

УДК 550.3

# Методика интерпретации и эффективность применения аппаратуры секторного акустического цементжа на месторождениях Удмуртской республики

**М.В. Искандиров**Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614068, Пермь, улица Букирева, 15. E-mail: mviskandirov@ungf.ru*(Статья поступила в редакцию 18 января 2023 г.)*

В статье представлен опыт применения акустической секторной аппаратуры для решения задач по оценке качества сцепления цементного камня (АКЦ) в заколонном пространстве на месторождениях Удмуртской республики. Кратко рассмотрена текущая методика интерпретации.

Ключевые слова: *акустическая секторная аппаратура, АКЦ, оценка качества цементирования, коэффициент качества цементирования, акустический импеданс цемента.*

DOI: 10.17072/psu.geol.22.4.354

## Введение

Достоверная оценка состояния цементного кольца играет важнейшую роль в процессе разработки и эксплуатации скважин. Оценка качества сцепления цементного камня по данным акустической цементометрии (АКЦ) позволяет обнаружить вероятные интервалы заколонных перетоков и своевременно выполнить ремонтно-изоляционные работы (РИР).

Стандартные приборы акустического каротажа интегрального типа, использующиеся для оценки качества цементирования, позволяют определять средние по периметру обсадной колонны характеристики сцепления цементного камня с обсадной колонной и породой, но не позволяют определять тип дефекта цементирования, оценивать его размеры и пространственную ориентацию. Кроме того, интегральные акустические цементометры имеют ограниченную чувствительность к объемным дефектам цементирования малых размеров, таким как вертикальный канал, трещина или разрывы сплошности в цементном кольце. Разрешающая способность интегральных акустических приборов к таким дефектам зависит от размеров зондов, динамического диапазона, рабочих частот, предела допустимой погрешности аппаратуры.

Основным направлением развития акустической цементометрии является создание секторной сканирующей аппаратуры. Конструктивно секторные приборы акустической цементометрии могут отличаться количеством акустических излучателей (от 1 до 9) и групп приемников (от 6 до 10), рабочей частотой излучателей (от 18 до 100 кГц), размерами зондов и количеством секторов, в которых определяется качество цементирования скважины. В высокочастотных (от 100 кГц) приборах используются секторные излучатели, а в низкочастотных (20 кГц) – один кольцевой излучатель (Белов и др., 2013).

Наибольшее распространение в России и, в частности, в Удмуртской республике для оценки качества цементирования получили однозондовые секторные приборы акустического каротажа, совмещенные со стандартными трехэлементными интегральными зондами, такие как МАК-9СК, МАК-4СК, комплекс АМК-2000СК и их модификации. Все эти приборы имеют одинаковую формулу зонда, отличаются только диаметром корпуса и возможностью работы в автономном режиме.

Приведенные в статье материалы ГИС выполнены прибором МАК-9СК, разработанным в ОАО НПФ «Геофизика» (г. Уфа).

Прибор акустического каротажа интегрально-сканирующего исполнения предназначен для контроля качества цементирования

ния обсадных колонн. Область применения – обсаженные скважины диаметром от 140 до 178 мм при температуре окружающей среды до 120°C и гидростатическом давлении 80 МПа, заполненные негазирующей жидкостью (Руководство, 1997). В модуле используются следующие зонды:

– интегральный зонд И1 1.0 П1 0.5 П2, частота 24 кГц;

– сканирующий зонд И(1–8) 0.4 П (1–8) частота 100 кГц.

На текущий момент рассматриваемая тема достаточно хорошо изучена, существует множество статей и научных работ как российских, так и зарубежных специалистов, но, несмотря на изобилие информации и имеющегося опыта, российскими геофизиками не выработано общего и единого подхода к интерпретации данных АКЦ. Есть отдельные методические пособия, созданные разработчиками аппаратуры; крупные добывающие компании имеют свои устоявшиеся градации и критерии оценки. Также есть утвержденные двусторонние договоренности между конкретным заказчиком и геофизической компанией.

Касаемо использования приборов МАК-9СК и МАК-4СК в Удмуртской республике. С 2018 г. данные приборы включены в программу проведения ГИС при строительстве скважин на месторождениях АО «Белкамнефть» им. А.А. Волкова, ПАО «Удмуртнефть» им. В.И. Кудинова, ООО «УДСнефть» и в других нефтедобывающих компаниях Удмуртской республики.

В статье приведены примеры комплексной обработки и интерпретации интегральной и сканирующей АКЦ. Выполнен анализ результатов, сделаны выводы об эффективности применения акустической сканирующей аппаратуры. Вся обработка выполнена в программном комплексе «СОНАТА» (разработчик «ФХС-ПНГ», г. Пермь).

