ [74].

В качестве наземного цифрового регистратора могут быть применены серийно выпускаемые регистраторы отечественного производства для

геофизических исследований скважин такие как: «Спектр», «Гектор», «Кедр», «Каскад», «Карат» и др. Цифровой регистратор позволяет также осуществлять диагностику и настройку скважинного прибора.

В рамках настоящей работы проведены каротажные исследования в скважинах ряда нефтяных месторождений Оренбургской области.

Измерения проводились на базе отечественной геофизической станции посредством автоматического цифрового регистратора «Карат».

4.1.1 Технические данные аппаратурно-методического комплекса сейсмоэлектрического каротажа

Средняя частота упругих колебаний, создаваемых излучателем акустического зонда аппаратуры, измеренная в металлической трубе по первым трем полупериодам волнового пакета – (5 ± 2) кГц при работе в режиме ВЧ1, (12 ± 3) кГц при работе в режиме ВЧ2 и (22 ± 5) кГц при работе в режиме ВЧ3.

Мощность, потребляемая скважинным прибором, не более 15 Ватт.

Диапазон рабочих температур окружающей среды для скважинного прибора от минус 10 до плюс 150° С, верхнее значение рабочего гидростатического давления – 100 МПа (подгруппа КС4-4 ГОСТ 26116-84).

Диапазон рабочих температур для регистратора «Карат» от 10 до 45° С, относительно влажности воздуха – не более 90 % при 30° С (группа КС1 ГОСТ 26116-84).

Механическое воздействия для скважинного прибора: вибрация в диапазоне частот от 10 до 70 Гц при ускорении до 35 м/с², ударные нагрузки с максимальным ускорением до 150 м/с² (подгруппа МС2-3 ГОСТ 26116-84).

Механические воздействия для блока управления и трансформатора: вибрация в диапазоне частот от 10 до 60 Гц при ускорении до 10 м/с²; ударные нагрузки с максимальным ускорением до 50 м/с² (группа МС-1 ГОСТ 26116-84).

Время установления рабочего режима аппаратуры не более 15 мин с момента ее включения.

Аппаратура обеспечивает работу в непрерывном режиме. Продолжительность непрерывной работы аппаратуры в нормальных условиях по ГОСТ 15150-69 не более 8 ч, при верхнем значении рабочей температуры 1ч.

Номинальное значение средней наработки на отказ аппаратуры не менее 80 ч.

Среднее время восстановления работоспособности состояния должно быть:

- для скважинного прибора не более 8 ч;
- для регистратора «Карат» не более 1 ч.

4.1.2 Каротажный регистрирующий комплекс «Карат»

Управление ядром информационно-измерительной системы, обеспечивающим функционирование всех ее элементов, является каротажный регистрирующий комплекс (регистратор) «Карат», разработанный на основе ЭВМ в промышленном исполнении.

Регистратор рассчитан на проведение исследований скважин по минимальной автономной конфигурации с любым типом каротажных приборов. Представляет собой программно-управляемый аппаратный комплекс со встроенными источниками питания скважинных приборов, позволяющий автоматизировать процесс измерений, повысить достоверность получаемой информации и сократить время производства работ на скважине за счет применения комплексных и комбинированных скважинных приборов. Связь со скважинными приборами осуществляется через трехжильный бронированный грузонесущий геофизический кабель длиной до 7000 м, которым оснащен каротажный подъемник. Результаты измерений предоставляются заказчику в виде файлов международных LIS и LAS форматов и твердых копий каротажных диаграмм в стандарте API.

Регистратор разработан для реализации компьютерной технологии ГИС в скважинах, начиная с этапа проведения метрологических работ и заканчивая первичной обработкой скважинных материалов для выдачи оперативных заключений.

Регистратор «Карат» позволяет решать следующие задачи:

- управлять скважинными приборами;
- тестировать скважинные приборы и наземное оборудование;
- производить сбор каротажных данных от скважинных приборов с первичной обработкой и последующей визуализацией информации в режиме реального времени;
- проводить запись первичных данных на жесткий диск или флэш-накопитель в формате LIS-79;
- формировать твердую копию каротажных материалов в стандарте API и других форматах представления геофизических данных;
- выполнять полевую обработку каротажных материалов и их редактирование;
- передавать данные заказчику в формате LIS-79 или LAS (на жестких дисках или флэш-накопителях).

В состав регистратора «Карат» входят: системный блок; блок согласования; панель контроля каротажа; блок фильтров и коммутации; принтер; блок силовой; блок программно-управляемых источников питания; агрегат бесперебойного питания.

Системный блок изготавливается в промышленном корпусе на основе компьютера IBM PC/AT типа Pentium 133-166. Блок комплектуется платой ЛА-ADSP, содержащей 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой сигнальный процессор ADS-2115 и предназначенной для сбора информации от скважинных приборов. Демодуляция информационных сигналов осуществляется с помощью цифрового сигнального процессора ADS-2115.

Блок согласования предназначен для нормализации сигналов, приходящих со скважинной аппаратуры на вход платы ЛА-ADSP. Этот блок также обеспечивает работу с аналоговой аппаратурой через соответствующие наземные панели и позволяет одновременно регистрировать до восьми аналоговых сигналов.

Панель контроля каротажа обеспечивает прием сигналов от технологических датчиков (сельсина или импульсного датчика меток глубины, датчика магнитных

меток и тензодатчика) для регистрации и индикации глубины, скорости и натяжения кабеля.

Блок фильтров и коммутации обеспечивает подключение к жилам кабеля источников питания скважинных приборов, управление приводами, коммутацию фильтров, управляющих и сигнальных цепей, необходимых для работы различных типов скважинных приборов без использования наземных панелей.

Блок силовой предназначен для питания приводов скважинных приборов и сельсин-датчика.

Блок программно-управляемых источников питания содержит источник переменного тока 50 Гц и предназначен для питания скважинных приборов, управления приводами и режимами работы скважинных приборов.

Комплекс программ регистрации и первичной обработки данных тестирует наземную и скважинную аппаратуру, управляет работой приборов, поддерживает калибровку и проведение измерений с записью данных на жесткий диск в формате LIS-79. Опрос скважинных приборов может производиться с синхронизацией по глубине или по времени. Программы полевой обработки позволяют в течении 1-2 часов после окончания каротажа непосредственно на скважине:

- выполнять редактирование каротажных данных;
- проводить первичную обработку каротажных данных с учетом информации о базовых калибровках приборов и вводом необходимых поправок на условия проведения каротажа;
- сформировывать твердую копию первичных каротажных данных и/или результатов первичной обработки.

Конструкция регистратора предполагает различные варианты компоновки при изготовлении в зависимости от специфики условий работы регистратора и поставленных задач каротажных исследований.

Прохождение сигналов в режиме работы цифрового регистратора представлено на рис. 4.5. Последовательный код со скважинного прибора проходит через блок управления скважинным прибором (БУСП), где происходит отделение полезного сигнала от питающего напряжения, и поступает на плату модема,

установленную непосредственно в слоте ЭВМ. На плате последовательный код преобразуется в параллельный, откуда происходит его считывание по запросу от модема. При работе со связкой акустического каротажа во входных цепях БУСП выделяется сигнал скважинного прибора и через устройство связи с объектом (УСО) подается на быстродействующий АЦП, установленный также в слоте ЭВМ.

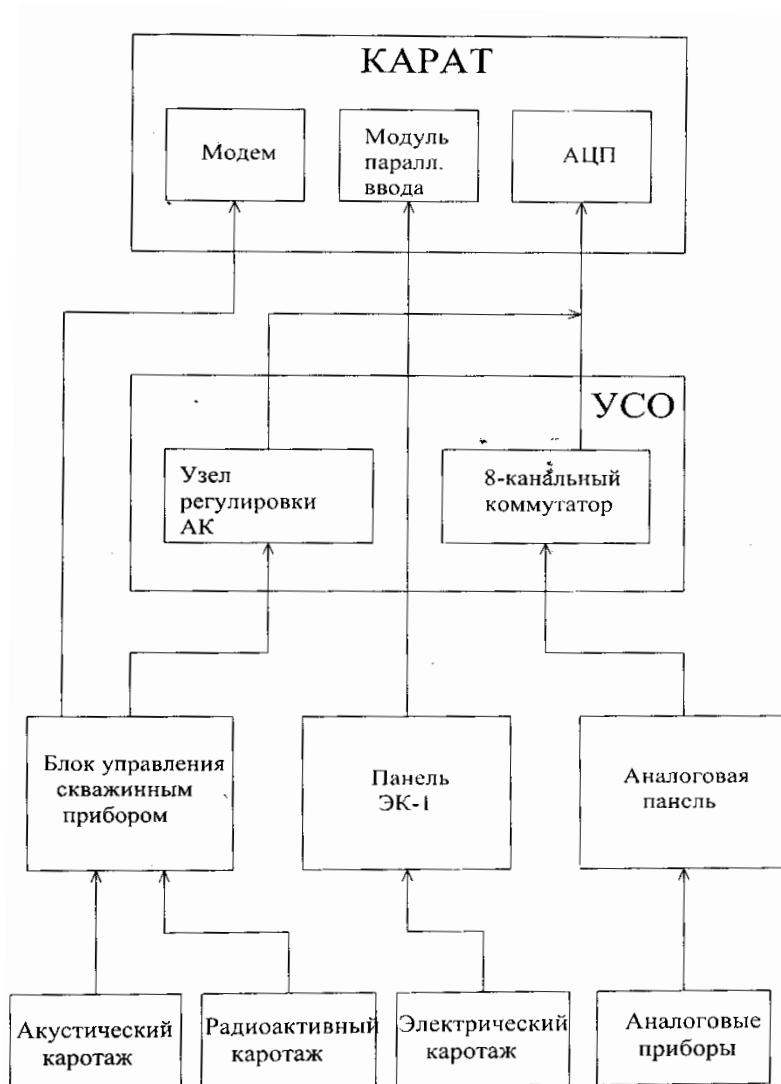


Рис. 4.5. Функциональная схема прохождения сигналов в режиме работы цифрового регистратора

Для расширения функциональных и технологических возможностей регистратора существует ряд программ и устройств, обеспечивающих работу с парком аналоговых и цифровых приборов.

Приборы с цифровым выходом (ЭК-1) позволяют проводить исследования методом сейсмoeлектрического каротажа. При работе с прибором сейсмoeлектрического каротажа используется стандартная панель ЭК-1.

Последовательный код поступает с прибора в панель, где происходит его отделение от напряжения питания скважинного прибора и силовых цепей управления электромеханических узлов, поступает на плату согласования панели.

На плате последовательный код преобразуется в параллельный и по линии связи поступает на плату параллельного ввода информации, установленную в слоте ЭВМ.

Сигналы с аналоговых приборов обрабатываются соответствующей стандартной панелью, после чего выходное напряжение панели поступает на восьмиканальный коммутатор блока устройства связи с объектом. С коммутатора блока, устройства связи с объектом, по линии связи напряжение с панели поступает на модуль АЦП, установленный в слоте ЭВМ, где и происходит его преобразование в цифровой вид.

Блок согласования предназначен для нормализации сигналов скважинных приборов, поступающих из блока фильтров и коммутации. Из блока согласования сигналы поступают на вход платы сигнального процессора, образуя универсальный измерительный канал. Блок согласования состоит из набора фильтров универсального измерительного канала, формирователей синхроимпульсов, входных устройств каналов и встроенного источника питания.

Формирователь представляет собой полосовые активные фильтры с полосой пропускания 1 – 40 кГц и предназначен для передачи сигналов большинства аналоговых скважинных приборов. Устройство обработки синхроимпульсов предназначено для выделения синхроимпульсов скважинных приборов и формирования сигнала запуска аналого-цифрового преобразователя в определенные моменты времени.

Для регистрации сигналов от каротажных панелей и пультов используются формирователи медленных аналоговых сигналов, представляющие собой фильтры нижних частот с частотой среза 30 Гц.

Для питания блока согласования применен преобразователь из +12 В, на выходе которого формируются питающее напряжение +15 В, –15 В и +5 В.

4.1.3 SCADA – система, применяемая в каротажной лаборатории

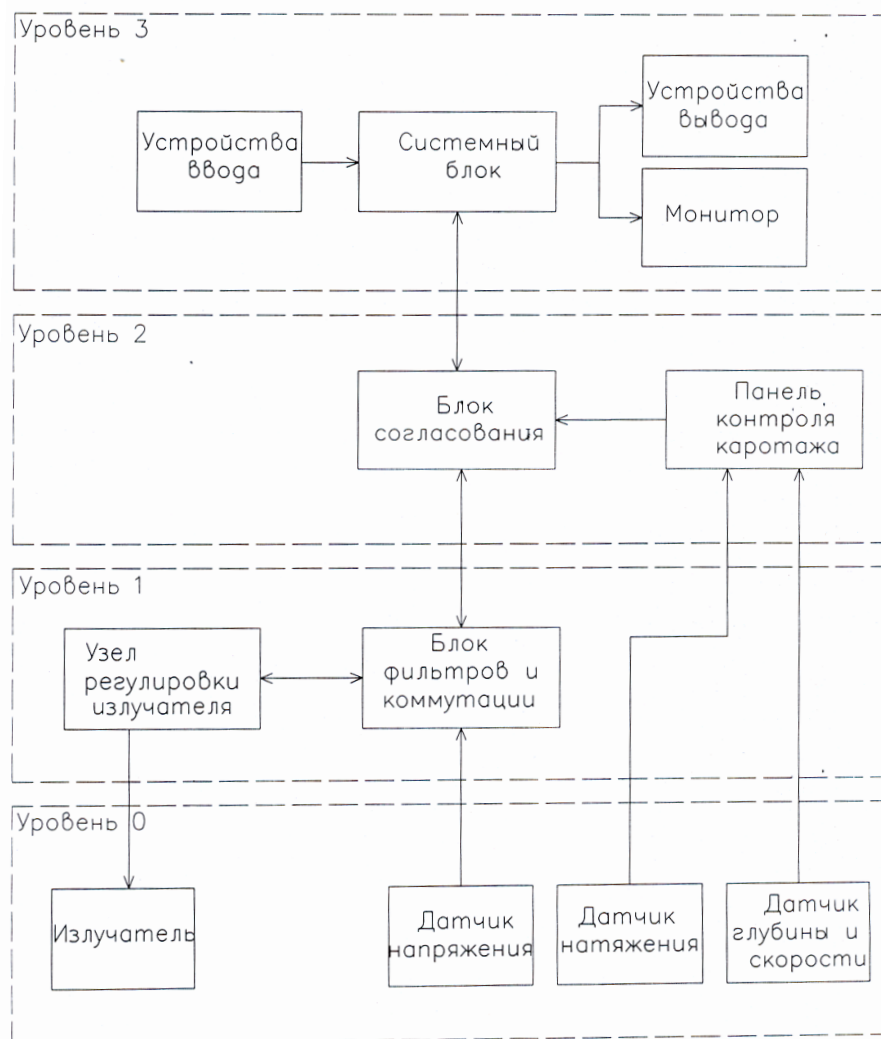


Рис. 4.6. Структурная схема SCADA-системы, применяемой при сейсмoeлектрическом каротаже

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – система оперативного диспетчерского управления, контроля и сбора данных) система, применяемая в

аппаратурно-методическом комплексе сейсмоэлектрического каротажа, включает в себя следующие иерархические уровни:

0 уровень – датчики и исполнительные механизмы ИМ (датчики: параметра разности электрических потенциалов (напряжения), глубины, скорости, натяжения. ИМ: излучатель);

1 уровень – устройства связи с объектом (блок фильтров и коммутации);

2 уровень – регистратор «Карат» (блок согласования);

3 уровень – автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (ЭВМ и панель контроля каротажа) - цифровой пульт управления (рис. 4.6).

4.2. Результаты сейсмоэлектрических каротажных исследований на нефтяных месторождениях Оренбургской области

4.2.1 Каротажные исследования в открытом стволе

Детальное изучение терригенно-карбонатных продуктивных комплексов в нефтяных и газовых скважинах является актуальной задачей промышленной геологии и геофизики [20].

Геофизические исследования скважин в открытом стволе проведены на нефтяных месторождениях Оренбургской области с целью изучения и анализа диаграмм сейсмоэлектрического каротажа [70] для решения задачи литологического расчленения геологических разрезов и детального выделения в них продуктивных интервалов за счет получения дополнительной информации путем применения акустического воздействия на околоскважинное пространство и мегаэлектродного блока в качестве чувствительного элемента в глубинном приборе [67].

Применение метода сейсмоэлектрического каротажа для литологического расчленения разрезов скважин, детального выделения в них нефтегазовых коллекторов является более эффективным по сравнению с применением метода потенциалов собственной поляризации [67, 71].

Исследования в терригенном разрезе

Первое исследование с применением аппаратурно-методического комплекса сейсмоэлектрического каротажа в рамках настоящей работы выполнено в открытом стволе на скважине нефтяного месторождения Оренбургской области в интервале 2770-2830 м в терригенных отложениях [67, 74].

При каротажных исследованиях применена схема измерительной установки, изображенная на рис. 3.2, в которой мегаэлектродный блок не предусмотрен.

Объектом геофизических исследований послужил терригенный разрез скважины, где продуктивными отложениями являются нефтенасыщенные песчаники бобриковского горизонта.

Целью исследования явилось повышение информативности метода литологического расчленения геологического разреза скважины по изменению значений разности электрических потенциалов исследуемых горных пород путем применения акустического воздействия на зону исследования [38, 71].

Скважинные измерения проводились следующим образом. Сначала выполнялся фоновый замер параметра разности электрических потенциалов по стволу скважины для предварительной оценки физических свойств исследуемых горных пород [71] без акустического воздействия на зону исследования.

Затем выполнялась регистрация разности электрических потенциалов горных пород при одновременном акустическом воздействии на околоскважинное пространство относительно фонового замера [71].

Частота акустического воздействия была выбрана опытным путем с учетом влияния исследуемой среды и составила 24 кГц. При данной частоте была достигнута наибольшая чувствительность аппаратуры [71].

На рис. 4.7 приведены результаты литологического расчленения геологического разреза скважины по интенсивности разности электрических потенциалов горных пород.

Литологическое расчленение геологического разреза производится на качественном уровне путем сравнительного анализа двух полученных диаграмм.

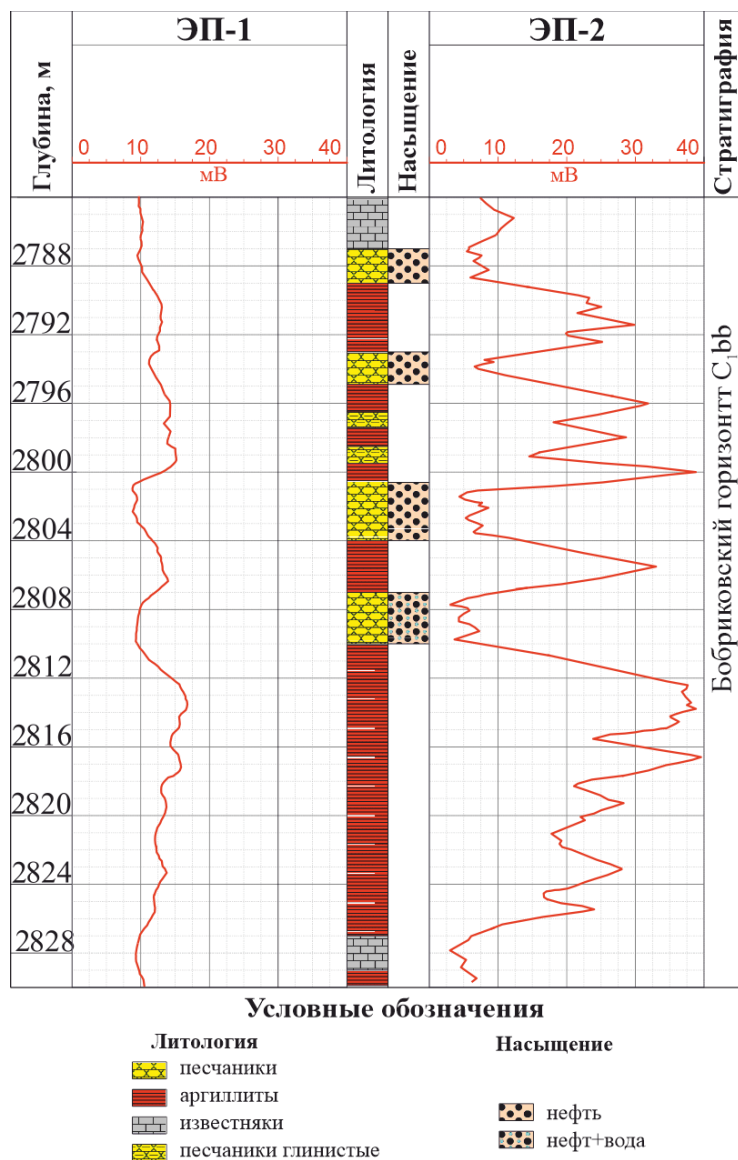


Рис. 4.7. Результаты литологического расчленения терригенного геологического разреза скважины по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа.

ЭП-1 – фоновый замер;

ЭП-2 – запись при акустическом воздействии

Мощность пластов определяется по правилу полумаксимума или полуминимума. Глинистые породы (аргиллиты) отмечаются максимальными значениями ПС, интервалы проницаемых нефтенасыщенных песчаников

отмечаются минимальными значениями ПС, известняки также отмечаются минимальными отклонениями.

По фоновой диаграмме разности электрических потенциалов горных пород ЭП-1 дается предварительная оценка их физических свойств.