### **Общий подход к методике интерпретации АКЦ в Удмуртской республике**

Большинство российских геофизических компаний для интерпретации АКЦ используют методические руководства, разрабо-

танные в ОАО НПФ «Геофизика» для приборов серии МАК-2, МАК-9 (Методическое, 1997; 2011). Эти методические руководства описывают способы и критерии оценки качества цементирования для портланд и гельцементов, которые наиболее часто применялись и применяются в России для обсадки скважин.

Методики основаны на исследованиях, в которых доказано, что при полном затвердевании цементного кольца пороговые значения коэффициента затухания для портландцемента составляют примерно 40 Дб/м, а для гельцемента – 27 Дб/м.

Хорошим качеством цементирования считается 80 % от порогового значения (Белов и др., 2013), а значения, принятые для отсутствия сцепления, всегда стандартны и определены в необсаженных моделях.

При интерпретации контакта цемента с колонной к вышеупомянутым методикам в Удмуртской республике в силу «устоявшихся традиций» дополнительно добавлена градация с «плохим» сцеплением. Диапазон, попадающий под «отсутствие сцепления» и верхнее значение для «сплошного контакта», неизменен.

Подход к интерпретации контакта цемента с породой однозначно не определен среди российских геофизических компаний, и в большинстве случаев при ухудшенном контакте цемента с колонной, контакт с породой устанавливается как неопределенный; при сплошном первом контакте контакт с породой устанавливается как сплошной.

Безусловно, важную роль в интерпретации играет опыт интерпретатора. Сюда можно отнести визуальную оценку фазокорреляционных диаграмм (ФКД). Субъективная оценка материала без опоры на расчетные количественные параметры приводит к искажению результатов.

Вкратце, обобщая вышесказанное, текущие граничные значения для интерпретации АКЦ, используемые в Удмуртской республике, можно представить в виде табл. 1 по параметру коэффициента затухания и интервального времени пробега продольной волны.

Таблица 1. Параметры коэффициента затухания и интервального времени пробега продольной волны

Цемент-колонна	Цемент-порода	Цемент 1.8 г/см	Цемент 1.6 г/см	
		Коэффициент затухания AlphaK, дБ/м		Время продольной волны DTK, мкс
Отсутствие	Неопределённо	0–5	0–5	178–190
Плохой		5–15	5–12	178–190
Частичный		15–30	12–21	178–190
Сплошной	Сплошной	Более 30	Более 21	0<DTK<350
	Неопределённо			DTK > 350
	Сплошной	-10< AlphaK<40		DTK = DTP
Неопределённо	Неопределённо	Интервалы перфорации, ФКД искажено влиянием уровня жидкости		

Появление новых типов цемента для обсадки эксплуатационных колонн потребовало не только совершенствования геофизической аппаратуры, но и изменения подхода к методике обработки и интерпретации данных акустической цементометрии. Использование легких пеноцементов для обсадки скважин сводит на нет применение для интерпретации АКЦ вышеперечисленных методик.

Отсутствие лабораторных данных об акустических параметрах цемента значительно усложняет процесс интерпретации материала и в подавляющем большинстве случаев сводится к использованию вышеупомянутых граничных значений. В результате возникают спорные ситуации, когда геофизики занижают оценку качества цементирования в интервале облегченных цементов. В свою очередь это приводит к штрафным санкциям к подрядчику, отвечающему за цементирование.

Крупные компании, предоставляющие услуги по цементированию колонн, особенно зарубежные, начали предоставлять данные по акустическому импедансу цемента, которые получены в лабораторных условиях. Акустический импеданс пропорционален плотности и скорости упругой волны, его можно получить, модифицировав палетку для оценки прочности цементного камня, где он является функцией от коэффициента затухания и толщины обсадной колонны (Шумилов, 2019).

Появление акустического импеданса как нового параметра для обработки и интерпретации АКЦ подтолкнуло геофизические компании к выработке новых критериев оценки, а также стандартизации методик и граничных значений.

Предложенная John M. Rutledge методика по переходу от декрементов затухания, коэффициента затухания и акустического импеданса к общему коэффициенту, или индексу качества цементирования (ККЦ), была успешно реализована в программном комплексе «СОНАТА». Программный комплекс «СОНАТА», используемый для обработки и интерпретации данных как интегральной, так и сканирующей акустики, позволяет рассчитывать динамические параметры волны по колонне, в том числе и акустический импеданс цемента с учетом толщины стенки колонны, далее переходить к более универсальному коэффициенту качества цементирования (ККЦ).

При переходе к такому параметру, как ККЦ, все сводится к решению уравнения, представленному в табл. 2, где расчётные данные – это значения динамических параметров, полученных в результате обработки, отсутствие сцепления – это значение при полном отсутствии контакта цемента, сплошной контакт – это значение при сплошном контакте.

Граничные значения параметра коэффициента качества цементирования не зависят от типа цемента и могут быть использованы как для интерпретации интегральной, так и для сканирующей акустики.