Путем сравнения фоновой записи ПС и записи ПС, полученной при акустическом воздействии выявлено проявление сейсмоэлектрического эффекта в виде увеличения модуля регистрируемого сигнала, записанного при акустическом воздействии по сравнению с величиной модуля сигнала фонового замера.

Диаграмма ЭП-2 подтверждает эффективность применения акустического воздействия при каротажных исследованиях, которое повышает контраст аномалий измеряемого сигнала относительно фонового замера и позволяет с более высокой точностью определять параметры физических свойств горных пород, составляющих исследуемый геологический разрез. На диаграмме ЭП-2 более детально выделяются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения на участках литологических неоднородностей относительно фонового замера [71]. По диаграмме ЭП-2 с более высокой точностью производится литологическое расчленение геологического разреза [71].

Увеличение контраста аномалий измеряемого сигнала связано с дополнительными электрическими потенциалами, образующимися при акустическом воздействии на околоскважинное пространство, в котором возникает сейсмоэлектрический эффект I, приводящий к увеличению её электропроводности, также в среде возникает сейсмоэлектрический эффект E, вызывающий вторичное электрическое поле. При этом происходит взаимное влияние электрического и упругого полей: на параметры вторичного электрического поля влияет дополнительное акустическое поле, а вторичное электрическое поле влияет на упругое. За счет суммарного проявления этих явлений происходит возникновение дополнительных электрических потенциалов.

Исследования в карбонатных разрезах

Последующие исследования в открытом стволе проведены в карбонатных разрезах при строительстве скважин на нефтяных месторождениях Оренбургской области.

Литологическое расчленение карбонатных разрезов скважин и выделение в них коллекторов является основной задачей, стоящей перед методом сейсмоэлектрического каротажа [71].

Пласты в карбонатных разрезах делятся на две группы: пласты высокого сопротивления (свыше 100 Ом·м) и пласты низкого сопротивления (1-100 Ом·м) [56, 74].

К первой группе относятся низкопористые нефте- или газонасыщенные карбонатные породы, вторая группа представлена водонасыщенными и глинистыми карбонатными пластами.

В карбонатных разрезах продуктивные пласты не имеют тех характерных признаков, которые можно увидеть на диаграммах ПС для терригенных разрезов [74].

Поэтому использование данных метода потенциалов собственной поляризации для литологического расчленения карбонатных разрезов, выделения в них продуктивных объектов, оценки их коллекторских свойств, степени и характера их насыщения представляет достаточно сложную задачу и вызывает определенные трудности в связи с низкой информативностью [74].

Эта задача решается путем применения программно-аппаратного комплекса сейсмоэлектрического каротажа [74], созданного и практически реализованного в рамках настоящей диссертационной работы.

Первым исследованием в карбонатном разрезе явилось применение аппаратурно-методического комплекса сейсмоэлектрического каротажа в открытом стволе при строительстве скважины на нефтяном месторождении Оренбургской области в интервале 1616-1670 м в соответствии с ГОСТ 32358-2013 [10, 74].

Величина минерализации бурового раствора при записи составила 0,5 %. Минерализация пластовой воды составила 1,7 %.

В данном случае, когда величина минерализации бурового раствора меньше минерализации пластовых вод, отмечено «прямое поле ПС», где максимумами выделяются глинистые горные породы (глины, аргиллиты, алевролиты), а минимумами, соответственно, известняки, песчаники [74].

При каротажных исследованиях применена схема измерительной установки, изображенная на рис. 4.1, в которой помимо основного центрального измерительного электрода в качестве второго чувствительного элемента в глубинном приборе предусмотрен мегаэлектродный блок.

Объектом геофизических исследований послужил башкирский ярус А₄.

Целью исследования явилось выявление эффекта от применения акустического воздействия на околоскважинное пространство [71], зависимости величины разности электрических потенциалов горных пород и ее морфологии от частоты упругих колебаний, а также обоснование целесообразности использования мегаэлектродного блока - группы измерительных электродов [74] M_1-M_{n+1} в процессе каротажа.

Каротажные измерения проводились следующим образом.

Сначала выполнялась регистрация разности электрических потенциалов горных пород, где чувствительным элементом скважинного прибора являлся один центральный измерительный электрод М [71, 73].

Затем выполнялась регистрация разности электрических потенциалов горных пород, где чувствительным элементом скважинного прибора являлся мегаэлектродный блок - группа измерительных электродов M_1-M_{n+1} .

На рис. 4.8 представлены результаты литологического расчленения геологического разреза скважины по диаграммам ПС, записанным: одним центральным измерительным электродом М (а) и мегаэлектродным блоком (б).

Из рисунка 4.8 видно, что применение в глубинном приборе мегаэлектродного блока в качестве первичного измерительного преобразователя вызывает увеличение контраста аномалий регистрируемого параметра. В данном

случае на диаграмме, полученной при записи группой измерительных электродов более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения относительно фонового замера ПС.

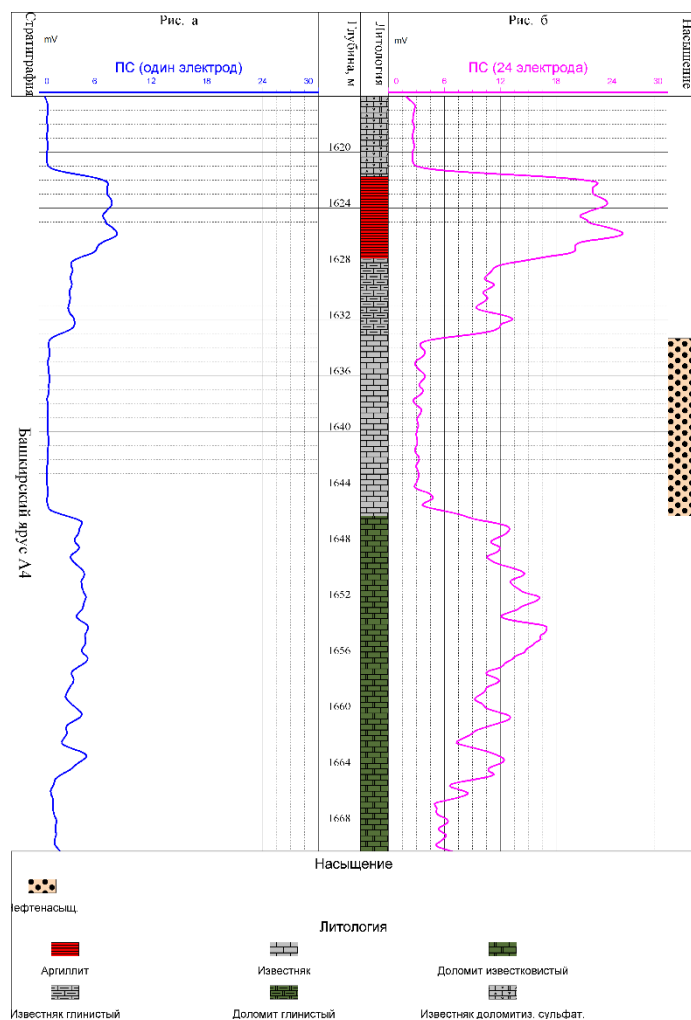


Рис. 4.8. Результаты литологического расчленения карбонатного геологического разреза скважины по диаграммам ПС при помощи одного и нескольких измерительных электродов.

а – запись одним измерительным электродом;

б – запись при помощи мегаэлектродного блока

Для повышения информативности каротажных исследований [38] помимо применения мегаэлектродного блока [67, 71] в рамках настоящей работы

предложено применение акустического воздействия различной частоты на околоскважинное исследуемое пространство.

Далее выполнялась регистрация разности электрических потенциалов горных пород по стволу скважины мегаэлектродным блоком при наложении акустического поля различной частоты на исследуемое околоскважинное пространство [71, 73].

Сначала выполнялся фоновый замер без акустического воздействия на объект исследования [73].

Затем выполнялась запись при акустическом воздействии на объект исследования частотой 6 кГц [38, 73].

Далее производилась запись при акустическом воздействии на объект исследования частотой 12 кГц.

И в завершение выполнялась запись при акустическом воздействии на объект исследования частотой 24 кГц.

На рис. 4.9 представлены диаграммы, полученные предлагаемым аппаратурно-методическим комплексом сейсмоэлектрического каротажа при различных значениях частоты акустического воздействия.

Из рис. 4.9 б видно, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 6 кГц вызывает увеличение амплитуды и контраста аномалий регистрируемого параметра. В данном случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии частотой 6 кГц более детально отмечаются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения относительно фонового замера ПС.

Из рис. 4.9 в следует, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 12 кГц вызывает большее увеличение амплитуды и контраста аномалий регистрируемого параметра относительно фонового замера ПС и относительно замера при частоте излучателя 6 кГц. В этом случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии частотой 12 кГц более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения относительно фонового замера ПС и относительно записи при частоте излучателя 6 кГц.

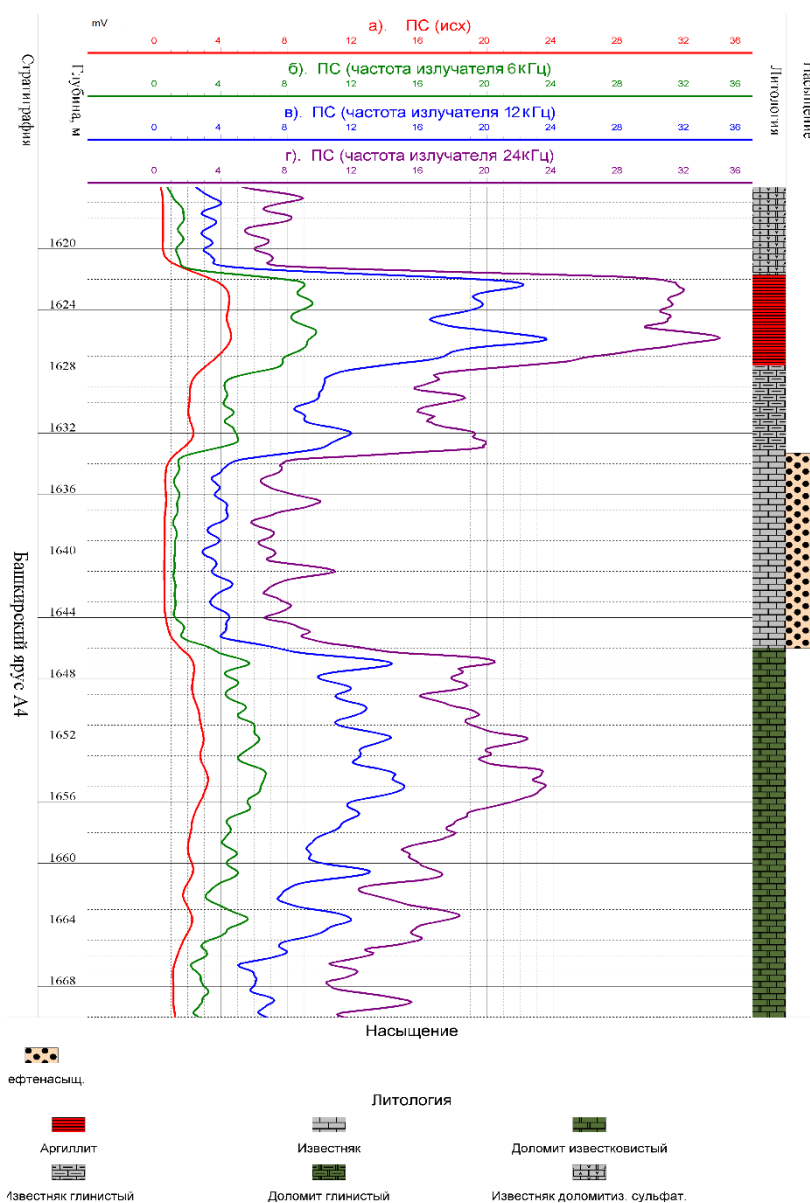


Рис. 4.9. Результаты литологического расчленения геологического разреза по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа на различных частотах акустического воздействия.

- а – фоновый замер, полученный без наложения акустического поля;
- б – диаграмма, полученная при акустическом воздействии частотой 6 кГц;
- в – диаграмма, полученная при акустическом воздействии частотой 12 кГц;
- г – диаграмма, полученная при акустическом воздействии частотой 24 кГц

Рис. 4.9 г демонстрирует, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 24 кГц вызывает еще большее увеличение амплитуды и контраста аномалий регистрируемого параметра относительно фонового замера ПС и относительно замеров при частотах излучения 6 кГц, 12 кГц. Здесь на диаграмме, полученной при акустическом воздействии частотой 24 кГц более детально отбиваются границы пластов, просматриваются также дополнительные приращения на диаграмме относительно фонового замера ПС и относительно записи при частоте излучателя 6 кГц и 12 кГц.

Из рис. 4.9 б, в, г видно, что применение акустического воздействия при каротажных измерениях методом ПС повышает информативность данного метода.

Исходя из результатов проведенных скважинных измерений можно сделать вывод о том, что с увеличением частоты акустического воздействия на исследуемый объект наблюдается увеличение амплитуды и контраста аномалий регистрируемого параметра.

Рис. 4.9 показывает, что применение акустического воздействия на зону исследования позволяет более точно и детально судить о геологическом строении изучаемых геологических объектов [70].

Мегаэлектродный блок позволяет регистрировать изменение величины электрических потенциалов непосредственно на границе раздела горная порода – буровой раствор, увеличивая при этом степень контакта с исследуемой средой [74].

Таким образом, применение мегаэлектродного блока и акустического воздействия повышают информативность каротажных исследований.

Следующим исследованием в карбонатном разрезе явилось применение аппаратурно-методического комплекса сейсмоэлектрического каротажа в открытом стволе при строительстве скважины на нефтяном месторождении Оренбургской области в интервале 1616-1670 м в соответствии с ГОСТ 32358-2013 [10].

Величина минерализации бурового раствора при записи составила порядка 0,7 %. Минерализация пластовой воды составила порядка 1,9 % [74].

При исследованиях использована измерительная схема, представленная на рис 4.1, в которой помимо основного центрального измерительного электрода в качестве второго первичного измерительного преобразователя в скважинном приборе предусмотрен мегаэлектродный блок.

Объектом геофизических исследований послужил башкирский ярус А₄.

Целью исследования явилось выявление эффекта от применения акустического воздействия на исследуемое околоскважинное пространство [71] и от использования мегаэлектродного блока в глубинном приборе в качестве чувствительного элемента.

Каротажные измерения проводились следующим образом.

Сначала выполнялся фоновый замер разности электрических потенциалов горных пород при использовании одного центрального измерительного электрода М для предварительной оценки физических свойств исследуемых горных пород.

Затем выполнялась регистрация разности электрических потенциалов горных пород также при использовании одного центрального измерительного электрода М при акустическом воздействии на околоскважинное пространство относительно фоновой записи [71].

Далее выполнялась регистрация разности электрических потенциалов горных пород при одновременном акустическом воздействии с применением мегаэлектродного блока для сравнения с результатами двух предыдущих замеров.

Частота акустического воздействия была выбрана опытным путем с учетом влияния исследуемой среды и составила 5 кГц. При данной частоте была достигнута наибольшая чувствительность аппаратуры.

На рис. 4.10 приведен пример литологического расчленения геологического разреза скважины по интенсивности величины разности электрических потенциалов горных пород.

Литологическое расчленение геологического разреза производится на качественном уровне путем сравнительного анализа трех полученных диаграмм.

Мощность пластов определяется по правилу полумаксимума или полуминимума. Глины отмечаются максимальными, а песчаники и известняки

минимальными значениями разности электрических потенциалов, при условии, если величина минерализации скважинной жидкости меньше минерализации пластовых вод [56, 71].

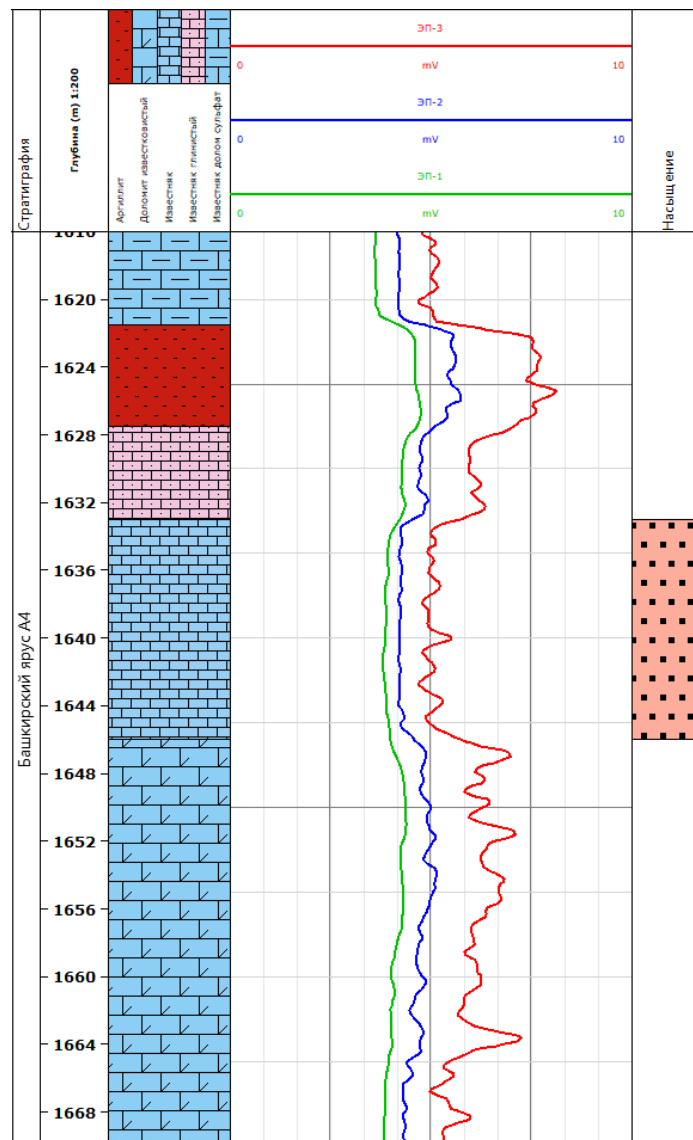


Рис. 4.10. Результаты литологического расчленения карбонатного геологического разреза нефтяной скважины по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа.

ЭП-1 – запись одним измерительным электродом;

ЭП-2 - запись одним измерительным электродом при акустическом воздействии;

ЭП-3 - запись группой измерительных электродов при акустическом воздействии.

По фоновой диаграмме разности электрических потенциалов горных пород ЭП-1 осуществляется предварительная оценка их физических свойств, так как применение метода ПС для литологического расчленения карбонатных разрезов скважин представляет достаточно сложную и порой невыполнимую задачу в связи с низкой информативностью. Соответственно, по диаграмме ЭП-1 невозможно с высокой степенью объективности произвести литологическое расчленение изучаемого геологического разреза.

Диаграмма ЭП-2 демонстрирует, что акустическое воздействие на околоскважинное пространство увеличивает контраст аномалий регистрируемого параметра относительно фонового замера и позволяет с более высокой точностью и достоверностью производить литологическое расчленение исследуемого геологического разреза. На диаграмме ЭП-2 более детально выделяются границы пластов, отмечаются дополнительные приращения на участках литологических разностей относительно фоновой записи.

Увеличение контраста аномалий на диаграмме ЭП-2 связано с дополнительными электрическими потенциалами, образующимися при акустическом воздействии на околоскважинное пространство. Дополнительные электрические потенциалы возникают в пористой флюидонасыщенной среде при воздействии на нее упругими волнами за счет сейсмoeлектрического эффекта I , приводящего к увеличению её электропроводности и сейсмoeлектрического эффекта E , вызывающего вторичное электрическое поле. За счет суммарного проявления этих явлений происходит возникновение дополнительных электрических потенциалов. При этом необходимо также учитывать взаимное влияние электрического и упругого полей.

Диаграмма ЭП-3 подтверждает эффективность применения мегаэлектродного блока в качестве чувствительного элемента в глубинном приборе, которое вызывает увеличение контраста аномалий измеряемого параметра. Это позволяет с еще более высокой точностью и достоверностью

проводить литологическое расчленение исследуемого геологического разреза, используя дополнительную информацию, и более объективно судить о физических свойствах горных пород, слагающих этот разрез. На диаграмме ЭП-3 более детально отбиваются границы пластов, выделяются дополнительные приращения на участках литологических неоднородностей относительно предыдущих замеров ЭП-1 и ЭП-2.

Применение мегаэлектродного блока дает возможность измерения значений разности электрических потенциалов непосредственно на границах твердой и жидкой фаз (горной породы и бурового раствора).

Дополнительные приращения аномалий на диаграмме разности электрических потенциалов при использовании мегаэлектродного блока связаны с наличием на границах горной породы и скважинной жидкости диффузионно-адсорбционных потенциалов, параметры которых с высокой точностью невозможно зарегистрировать, применяя в качестве первичного измерительного преобразователя в глубинном приборе один центральный измерительный электрод. Положительными приращениями аномалий характеризуются глинистые включения и пропластки, которые не отмечаются на диаграмме фоновой записи. Также в интервале нефтенасыщенного карбонатного пласта наблюдается повышение контраста аномалий регистрируемого сигнала по сравнению с фоновым замером, связанное с наличием геологических неоднородностей. Максимумами здесь выделяются менее проницаемые участки, а минимумами – наиболее проницаемые области пласта-известняка.

Исходя из результатов проведенных каротажных исследований в открытом стволе можно сделать вывод о том, что метод мегаэлектродного сейсмoeлектрического каротажа является более точным и информативным в отличие от известных методов расчленения геологических разрезов нефтяных скважин по изменению значений разности электрических потенциалов исследуемых горных пород.