Методика интерпретации с использованием ККЦ внедрена и успешно используется при обработке и интерпретации АКЦ на месторождениях Удмуртской республики. Исходя из табл. 1, пропорционально рассчитаны граничные значения для ККЦ для плохого и частичного контакта. На данный момент все можно представить в виде табл. 3.

Таблица 2. Обозначения в тексте

Расчет через декремент и коэффициент затухания	Расчет через акустический импеданс
$K_{КЦ} = \frac{\text{Декремент}_{\text{расчет}} - \text{Декремент}_{\text{отсутствие}}}{\text{Декремент}_{\text{сплошной}} - \text{Декремент}_{\text{отсутствие}}}$	$K_{КЦ} = \frac{\text{Импеданс}_{\text{расчет}} - \text{Импеданс}_{\text{раствора}}}{\text{Импеданс}_{\text{цемент}} - \text{Импеданс}_{\text{раствора}}}$

Таблица 3

Цемент-колонна	Цемент-порода	ККЦ	Время продольной волны ДТК, мкс
Отсутствие	Неопределённо	0–0.1	178–190
Плохой		0.1–0.4	178–190
Частичный		0.4–0.8	178–196
Сплошной	Сплошной	0.8–1.0	0<ДТК<350
	Неопределённо		ДТК > 350

Для обработки и интерпретации данных секторной акустики также используется ККЦ цементирования, но полученный по среднему декременту затухания или по среднему акустическому импедансу по секторам. Благодаря наличию восьми секторов в секторном зонде появляется возможность визуализировать результаты интерпретации в виде цветовой карты, которая отражает состояние контакта цементного кольца с эксплуатационной колонной по ее периметру и позволяет определить размеры дефектов цементирования, а также их пространственную ориентацию относительно апсидальной плоскости скважины.

Изначально для визуализации использовалась цветовая палитра декрементов затухания по секторам, но так как значения декрементов зависят от плотности цемента, а также от диаметра колонны, интенсивность цвета сильно изменялась в зависимости от скважинных условий, что вводило заказчика в заблуждение.

### Примеры скважин с использованием аппаратуры МАК-9СК

В качестве конкретного примера для анализа выбрана одна из скважин Удмуртской республики, цементирование которой осуществлялось с привлечением зарубежного подрядчика.

Данная скважина выбрана по причине того, что при цементации использованы разные

типы цементов, имеется полная информация о типах используемых цементов, а также лабораторные испытания, при которых получены значения акустического импеданса при полном затвердевании цементной смеси. Характеристики цементного раствора приведены в табл. 4.

Технические данные по скважине: обсадная колонна – 146 мм, толщина стенки – 7.7 мм, башмак колонны на глубине 1490 м, максимальный угол наклона в скважине составляет 44°.

Наличие угла в скважине также повышает требования к центрации приборов, особенно секторных и сканирующих зондов, так как сильная децентрация приборов может внести дополнительные погрешности в измерения и в конечном итоге повлиять на качество проведения ГИС. Контроль центрации прибора МАК-СК осуществлялся по сопоставлению времён прихода волны по колонне, разница по секторам не превышала 20 мкс, это позволяет исключить влияние центрации прибора на расчет динамических параметров по секторам.

На рис. 1 представлены фрагменты комплексной обработки и интерпретации данных акустической интегральной и секторной цементометрии МАК-9СК, а также данные гамма-гамма цементометрии. Интерпретация АКЦ выполнена с учетом имеющихся данных по акустическому импедансу цемента.

Таблица 4. Характеристика цементного раствора

Проектный интервал, м	Тип цемента	Плотность цемента, г/см <sup>3</sup>	Объем цемента, м <sup>3</sup>	Импеданс, MRayl
Встречный цемент	Тяжелый цемент	1.9 г/см <sup>3</sup>	3	6.2
0–220	Вспененный реологический буфер	1.45 г/см <sup>3</sup>	6	3.5–4
220–930	КЭП+Пеноцементный раствор	1.35 г/см <sup>3</sup>	19	3.5–4
930–1140	Пеноцементный раствор	1.7 г/см <sup>3</sup>	5.7	5.4
1140–1480	Тяжелый цемент	1.95 г/см <sup>3</sup>	9.2	6.2

В верхнем интервале отмечается интервал свободной колонны с полным отсутствием сцепления цементного камня с колонной, интервал можно использовать в качестве опорного для оценки правильности работы прибора. Обработка и интерпретация интегральной и сканирующей АКЦ дают одинаковые результаты при определении уровня сцепленного цемента, также данные соотносятся с данными гамма-гамма плотномера.

Интервал с облегченным цементом плотностью 1.35 г/см<sup>3</sup>, по данным обработки секторного АКЦ, имеет более низкие значения ККЦ, что связано с неравномерным сцеплением цемента цементного камня по периметру колонны. Такой же эффект отмечается и в интервале с плотностью цемента 1.7 г/см<sup>3</sup>. На расчетных динамических параметрах интегрального зонда ухудшения сцепления цементного камня по периметру колонны никак не отмечаются. В целом можно сказать, что в карбонатном разрезе интегральный зонд МАК-9СК не чувствителен к дефектам цементного камня даже при дефектах с раскрытостью порядка 90°.