Применение метода мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа показывает свою эффективность при литологическом расчленении карбонатных разрезов скважин.

Применение акустического воздействия при записи диаграмм ПС в карбонатных разрезах скважин повышает точность и детальность их литологического расчленения и позволяет более объективно судить о физических свойствах горных пород по дополнительным аномалиям в интервалах пористых насыщенных пластов и по всему разрезу скважины [71].

Проведенные каротажные исследования демонстрируют высокую эффективность применения акустического воздействия на околоскважинное пространство и подтверждают целесообразность применения в качестве чувствительного элемента мегаэлектродного блока в скважинном приборе при регистрации разности электрических потенциалов горных пород.

Использование мегаэлектродного блока и акустического воздействия повышает точность и информативность геофизических исследований при литологическом расчленении геологических разрезов скважин.

Применение предлагаемого метода повышает информативность геофизических исследований.

Проведение вышеописанных исследований и анализ их результатов может служить основой для создания и внедрения новых геофизических методов исследования скважин и устройств для литологического расчленения разрезов скважин [71].

Из вышесказанного следует, что применение метода мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа целесообразно для решения многих важных задач геофизической интерпретации в открытом стволе [74].

4.2.2 Каротажные исследования в обсаженных скважинах

Геофизические исследования в обсаженных скважинах проведены на нефтяных месторождениях Оренбургской области с целью изучения и анализа диаграмм сейсмoeлектрического каротажа для решения задачи определения границ интервалов и качества перфорации эксплуатационных колонн.

Применение метода сейсмoeлектрического каротажа для определения степени гидродинамической сообщаемости продуктивного пласта с внутренней полостью обсадной эксплуатационной колонны [73] является более эффективным по сравнению с известными методами определения интервалов и качества перфорации по изменению значений разности электрических потенциалов колонны, так как за счет применения акустического воздействия на околоскважинное пространство и мегаэлектродного блока [73] в качестве чувствительного элемента в глубинном приборе получается дополнительная информация, позволяющая более точно определять интервалы перфорации и объективно оценивать качество прострелочно-взрывных работ.

Исследования зон перфорации эксплуатационных колонн

Первым исследованием для определения интервала и оценки качества перфорации эксплуатационной колонны, проведенным в рамках настоящей работы, явилось применение аппаратно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа в обсаженной эксплуатационной скважине нефтяного месторождения Оренбургской области в интервале 1636-1644 м.

При каротажных исследованиях применена схема измерительной установки, изображенная на рис 3.2, в которой мегаэлектродный блок не предусмотрен.

Объектом геофизических исследований послужил проперфорированный продуктивный интервал нефтяной скважины.

Целью исследования явилось повышение информативности метода определения интервала и качества перфорации эксплуатационной колонны по изменению значений разности ее электрических потенциалов путем применения

акустического воздействия на исследуемую зону перфорации после проведения прострелочно-взрывных работ.

Каротажные исследования проводились следующим образом.

Сначала производилась фоновая запись параметра разности электрических потенциалов [73] эксплуатационной колонны в исследуемом интервале перфорации без наложения акустического поля [37, 65].

Затем выполнялась запись параметра разности электрических потенциалов колонны при наложении акустического поля на исследуемый интервал перфорации для сравнения с результатами фонового замера.

Частота акустического воздействия была выбрана опытным путем с учетом влияния исследуемой среды и составила 12 кГц. При данной частоте была достигнута наибольшая чувствительность аппаратуры.

На рис. 4.11 приведены результаты определения интервала и качества перфорации обсадной эксплуатационной колонны в нефтяной скважине Оренбургской области по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа.

Определение интервала и качества перфорации производится на качественном уровне путем сравнительного анализа двух полученных диаграмм.

По фоновой диаграмме разности электрических потенциалов обсадной эксплуатационной колонны ЭП-1 невозможно с высокой степенью объективности определить границы интервала перфорации и качество прострелочно-взрывных работ из-за низкой амплитуды и слабой дифференцированности измеряемого параметра, поэтому по диаграмме ЭП-1 осуществляется предварительное определение границ интервала перфорации и оценка степени гидродинамической сообщаемости продуктивного проперфорированного пласта с внутренней полостью колонны.

Диаграмма ЭП-1 отображает границы интервала перфорации, которые определяются по правилу полумаксимума амплитуды аномалии регистрируемого сигнала, места прострела обсадной колонны в исследуемом интервале перфорации выделяются незначительными положительными отклонениями.

Диаграмма ЭП-2 демонстрирует, что акустическое воздействие вызывает значительное увеличение контраста аномалий регистрируемого параметра относительно фонового замера и позволяет с более высокой точностью и достоверностью судить о степени гидродинамической сообщаемости пласта с внутренней полостью обсадной колонны и более точно определять границы интервала перфорации. На диаграмме ЭП-2 более детально выделяются границы интервала перфорации, отмечаются дополнительные приращения в местах прострела относительно фоновой записи.

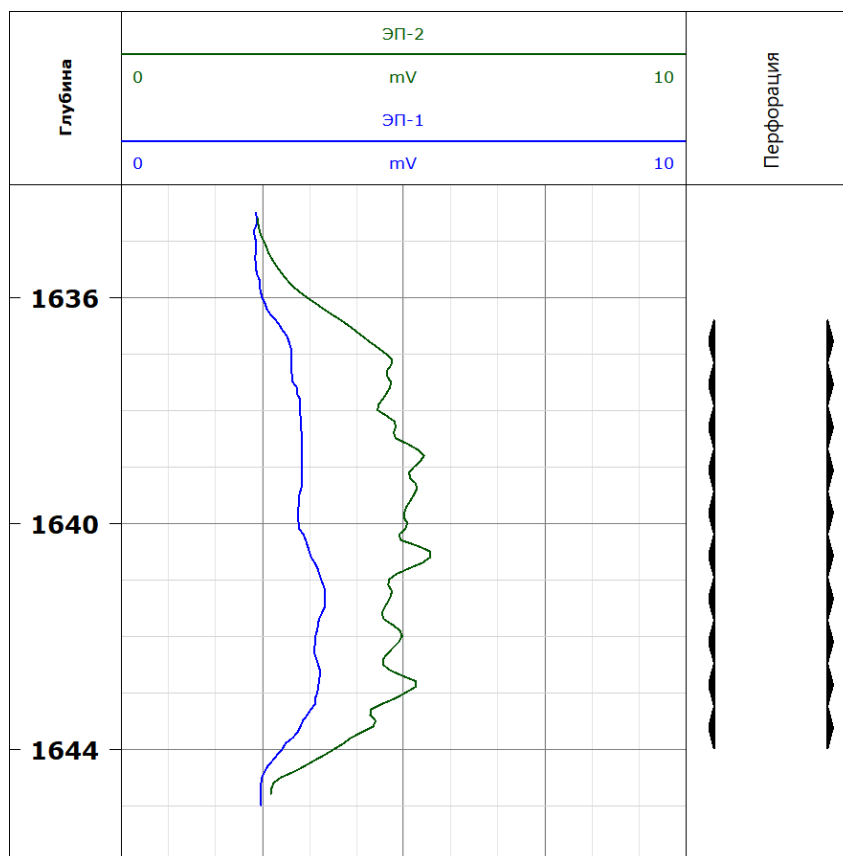


Рис. 4.11. Результаты определения интервала и качества перфорации эксплуатационной колонны в нефтяной скважине по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа.

ЭП-1 – фоновый замер;

ЭП-2 – запись при акустическом воздействии

Увеличение контраста аномалий на диаграмме ЭП-2 связано с дополнительными электрическими потенциалами, образующимися при акустическом воздействии на околоскважинное пространство.

Дополнительные электрические потенциалы возникают в исследуемой среде при воздействии на нее упругими волнами за счет сейсмoeлектрического эффекта I , приводящего к увеличению её электропроводности и сейсмoeлектрического эффекта E , вызывающего вторичное электрическое поле. За счет суммарного проявления этих явлений происходит возникновение дополнительных электрических потенциалов. При этом необходимо также учитывать взаимное влияние электрического и упругого полей. На параметры вторичного электрического поля оказывает влияние дополнительное акустическое поле, при этом вторичное электрическое поле влияет на упругое.

Из рис. 4.11 следует, что применение акустического воздействия на зону исследования при определении границ интервалов и качества перфорации по изменению величины разности электрических потенциалов позволяет более детально судить о степени гидродинамической сообщаемости продуктивного пласта с внутренней полостью обсадной эксплуатационной колонны [37, 73].

Следующим исследованием для определения интервала и оценки качества перфорации эксплуатационной колонны, проведенным в рамках настоящей работы, явилось применение аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа в обсаженной эксплуатационной скважине нефтяного месторождения Оренбургской области в интервале 1634,5-1641,5 м.

При исследованиях использована измерительная схема, представленная на рис 4.1, в которой помимо основного центрального измерительного электрода в качестве второго первичного измерительного преобразователя в скважинном приборе предусмотрен мегаэлектродный блок.

Объектом геофизических исследований послужил проперфорированный продуктивный интервал нефтяной скважины.

Целью исследования явилось повышение информативности метода определения интервала и качества перфорации эксплуатационной колонны по

изменению значений разности электрических потенциалов колонны путем применения акустического воздействия на исследуемую зону перфорации после проведения прострелочно-взрывных работ, а также посредством применения в качестве чувствительного элемента в глубинном приборе мегаэлектродного блока [73].

Скважинные измерения осуществлялись следующим образом. Сначала выполнялись замеры разности электрических потенциалов эксплуатационной колонны в исследуемом интервале перфорации без акустического воздействия при помощи одного центрального измерительного электрода ЭП-1 (фоновая запись), затем производилась запись в том же интервале с применением мегаэлектродного блока ЭП-2 для предварительного определения границ интервала перфорации и первичной оценки степени гидродинамической сообщаемости пласта с внутренней полостью обсадной колонны [37].

Далее в том же интервале выполнялась регистрация разности электрических потенциалов эксплуатационной колонны с использованием одного центрального измерительного электрода при акустическом воздействии на исследуемый интервал перфорации ЭП-3.

После чего в том же интервале в завершение производилась запись ЭП-4 с применением мегаэлектродного блока также при акустическом воздействии на зону исследования для последующего сопоставления с предыдущими замерами [70].

Частота акустического воздействия выбиралась опытным путем с учетом влияния исследуемой среды и составила 12 кГц. При данной частоте достигнута наибольшая чувствительность аппаратуры [71].

На рис. 4.12 приведены результаты определения интервала и качества перфорации эксплуатационной колонны в нефтяной скважине по диаграммам сейсмoeлектрического каротажа.

Определение интервала и качества перфорации производится на качественном уровне путем сравнительного анализа четырех полученных диаграмм.