На рис. 2 представлены фрагменты обработки и интерпретации данных акустической интегральной и секторной цементометрии МАК-9СК до и после проведения ГРП. Для контроля проведения работ выполнены замеры до и после проведения ГРП, кросс-дипольной акустики АВАК-11 в комплексе с оценкой качества сцепления цементного камня прибором МАК-9СК. Технические данные: интервалы перфорации в интервале 1499–1516 м, обсадная колонна – 146 мм, интервалы закачки проппанта – 1499–1516 м, давление образования трещины – 208 атм.

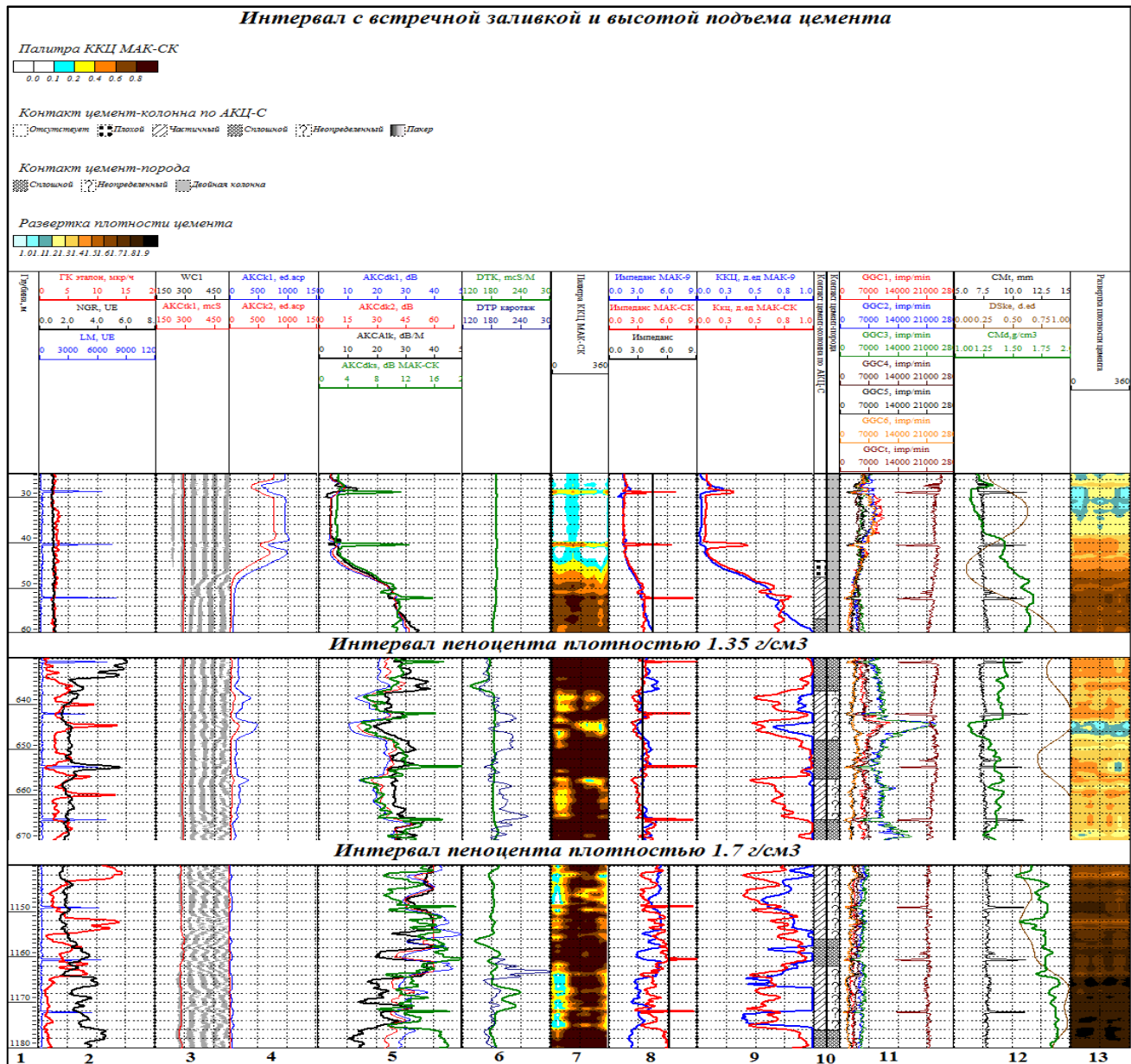
По данным кросс-дипольного каротажа, отмечается увеличение анизотропии и энергии анизотропии в интервалах перфорации и ниже, что косвенно говорит об успешности проведения ГРП, а также о распространении трещины до глубины 1520 м. По данным секторной и интегральной цементометрии, нарушение цементного камня не отмечается, расчетные динамические параметры практически не изменяются. Работы по проведению ГРП никак не повлияли на сцепление цементного камня.