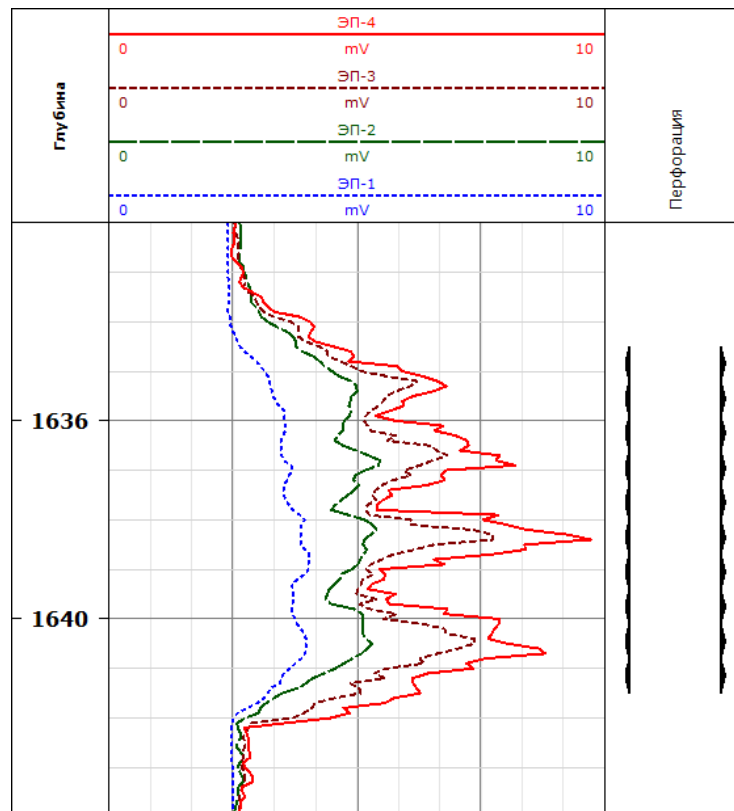


Рис. 4.12. Результаты определения интервала и качества перфорации эксплуатационной колонны в нефтяной скважине по диаграммам мегаэлектродного сейсмoeлектрического каротажа.

ЭП-1 – фоновая запись одним измерительным электродом;

ЭП-2 – запись с применением мегаэлектродного блока;

ЭП-3 – запись одним измерительным электродом при акустическом воздействии;

ЭП-4 – запись с применением мегаэлектродного блока при акустическом воздействии

По фоновой диаграмме ЭП-1 невозможно с высокой точностью определить границы интервала перфорации и качество проведенных прострелочно-взрывных работ из-за низкого контраста аномалий измеряемого параметра, в связи с этим по диаграмме ЭП-1 осуществляется предварительное определение границ интервала

перфорации и оценка степени гидродинамической сообщаемости вскрытого продуктивного интервала с внутренней полостью колонны.

Диаграмма ЭП-1 отображает границы интервала перфорации, определяемые по правилу полумаксимума амплитуды аномалии регистрируемого сигнала, участки прострела в исследуемом интервале перфорации выделяются слабыми отклонениями.

Диаграмма ЭП-2 подтверждает эффективность применения мегаэлектродного блока и демонстрирует, что его использование вызывает увеличение контраста аномалий измеряемого параметра относительно фоновой записи, что позволяет с более высокой точностью и объективностью судить о степени гидродинамической сообщаемости пласта с внутренней полостью обсадной колонны. На диаграмме ЭП-2 более детально отбиваются границы интервала перфорации, просматриваются дополнительные приращения в местах прострела относительно фонового замера [71].

Повышение контраста аномалий на диаграмме ЭП-2 связано с тем, что мегаэлектродный блок обеспечивает измерение значений разности электрических потенциалов непосредственно на границах пласта и проперфорированных стенок скважины, увеличивая интенсивность регистрируемого параметра в отличие от измерений одним центральным электродом, движущимся при записи по центру скважины [73]. Применение мегаэлектродного блока в скважинном приборе повышает степень контакта чувствительного элемента с исследуемой средой.

Диаграмма ЭП-3 демонстрирует, что акустическое воздействие на исследуемый интервал перфорации вызывает увеличение контраста аномалий измеряемого параметра по сравнению с двумя предыдущими замерами, что позволяет с более высокой точностью и достоверностью судить о степени гидродинамической сообщаемости нефтенасыщенного пласта с внутренней полостью обсадной колонны и более точно определять границы интервала перфорации. На диаграмме ЭП-3 более детально выделяются границы интервала перфорации, просматриваются дополнительные приращения в местах прострела относительно предыдущих замеров.

Увеличение контраста аномалий на диаграмме ЭП-3 связано с дополнительными электрическими потенциалами, образующимися в исследуемой среде при воздействии на нее упругими волнами за счет суммарного проявления сейсмoeлектрического эффекта I , приводящего к увеличению её электропроводности и сейсмoeлектрического эффекта E , вызывающего вторичное электрическое поле. При этом необходимо также учитывать взаимное влияние электрического и упругого полей. На параметры вторичного электрического поля оказывает влияние дополнительное акустическое поле, при этом вторичное электрическое поле влияет на упругое.

Диаграмма ЭП-4 указывает на то, что применение акустического воздействия и мегаэлектродного блока вызывает увеличение контраста аномалий регистрируемого сигнала по отношению к трем предыдущим замерам, что позволяет с еще более высокой точностью и достоверностью судить о степени гидродинамической сообщаемости пласта с внутренней полостью обсадной колонны. На диаграмме ЭП-4 более детально отбиваются границы зон перфорации, просматриваются дополнительные приращения в местах прострела относительно трех предыдущих диаграмм.

Увеличение контраста аномалий регистрируемого параметра связано, во-первых, с увеличением степени контакта чувствительного элемента глубинного прибора с исследуемой средой за счет применения мегаэлектродного блока, во-вторых с возникновением дополнительных электрических потенциалов, образующихся в исследуемой среде за счет сейсмoeлектрических явлений [73].

Исходя из результатов проведенных каротажных исследований в обсаженных скважинах можно сделать вывод о том, что метод мегаэлектродного сейсмoeлектрического каротажа является более точным и информативным в отличие от известных методов определения границ интервалов и качества перфорации по изменению значений разности электрических потенциалов обсадной эксплуатационной колонны.

Применение сейсмoeлектрического каротажа показывает свою эффективность при определении степени гидродинамической сообщаемости продуктивного пласта с внутренней полостью колонны.

Проведенные каротажные исследования демонстрируют высокую эффективность применения акустического воздействия на околоскважинное пространство и подтверждают целесообразность применения в качестве чувствительного элемента мегаэлектродного блока в скважинном приборе при регистрации значений разности электрических потенциалов обсадной колонны.

Использование мегаэлектродного блока и акустического воздействия повышает точность и информативность геофизических исследований при определении качества прорелочно-взрывных работ в нефтяных скважинах.

Мегаэлектродный сейсмoeлектрический каротаж в обсаженных скважинах может быть также эффективно использован для исследования интервалов перфорации слабопроницаемых продуктивных пластов и пластов, насыщенных высоковязкими углеводородами, а также при выявлении интервалов нарушения целостности обсадных колонн в местах притока пластового флюида или поглощения скважинной жидкости [73].

Таким образом, применение метода сейсмoeлектрического каротажа целесообразно для решения эксплуатационных технических задач геофизической интерпретации в обсаженных скважинах [73].

Выводы по главе 4

- Аппаратурно-методический комплекс сейсмoeлектрического каротажа, разработанный в рамках настоящей работы, расширяет область применения и возможности метода ПС при литологическом расчленении геологических разрезов скважин и при определении границ интервалов и качество перфорации за счет применения акустического воздействия на околоскважинное пространство.

- Проведенные исследования демонстрируют, что за счет акустического воздействия на околоскважинное пространство повышается контраст аномалий ПС, что увеличивает информативность исследований.

- Сейсмoeлектрический каротаж показывает высокую эффективность применения в открытом стволе скважин в процессе их строительства, а также в скважинах эксплуатационного фонда при прострелочно-взрывных работах и исследовании их технического состояния.

- Разработанный мегаэлектродный блок в комплексе с акустическим воздействием на зону исследования увеличивает информативность каротажа в открытом стволе и в обсаженных скважинах в условиях нефтяных месторождений Оренбургской области.

Результаты проведенных в работе скважинных исследований в условиях нефтяных месторождений Оренбургского региона свидетельствуют о том, что разработанный комплекс сейсмoeлектрического каротажа расширяет область применения и возможности метода потенциалов собственной поляризации при литологическом расчленении геологических разрезов скважин, определении границ интервалов и качества перфорации, применение мегаэлектродного блока в качестве чувствительного элемента в глубинном приборе в комплексе с акустическим воздействием на зону исследования увеличивает информативность каротажа в открытом стволе и в обсаженных скважинах и обосновывают второе и третье защищаемые положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования дополнены теоретические положения в области сейсмoeлектрических явлений в нефтяных и газовых скважинах. Разработан и внедрен аппаратурно-методический комплекс сейсмoeлектрического каротажа, предназначенный для литологического расчленения геологических разрезов скважин [67] и для определения интервалов и качества перфорации обсадных эксплуатационных колонн [73], расширяющий область применения метода потенциалов собственной поляризации при геофизических исследованиях.

В рамках внедрения аппаратурно-методического комплекса сейсмoeлектрического каротажа разработаны и запатентованы следующие новые устройства и способы его применения:

- устройство сейсмoeлектрического каротажа, представляющее из себя глубинный прибор с применением в качестве чувствительного элемента мегаэлектродного блока - группы измерительных электродов, расположенных радиально оси прибора на прижимном механизме.

- способ литологического расчленения геологических разрезов скважин в открытом стволе в процессе их строительства;

- способ определения интервалов и качества перфорации продуктивных пластов в обсаженных скважинах;

Проведены геофизические исследования на месторождениях Оренбургского региона с целью литологического расчленения геологических разрезов скважин и определения зон и качества перфорации.

Подтверждена эффективность применения акустического воздействия на околоскважинное пространство и использование в качестве первичного измерительного преобразователя в глубинном приборе мегаэлектродного блока при регистрации параметра разности электрических потенциалов исследуемой среды [67].

Выполнена качественная интерпретация диаграмм проведенного сейсмоэлектрического каротажа, получены новые данные о литологии и качестве перфорации ряда нефтяных месторождений Оренбургской области.

Основные выводы и результаты диссертационной работы

1. Предложенный аппаратурно-методический комплекс сейсмоэлектрического каротажа обеспечивает повышение информативности метода потенциалов собственной поляризации в открытом стволе и в обсаженных скважинах.

2. Применение акустического воздействия на околоскважинное пространство повышает контраст аномалий потенциалов самопроизвольной поляризации, увеличивая информативность исследований.

3. Разработанный мегаэлектродный блок увеличивает степень контакта с исследуемой средой по окружности скважины и повышает контраст аномалий потенциалов самопроизвольной поляризации, увеличивая информативность исследований.