На рис. 3 представлены фрагменты комплексной обработки и интерпретации данных акустической интегральной и секторной цементометрии МАК-9СК, а также данные гамма-гамма цементометрии. В интервале обработки представлены породы Верейского горизонта, состоящие из чередования аргиллита и продуктивного известняка. По данным акустической интегральной и секторной цементометрии, контакт цемента с колонной и породой однозначно интерпретируется как сплошной.

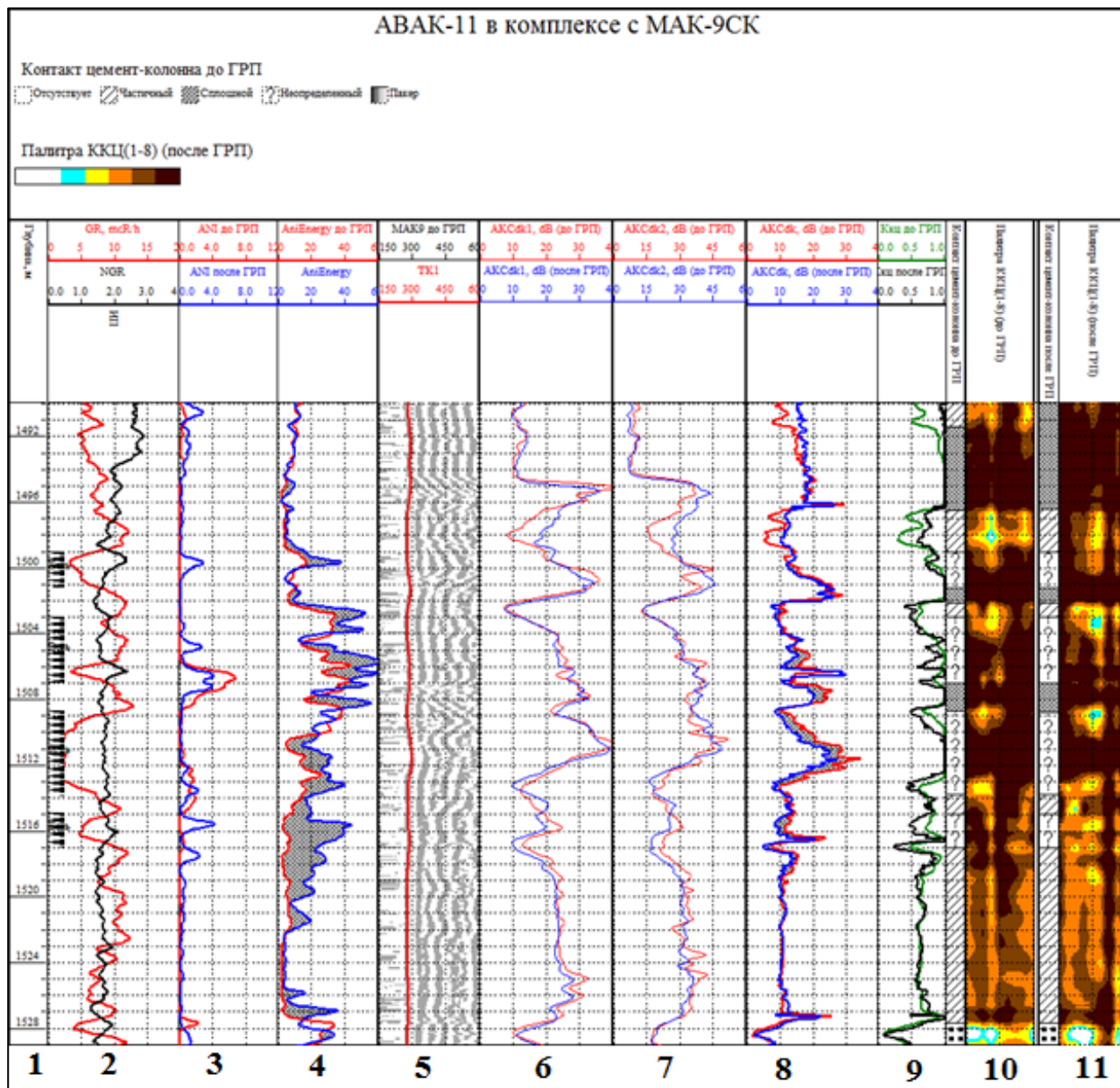
При последующем освоении скважины был получен заколонный переток с глубины 1554 м к интервалу перфорации. Данные, подтверждающие наличие перетока, представлены на рис. 4, комплекс по определению профиля притока и источника обводнения выполнен при работе струйным насосом, переток однозначно диагностируется на данных высокочувствительной термометрии и спектральной шумометрии.