Применение аппаратурно-методического комплекса сейсмоэлектрического каротажа имеет существенное практическое значение при литологическом расчленении карбонатных разрезов скважин, так как в таких разрезах диаграммы потенциалов самопроизвольной поляризации являются малоинформативными из-за низкого контраста аномалий.

Комплекс эффективно может быть использован при исследовании интервалов слабопроницаемых продуктивных пластов и пластов, насыщенных высоковязкими углеводородами [73], так как в таких пластах диаграммы потенциалов самопроизвольной поляризации являются также малоинформативными из-за низкого контраста аномалий.

Аппаратурно-методический комплекс сейсмоэлектрического каротажа может быть использован для определения пористости и глинистости коллекторов нефти и газа, определения минерализации пластовых вод и величины пластовых

давлений в открытом стволе, а также для определения интервалов нарушения целостности обсадных эксплуатационных колонн в обсаженных скважинах в местах притока или поглощения жидкости [73].

Рекомендации:

Сейсмоэлектрический каротаж рекомендуется включить в полный комплекс геофизических исследований скважин для повышения эффективности разработки нефтяных и газовых месторождений [3].

Перспективы дальнейшей разработки темы:

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при дальнейшем изучении сейсмоэлектрических явлений в нефтяных и газовых скважинах, а также при разработке новых геофизических методов и устройств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Д. А. Численное моделирование сейсмoeлектрических полей, возбуждаемых импульсным сейсмическим источником. / Д. А. Алексеев, М. Б. Гохберг, А. А. Гончаров, А. О. Плисс // Вестник Российской академии естественных наук. – 2022. – № 4, С. 69–79.
2. Анцыферов М. С. Лабораторное воспроизведение сейсмoeлектрического эффекта второго рода / М. С. Анцыферов // Доклад АН СССР. – 1958. – Том 121, № 5. – С. 827–829.
3. Бембель Р. М. Геологические модели и основы разведки и разработки месторождений нефти и газа Западной Сибири / Р. М. Бембель, С. Р. Бембель. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет. – 2022. – 220 с.
4. Васильев Ю. В. Техногенное влияние добычи углеводородов на современную геодинамику Самотлорского месторождения / Ю. В. Васильев, А. Г. Плавник, А. В. Радченко // Маркшейдерский вестник. Горная геомеханика. – 2017. – № 4 (119). – С. 43–51.
5. Вербицкий Т. З. Математическое моделирование горных пород с целью прогнозирования их физических свойств / Т. З. Вербицкий, А. С. Федоршин // Геофизический журнал. – 1987. – Том 9, № 2. – С. 39–45.
6. Вержбицкий В. В. Электромагнитное поле, создаваемое в скважине акустическим излучателем / В. В. Вержбицкий, М. Г. Марков // Геофизика. – 2002. – № 2. – С. 47–50.
7. Вержбицкий В. В. Решение прямой задачи сейсмoeлектрического каротажа / В. В. Вержбицкий, М. Г. Марков // НТВ «Каротажник». – Тверь: АИС, 2003. – Вып. 110. – С. 39–53.
8. Волярович М. П. Пьезоэлектрический эффект горных пород / М. П. Волярович, Э. И. Пархоменко // Доклад АН СССР. – 1954. – Том 99, № 2. – С. 239–242.

9. Волков, В. А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник / В. А. Волков. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 672 с.
10. ГОСТ 32358-2013 Скважины нефтяные и газовые. Геофизические исследования и работы в скважинах. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с.
11. ГОСТ 331944-2012 Кабели грузонесущие геофизические бронированные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
12. Гохберг М. Б. Сейсмoeлектромагнитные явления / М. Б. Гохберг, В. А. Моргунов, О. А. Похотелов. – АН СССР, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М.: Наука, 1988. – 169 с.
13. Давыдов В. А. Сейсмoeлектрические исследования на грунтовой плотине / В. А. Давыдов // Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН. – Екатеринбург: Уральский геофизический вестник. – 2020. № 4 (42). – С. 21–28.
14. Давыдов Ю. Б. Технологические комплексы геофизических методов при поисках и разведке минерального сырья / Ю. Б. Давыдов, А. Г. Талалай, И. Е. Шинкарюк. – 2-е изд., испр. и доп. – М: Директ-Медиа, 2022. – 428 с.
15. Иванов А. Г. Сейсмoeлектрический эффект второго рода / А. Г. Иванов // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. – М.: 1940. № 5. – С. 699–727.
16. Иванов А. Г. Эффект электризации пластов Земли при прохождении через нее упругих волн / А. Г. Иванов // Доклад АН СССР. – 1939. – Том 24, № 1. – С. 41–43.
17. Итенберг С. С. Промысловая геофизика / С. С. Итенберг – М.: Гостоптехиздат. – 1961. – 367 с.
18. Казначеев П. А. Нелинейные механоэлектрические преобразования в пористых средах: теоретические предпосылки / П. А. Казначеев, А. Н. Камшилин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 83–103.

19. Камшилин А. Н. Активный геоэлектрический и сейсмоэлектрический мониторинг состояния геологической среды / А. Н. Камшилин, П. А. Казначеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 12. – С. 234–242.
20. Касьянов И. В., Нежданов А. А. Роль процессов карбонатизации пород в формировании залежей углеводородов в Западной Сибири / И. В. Касьянов, А. А. Нежданов // Геология нефти и газа. – 2020. – № 1 (102). – С. 69–71.
21. Комаров С. Г. Геофизические методы исследования нефтяных скважин / С. Г. Комаров – Москва; Ленинград: Гостоптехиздат. – 1952. – 360 с.
22. Костицын В. И. Геофизика / В. И. Костицын, В. А. Хмелевской. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет. – 2018. – 428 с.
23. Кузнецов О. Л. Определение границ кимберлитовых тел сейсмоэлектрическим методом / О. Л. Кузнецов, А. А. Кокарев, Н. И. Мигунов, И. Д. Селезнев // Известия ВУЗов. Серия Геология и разведка. – 1986. – № 4. – С. 113–117.
24. Кузнецов О. Л. О возможности использования сейсмоэлектрического эффекта горных пород для поисков и разведки кимберлитовых тел / О. Л. Кузнецов, Н. И. Мигунов, А. А. Кокарев // Известия ВУЗов. Серия Геология и разведка. – 1982. – №1. – С. 102–108.
25. Кузнецов О. Л. Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере / О. Л. Кузнецов, Э. М. Симкин – М.: Недра. – 1990. – 269 с.
26. Мигунов Н. И. Динамические свойства сейсмоэлектрических явлений в водонасыщенных породах / Н. И. Мигунов, А. А. Кокарев // Физика Земли. – 1977. – № 13. – С. 443–446.
27. Мигунов Н. И. О распространении продольных упругих волн в грунтах с электрокинетическими свойствами / Н. И. Мигунов // Физика Земли. – 1981. – № 3. – С. 47–54.
28. Московский И. Г. Математическое моделирование сейсмоэлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах [Электронный ресурс] / И. Г.

Московский, О. М. Балабан, О. С. Федорова, А. В. Кочетков // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Том 7. – № 1. – С. 1–15. <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf>. – DOI: 10.15862/04TVN115 (Дата обращения: 10.05.2024).

29. Назарный С. А. Вызванная сейсмoeлектрическая поляризация / С. А. Назарный, В. А. Комаров. – СПб.: Издательство С.- Петербургского университета. – 2001. – 144 с.

30. Нейштадт Н. М. Экспериментальное исследование сейсмoeлектрического эффекта / Н. М. Нейштадт, Л. М. Осипов // Сборник. Новое в методике и технике геологоразведочных работ. – Ленинград.: Гостоптехиздат. – 1959. – № 2. – С. 253–260.

31. Нейштадт Н. М. Применение пьезoeлектрических и сейсмoeлектрических явлений в разведочной геофизике (обзор) / Н. М. Нейштадт, Э. В. Эппельбаум // Российский геофизический журнал. – 2012. – № 51-52. – С. 63–80.

32. Пархоменко Э. И. Скважинные и лабораторные исследования сейсмoeлектрического эффекта второго рода в горных породах / Э. И. Пархоменко, И. В. Гаскаров // Известия АН СССР. – Труды Института физики Земли АН СССР. – 1971. – № 9. – С. 88–92.

33. Пархоменко Э. И. Применение ультразвука при исследованиях электрических свойств горных пород / Э. И. Пархоменко // – Труды Института физики Земли АН СССР. – 1962. – № 23 (10).

34. Пархоменко Э. И. Исследование влияния влажности на величину сейсмoeлектрического эффекта осадочных пород лабораторным методом / Э. И. Пархоменко, Чжао Цзе-Сань // Известия АН СССР. – серия геофизическая. – 1964. – № 2. – С 206–212.

35. Пархоменко Э. И. Явления электризации в горных породах /. Э. И. Пархоменко. – М.: Наука. – 1968. – 255 с.

36. Патент 519666, СССР. Устройство для измерения сейсмoeлектрических параметров в гармоническом режиме возбуждения сейсмoeлектрического эффекта

второго рода в горных породах / Г. Я. Черняк, Е. Г. Соломин; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии. – № 2038443/26-25, заявл. 01.07.1974; опубл. 30.06.1976, Бюл. № 24.

37. Патент 2298648, Россия. Способ определения интервала и качества перфорации обсадной колонны в скважине / В. А. Марков, В. И. Масленников, С. Н. Чердынцев; заявитель и патентообладатель ООО «Оренбурггеофизика». – № 2005131657/03, заявл. 12.10.2005; опубл. 10.05.2007, Бюл. № 13.

38. Патент 81526, Россия. Устройство для измерения естественных электрических потенциалов горных пород при акустическом воздействии на зону исследования / С. Н. Чердынцев, В. И. Масленников; заявитель и патентообладатель С. Н. Чердынцев. – № 2007120999/22, заявл. 10.05.2007; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8.

39. Патент 2796148, Россия. Способ определения интервала и качества перфорации обсадной колонны в скважине / С. Н. Чердынцев; заявитель и патентообладатель С. Н. Чердынцев. – № 2022134043, заявл. 22.12.2022; опубл. 17.05.2023, Бюл. № 14.

40. Патент 218949, Россия. Устройство сейсмoeлектрического каротажа / С. Н. Чердынцев; заявитель и патентообладатель С. Н. Чердынцев. – № 2023105458/22, заявл. 09.03.2023; опубл. 20.06.2023, Бюл. № 17.

41. Патент 2799729, Россия. Способ определения интервала и качества перфорации обсадной колонны в скважине / С. Н. Чердынцев; заявитель и патентообладатель С. Н. Чердынцев. – № 2022132592, заявл. 12.12.2022; опубл. 11.07.2023, Бюл. № 20.

42. Перельман М. Е. Генерация электромагнитного излучения при колебаниях двойных электрических слоев и его проявление при землетрясениях / М. Е. Перельман, Н. Г. Хатиашвили // Доклад АН СССР. – 1983. – Том 27, № 1. – С. 80–83.