Конкретно в данном случае, при хорошем сцеплении цемента с колонной, заколонный переток мог возникнуть в результате воздей-

ствия перфорации, а также между цементом и породой.



**Рис. 1.** 1 – глубина; 2 – методы открытого ствола и локатор муфт; 3 – ФКДІ интегрального зонда; 4 – амплитуды сигнала по интегральном зондам; 5 – нормализованные в соответствии с длиной зонда декременты затухания и коэффициент затухания; 6 – интервальное время пробега продольной волны в колонне и открытом стволе; 7 – цветовая палитра коэффициента качества цементирования по МАК-СК; 8 – расчетный акустический импеданс цемента; 9 – коэффициент качества цементирования; 10 – контакт цемент-колонна, цемент-порода; 11 – исходные данные ГГЦ; 12 – расчетные данные ГГЦ; 13 – цветовая палитра селективных плотностей по ГГЦ



**Рис. 2.** 1 – глубина; 2 – методы открытого ствола и интервалы перфорации; 3 – анизотропия, по данным АВАК-11; 4 – энергия анизотропии, по данным АВАК-11; 5 – ФКД интегрального зонда, прибор МАК-9СК; 6, 7 – декременты затухания интегральных зондов прибора МАК-9СК; 8 – средний декремент затухания по сканирующему зонду; 9 – ККЦ по сканирующему зонду; 10, 11 – качество сцепления и палитра коэффициента качества цементирования по сканирующему зонду

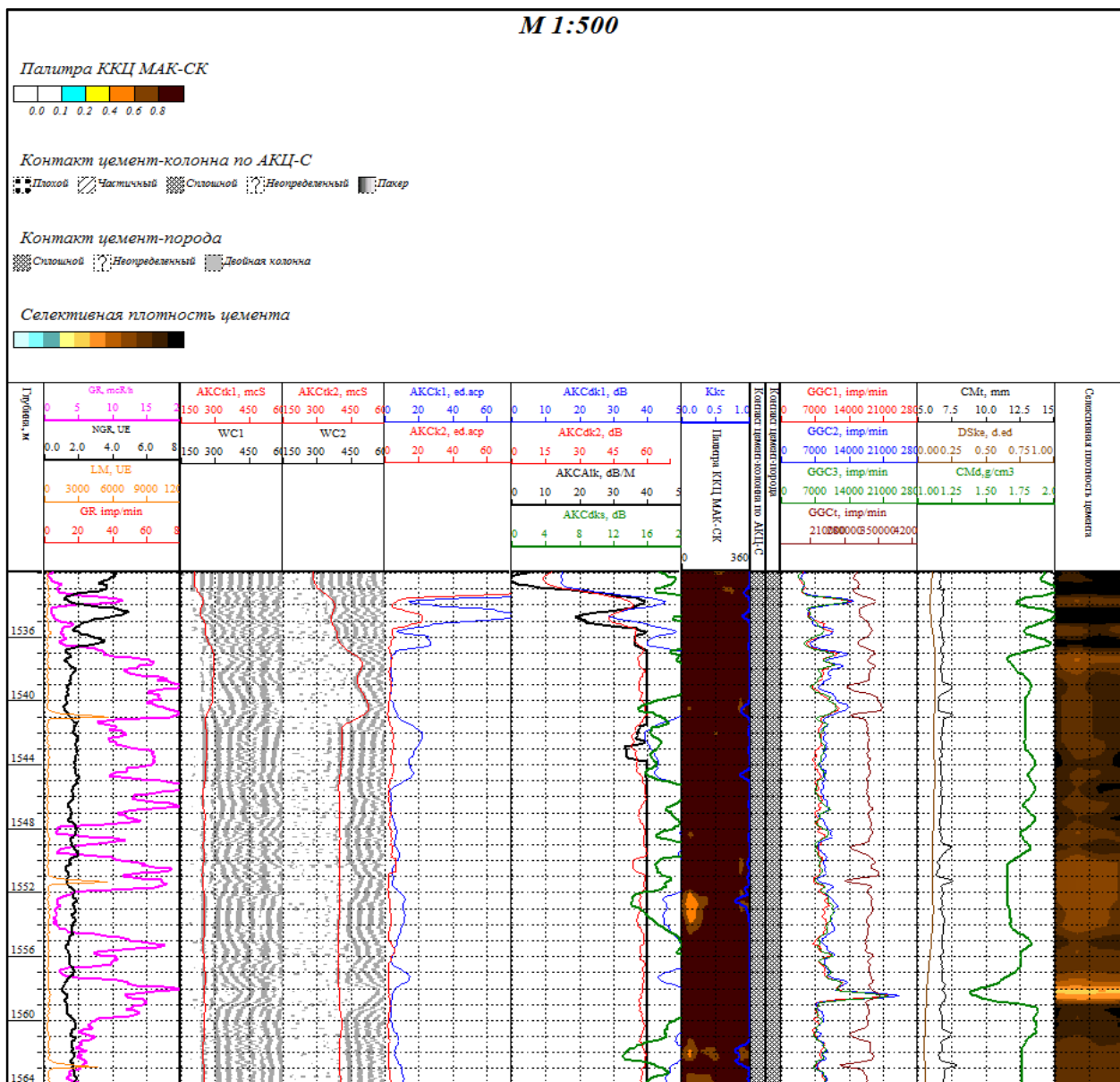


Рис. 3. Фрагменты комплексной обработки и интерпретации данных акустической интегральной и секторной цементометрии МАК-9СК, а также данные гамма-гамма цементометрии.



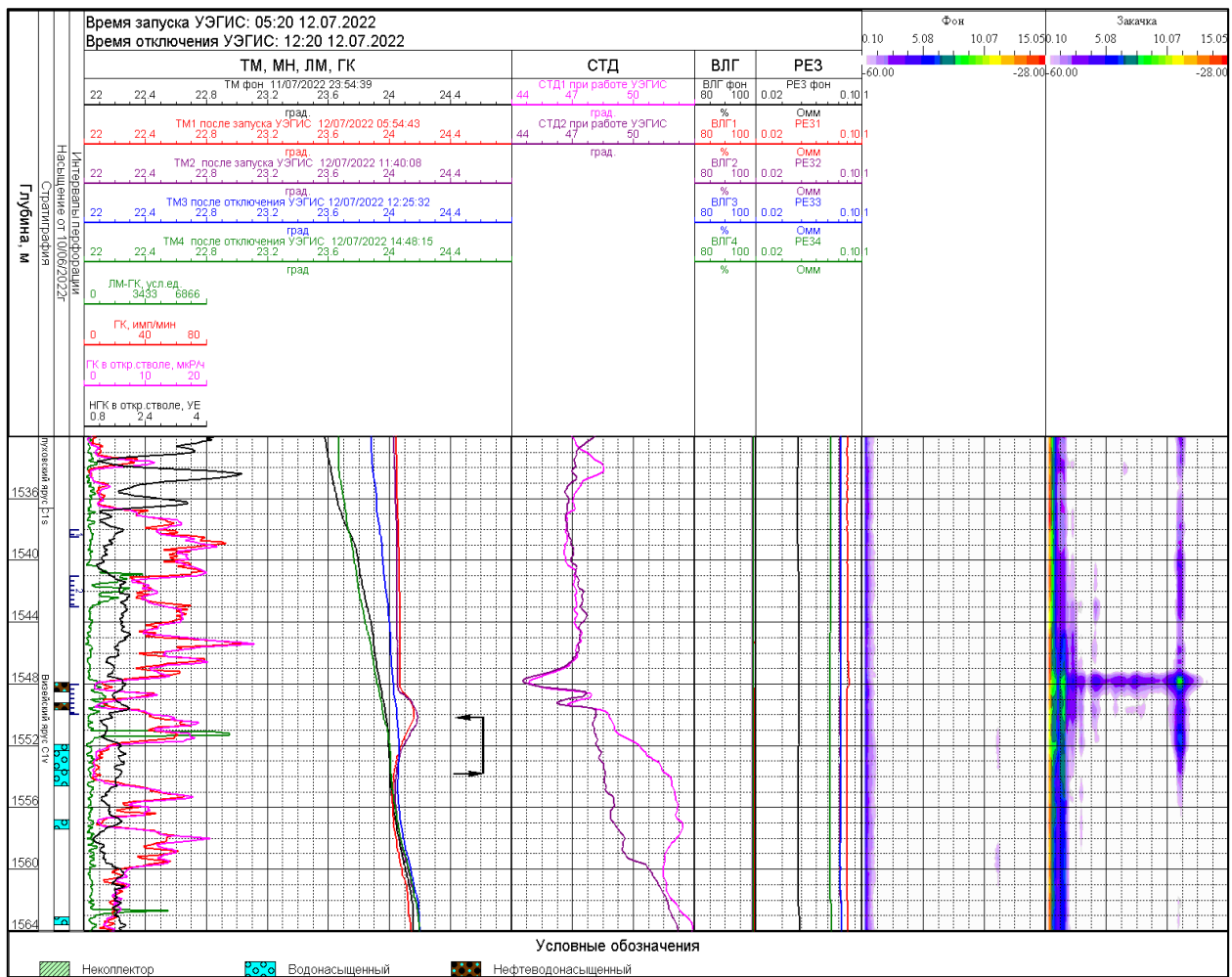


Рис. 4. Данные, подтверждающие наличие заколонного перетока с глубины 1554 м

## Выводы

Опыт использования секторной акустики показывает более высокую точность и чувствительность к дефектам цементирования малых размеров, при оценке качества сцепления цементного камня, по сравнению со стандартной интегральной акустической аппаратурой. Также позволяет фиксировать дефекты в цементном кольце в интервалах высокоскоростных пород, дает возможность количественной оценки состояния цементирования. Сопоставление цветных карт акустической и гамма-цементометрии повышает достоверность идентификации типа дефекта. Коэффициент качества, рассчитанный по данным сканирующего зонда в интервалах ухудшенного сцепления цементного камня, имеет более низкие значения в сравнении с расчетом по интегральному зонду.