43. Петкевич Г. И. Математическое моделирование механоэлектромагнитных эффектов в пористых насыщенных средах / Г. И.

Петкевич, В. Ф. Кондрат, С. А. Лизун, В. А. Гродзенский // Физические процессы горного производства. – Москва. – 1991. – С. 130–131.

44. Петкевич Г. И. Исследование геологических сред методом вибростимуляции электромагнитных полей / Г. И. Петкевич, В. Ф. Кондрат, С. А. Лизун, Д. Н. Лящук // Физические процессы горного производства. – Москва. – 1991. – С. 127–128.

45. Петкевич Г. И. Петрофизика стимулированных явлений / Г. И. Петкевич, С. А. Лизун, Д. Н. Лящук, В. Ф. Кондрат // Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. – Уфа. – 1990. – С. 46–48.

46. Петкевич Г. И. Геоэлектрические исследования полей, стимулированных вибровоздействием в неоднородных средах / Г. И. Петкевич, Д. Н. Лящук, В. Ф. Кондрат // Нетрадиционные методы геофизических исследований неоднородностей в земной коре. – Москва. – 1989. – С. 72–73.

47. Потапов О. А. Основы сейсмоэлектроразведки / О. А. Потапов, С. А. Лизун, В. Ф. Кондрат и др. – М.: Недра. – 1995. – 267 с.

48. Распопов А. В. Геолого-технологическое моделирование залежей, приуроченных к сложно построенным карбонатным коллекторам, на примере одного из месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции / А. В. Распопов, Н. Д. Козырев, А. А. Кочнев, Т. В. Семенова, М. А. Филатов, С. В. Ладейщиков // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 3 (351). – С. 5–11.

49. Рябова С. А. Характеристики сейсмоэлектрического эффекта на Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН / С. А. Рябова, А. А. Спивак // Вестник Национального Ядерного Центра Республики Казахстан. – 2017. – Том 2. – С. 58–63.

50. Салихов Р. Ш. Исследование структуры адсорбционного слоя и его влияния на фильтрацию / Р. Ш. Салихов, Ю. В. Пахаруков // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 6 (102). – С. 50–53.

51. Светов Б. С. Скважинные исследования сейсмоэлектрических явлений / Б. С. Светов, О. А. Агеева, В. С. Лисицын // Геофизика. – 2001. – № 3. – С. 44–48.

52. Светов Б. С. Электромагнитное поле механоэлектрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах: Постановка задачи / Б. С. Светов, В. П. Губатенко // Физика Земли. – 1999. – № 10. – С. 67–73.

53. Светов Б. С. К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки / Б. С. Светов // Геофизика. – 2000. – № 1. – С. 28–39.

54. Светов Б. С. Сейсмоэлектрический эффект второго рода в горных породах / Б. С. Светов, Г. Х. Шерман, О. А. Агеева, С. В. Шипулин // Геология и геофизика. – 1999. – Том 40, № 8. – С. 1251–1257.

55. Симонян С. С. Зависимость сейсмоэлектрического эффекта от одноосного давления при насыщении образцов растворами поваренной соли / С. С. Симонян // Известия АН АрмССР. Науки о Земле. – 1987. V. XL, № 3. – С. 56–59.

56. Сковородников И. Г. Геофизические исследования скважин / И. Г. Сковородников. – 4-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2014. – 455 с.

57. Сургучев М. А. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклическое воздействие на нефтяные пласты / М. А. Сургучев, О. Л. Кузнецов, Э. М. Симкин. – М.: Недра. – 1975. – 185 с.

58. Талалай А. Г. Применение мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа для литологического расчленения карбонатных разрезов нефтяных скважин / А. Г. Талалай, С. Н. Чердынцев // – Материалы международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам», г. Екатеринбург, Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2023. – С. 72–73.

59. Тереньтьев В. Г. Исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в лабораторных условиях // Записки Горного института. - Санкт-Петербург. - 1992. Т. 130. – С. 13–17.

60. Туренко С. К. Адаптивный подход к обработке и интерпретации данных геофизических исследований скважин с целью построения

сейсмогеологических моделей / С. К. Туренко, Е. А. Черепанов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 2 (140). – С. 8–17.

61. Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве / Я. И. Френкель // Известия АН СССР, Серия геогр. и геофиз. 1944. – Том 8, № 4. – С. 134–149.

62. Фролов А. Д. Некоторые результаты изучения сейсмoeлектрического эффекта в мерзлых породах / А. Д. Фролов, Т. А. Дмитриева // Мерзлотные исследования. – М.: Издательство МГУ. 1976. – № 15. – С. 250–252.

63. Чеботарева И. Я. Влияние неоднородного насыщения образцов горных пород полярными и неполярными жидкостями на их электрический отклик при вибровоздействии / И. Я. Чеботарева, А. Н. Камшилин // Геофизические исследования. – 2019. – Том 20, № 3. – С. 87–102.

64. Чеботарева И. Я. Особенности электрического отклика горных пород на вибровоздействие в условиях слабого неравномерного флюидонасыщения / И. Я. Чеботарева, А. Н. Камшилин // Акустический журнал. – 2020. – Том 66, № 1. – С. 58–70.

65. Чердынцев С. Н. Повышение информативности геофизических исследований при определении интервала перфорации и оценке гидродинамической сообщаемости пласта с внутренней полостью обсадной колонны в скважинах / С. Н. Чердынцев // НТВ «Каротажник». – Тверь: АИС, 2008. – № 9. – С. 119–124.

66. Чердынцев С. Н. Повышение информативности метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) посредством применения акустического воздействия на зону исследования / С. Н. Чердынцев // НТВ «Каротажник». – Тверь: АИС, 2007. – № 8. – С. 61–65.

67. Чердынцев С. Н. Повышение информативности сейсмoeлектрического каротажа при литологическом расчленении геологических разрезов нефтяных скважин / С. Н. Чердынцев // ГеоЕвразия-2023. Геологоразведочные технологии: Наука и бизнес: Труды VI Международной геолого-геофизической конференции.

Том I (III) (г. Москва 27-29 марта 2023 г.). – Тверь: Изд-во ООО «ПолиПРЕСС». – 2023. – С. 32–35.

68. Чердынцев С. Н. Повышение информативности сейсмоэлектрического каротажа при определении границ интервалов и качества перфорации эксплуатационных колонн в нефтяных скважинах / С. Н. Чердынцев // Двадцать четвертая Уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник научных материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН. – 2023. – С. 285–288.

69. Чердынцев С. Н. Повышение точности и детальности исследований при сейсмоэлектрическом каротаже / С. Н. Чердынцев // XXX Международная научно-практическая конференция «Современные научные исследования: Актуальные вопросы, достижения и инновации. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2022. – С. 22–25.

70. Чердынцев С. Н. Применение комплекса сейсмоэлектрического каротажа на нефтяных месторождениях Оренбургской области / С. Н. Чердынцев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова. (г. Екатеринбург 23-27 января 2023 г.). – Екатеринбург: Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН. – 2023. – С. 383–388.

71. Чердынцев С. Н. Применение метода мегаэлектродного сейсмоэлектрического каротажа для повышения интерпретационной информативности литологического расчленения геологических разрезов нефтяных скважин / С. Н. Чердынцев // Геофизика. – 2023. – № 3. – С. 72–77.

72. Чердынцев С. Н. Применение сейсмоэлектрического каротажа в Оренбургском регионе с целью повышения информативности метода ПС / С. Н. Чердынцев // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике: – Материалы региональной научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: РИК ГОУ ОГУ. – 2003. – С. 89–90.

73. Чердынцев С. Н. Применение сейсмоэлектрического каротажа для повышения интерпретационной информативности качества проведенных

прострелочно-взрывных работ в нефтяных скважинах / С. Н. Чердынцев // Геофизика. 2023. – № 1. – С. 71-76.

74. Чердынцев С. Н. Сейсмoeлектрический эффект – основа нового геофизического метода нефтяных скважин – сейсмoeлектрического каротажа / С. Н. Чердынцев // Успехи современного естествознания. 2022. – № 11. – С. 143–150.

75. Черепанов Е. А. Адаптивная обработка и интерпретация данных геофизических исследований скважин с целью построения сейсмогеологических моделей терригенных отложений Западной Сибири: монография / Е. А. Черепанов, С. К. Туренко. – Тюменский индустриальный университет. Тюмень. – 2020. – 92 с.

76. Черняк Г. Я. О прямом и обратном сейсмoeлектрических эффектах в осадочных породах при синусоидальном возбуждении / Г. Я. Черняк // Физика Земли. – 1975. – № 7. – С. 117–121.

77. Черняк Г. Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии / Г. Я. Черняк. М.: Недра. – 1987. – 214 с.

78. Чжао Цзе-Сань. О сейсмoeлектрическом эффекте второго рода в дисперсных грунтах / Чжао Цзе-Сань, Р. С. Зиангиров // Физика Земли. – 1965. – № 3. – С. 76–81.

79. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solids / M. A. Biot. – I. Low-Frequency Range. J. Acoustic. Soc. Amer., 1956a, Vol. 28, pp. 168–178.

80. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids / M. A. Biot. – II. Higher Frequency Range. J. Acoustic. Soc. Amer., 1956b, Vol. 28, pp. 179–191.

81. Haartsen M. V. Electro seismic waves from point sources in layered media / M. V. Haartsen, S. R. Pride // J. Geophysical Res. – 1996. – V. 102, P. 24745–24769.

82. Maus chly S. A study of pressure and temperature effects in earth current measurement / S. Maus chly S. – From terrestrial and atmospheric electricity. – June 1918.

83. Mikhailov O. V. Electro seismic investigation of the shallow subsurface: Field measurements and numerical modeling / O. V. Mikhailov, M. V. Haartsen, M. N. Toksoz // *Geophysics*. – 1997. – 62, № 1. – P. 97–105.
84. Patent 2,054,067, USA. Method and apparatus for seismic electric prospecting / L. W. Blau, L. Stetham; assignee Standard Oil Development Company. – № 647,084, appl. 14.12.1932, publ. 27.12.1934, № 759,348.
85. Patent 7,330,790, USA. Method of Seismo-Electromagnetic Detecting of Hydrocarbon Deposit / A. Berg; assignee Seismic Science Inc. – № 11/241,643, appl. 03.10.2005, publ. 05.04.2007, US 2007/0078603 A1.
86. Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media / S. R. Pride // *Phys. Review. B*. – 1994. – V. 50. – P. 15678–15696.
87. Probstein R. F. Physicochemical hydrodynamics: An introduction / R. F. Probstein, 2nd Ed., Wiley & Sons, New York, 1994. – P. 416.
88. Thompson R. R. A note on the seismic-electric effect / R. R. Thompson // *Geophysics*. – 1939. – Vol. 4. – № 1. – P. 102-105.
89. Thompson R. R. The seismic-electric effect / R. R. Thompson // *Geophysics*. – 1936. – Vol. 1. – № 3. – P. 48-51.