Использование различных облегченных цементных растворов для обсадки колонн

требует применения для интерпретации АКЦ реальных свойств цемента, а использование стандартных граничных значений для декрементов и коэффициента затухания приводит к искажению качества цементирования. Использование акустического импеданса цемента для интерпретации АКЦ позволяет повысить объективность работ.

Значение ККЦ может выступать в качестве общего единого критерия для оценки АКЦ независимо от типа используемой аппаратуры и типов цемента.

Наметившаяся тенденция на облегчение тампонажных растворов, когда импеданс цемента по своим значениям приближается к импедансу раствора, заполняющего скважину, будет вносить ограничения на применение как интегральных, так и сканирующих акустических зондов.

**Библиографический список**

*Руководство по эксплуатации МАК-9СК* ОАО «НПФ Геофизика». Уфа. 1997.

*Методическое руководство по компьютерной технологии контроля технического состояния и качества цементирования обсадных колонн нефтегазовых скважин.* // НПФ «Геофизика». Уфа. 1997.

*Методическое руководство по интерпретации данных, получаемых при контроле качества цементирования нефтегазовых скважин модулями акустического каротажа интегрального и сканирующего типа, входящими в комплексы АМК-2000М и АМК-2000СК* // НПФ «Геофизика». Уфа. 2011.

*Шумилов А.В. Методика контроля качества цементирования по акустическому импедансу* // Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь. 2019.

*Белов С.В., Гладкий С.Л., Ташкинов И.В., Шумилов А.В. Секторный акустический каротаж – проблемы и пути развития* // Геофизика, Пермь. 2013.

*Стандартизация интерпретации акустического контроля цементирования с учетом свойств цемента* // И.В. Ташкинов, А.В. Шумилов // Журнал Геофизика, Пермь. 2016.

*John M. Rutledge. Method for cement evaluation using acoustical logs* // U.S. Patent 5036496. Chevron Research And Technology Company <http://www.fxc-png.ru>.

## The Effectiveness of the Use of Scanning Acoustic Cementation Equipment in the Oil Fields of the Udmurt Republic

**M.V. Iskandirov**

Perm State University

15, Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: [mviskandirov@ungf.ru](mailto:mviskandirov@ungf.ru)

The article presents the experience of using the acoustic sector-scanning equipment to solve various problems of assessing the quality of cement stone adhesion (ACC) in the column space at the deposits of the Udmurt Republic. The interpretation technique is also briefly considered.

Key words: *acoustic scanning equipment; ACC; cementation quality assessment; cementation quality coefficient; acoustic impedance of cement.*

**References**

*Rukovodstvo po ekspluatatsii MAK-9SK [MAK-9SK. Operation Manual].* JSC NPF Geofizika (in Russian)

*Metodicheskoe rukovodstvo po kompyuternoy tekhnologii kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya i kachestva tsementirovaniya obsadnykh kolonn neftegazovykh skvazhin [Methodical guide on computer technology for control of technical condition and quality of cementation of oil and gas well casing strings].* NPF «Геофизика». Ufa. 1997. (in Russian)

*Methodical guide for interpretation of data obtained during quality control of oil and gas well cementing by modules of acoustic logging of integral and scanning type, included in the complexes АМК-2000М and АМК-2000СК.* NPF «Геофизика». Ufa. 2011. (in Russian)

*Shumilov A.V. 2019. Metodika kontrolya kachestva tsementirovaniya po akusticheskomu im-*

*pedansu [Methodology of cementing quality control by acoustic impedance].* Perm State University, Perm. 2019. (in Russian)

*Belov S.V., Gladkiy S.L., Tashkinov I.V., Shumilov A.V. 2013. Sektorny akusticheskiy karotazh – problemy i puti razvitiya [Sector acoustic logging - problems and ways of development].* Geofizika. 5:51-57. (in Russian)

*Tashkinov I.V., Shumilov A.V. 2016. Standartizatsiya interpretatsii akusticheskogo kontrolya tsementirovaniya s uchotom svoystv tsementa [Standardization of interpretation of acoustic control of cementing taking into account the cement properties].* Geofizika. 5:62-67. (in Russian)

*John M. Rutledge. Method for cement evaluation using acoustical logs.* U.S. Patent 5036496. Chevron Research And Technology Company.