

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.832.44

Опыт применения кросс-дипольного акустического каротажа для выделения газоносных пластов в терригенных и карбонатных разрезах месторождений России**К. А. Воронов^{a,b}, Р. В. Григорьев^b, Л. А. Воронова^a, Р. Н. Абдуллин^a,
А. Р. Рахматуллина^a, С. А. Жилин^{c, d}**^a Научно-техническое управление ООО «ТНГ-Групп»
423232, Бугульма, ул. Никитина, 12а^b К(П)ФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий
420111, Казань, Кремлевская, 4/5^c Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «ТАТНЕФТЬ» им. В. Д. Шашина
423462, Альметьевск, ул. Советская, 186А^d Бугульминский филиал Казанского национального исследовательского технологического университета

423243, Бугульма, ул. Красноармейская, 9. E-mail: voronov.ka@tng.ru

(Статья поступила в редакцию 03.09.2025 г.)

Актуальной проблемой остается выявление газонасыщенных коллекторов в сложных разрезах, где стандартные геофизические исследования скважин (ГИС) малоэффективны. Методика кросс-дипольного акустического каротажа (КДА) основана на анализе соотношения нормированных времен пробега продольной (DTCO) и поперечной (DTSH_XX) волн. Результаты КДА сопоставлялись с данными стандартного комплекса ГИС и ядерно-магнитного каротажа (ЯМК). Цель работы – оценить эффективность КДА для диагностики газонасыщения в коллекторах России. Установлено, что превышение DTCO над DTSH_XX является надежным признаком газа. Метод показал высокую чувствительность в терригенных и карбонатных коллекторах, что подтверждено опробованием (MDT). КДА рекомендован для включения в комплекс ГИС при поиске газовых залежей.

Ключевые слова: *кросс-дипольный акустический каротаж, КДА, газонасыщенные коллекторы.*

DOI: 10.17072/psu.geol.25.1.96

Введение

В данной работе обобщен опыт применения метода кросс-дипольного акустического каротажа (КДА) для решения практической задачи идентификации газонасыщенных коллекторов в реальных скважинных условиях (Абдуллин и др., 2024; Золоева, 2004; Ивакин и др., 1978). В основе подхода лежит анализ данных КДА, а именно нормированных интервальных времен пробега продольной (DTCO) и поперечной (DTSH_XX) волн относительно реперных интервалов.

Работа выполнена на основе реальных данных, зарегистрированных с помощью многозондового кросс-дипольного сканера Sonic Scanner (Schlumberger) в разрезах скважин, вскрывающих как терригенные, так и карбонатные отложения.

Методика. Физические основы

Методической основой нашего опыта является анализ соотношения нормированных интервальных времен пробега продольной и поперечной волн. Его физическое обоснова-

© Воронов К. А., Григорьев Р. В., Воронова Л. А., Абдуллин Р. Н., Рахматуллина А. Р., Жилин С. А., 2026



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ние связано с известной зависимостью акустических свойств коллекторов от типа насыщающего флюида. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что для пород-коллекторов выполняется следующий ряд скоростей продольных волн (V_p): $V_p(\text{вода}) > V_p(\text{нефть}) > V_p(\text{газ})$. Для скоростей поперечных волн (V_s) наблюдается обратная закономерность: $V_s(\text{вода}) < V_s(\text{нефть}) < V_s(\text{газ})$. Следовательно, в газонасыщенных интервалах отношение V_p/V_s будет минимальным, а нормированное интервальное время продольной волны (DTCO) будет превышать нормированное интервальное время поперечной волны (DTSH_XX). Таким образом, инверсия в соотношении нормированных DTCO и DTSH_XX служит диагностическим признаком перехода к газонасыщенным зонам.

Применение этого принципа в скважинных условиях может осложняться влиянием ряда факторов, таких как наличие зоны проникновения фильтрата бурового раствора, низкие емкостные свойства, глинистость пород и погрешности измерений. Наш опыт показывает, что использование современных технологий широкополосного акустического каротажа, например Sonic Scanner, обеспечивающих высококачественную регистрацию как моно-, так и дипольных волн, позволяет минимизировать эти помехи и повысить надежность выделения газовых пластов (Симоненко, 2021).

Объекты исследований

Для демонстрации эффективности методики и обобщения опыта ее применения выбраны три скважины из разных нефтегазоносных провинций России, в двух из них газонасыщение коллекторов было впоследствии подтверждено прямыми измерениями модулем динамического испытателя (MDT) посредством отбора проб пластового флюида.

На рисунке 1 представлены результаты комплексной интерпретации данных КДА, стандартного комплекса ГИС и ЯМР (CMR) по интервалу сложнопостроенных терригенных газоносных отложений танопчинской свиты одного из месторождений Ямала.

Согласно сводному разрезу Северо-Тамбейского участка, интервал танопчинской свиты ТП1-13 представлен неравномерным чередованием полимиктовых песчано-алевритовых и глинистых горизонтов, меняющихся по площади и по разрезу с различными литологическими переходами, фациальными вариациями и внутрiformационными размывами. В расчлененных и слабовыраженных в разрезе пластах песчаники глинистые, плохо отсортированные. Присутствует растительный детрит, характерно обилие углей.

Трек 6 (ГК, СП, 2-НКТ). Низкие значения ГК (GK, красная) и отрицательная аномалия СП (PS, фикусия) четко указывают на интервалы чистых песчаников (коллекторов).

Трек 7 (Профилеметрия, АК, ГГК-П). Наблюдается характерный дефект пористости по нейтронному каротажу (КРNNK, черная) относительно пористости по плотностному каротажу (КП_ГГКП, фикусия). Этот признак (КРNNK < КП_ГГКП) косвенно подтверждает наличие газа в коллекторах. На глубине 2374 м схождение кривых КРNNK и КП_ГГКП маркирует положение газоводяного контакта (ГВК).

Трек 10 (Микрозонды). Характерное соотношение МПЗ (MPZ, красная) > МГЗ (MGZ, черная) в выделенных интервалах является надежным индикатором проницаемых коллекторов (зона проникновения) и дополнительно подтверждает результаты Трека 1 (Кошляк, 1986).

Трек 12 (КДА). Ключевой диагностический признак газа в данной работе. В интервалах коллекторов наблюдается явное превышение нормированного интервального времени пробега продольной волны (DTCO, синяя) над нормированным интервальным временем пробега поперечной волны (DTSH_XX, зеленая). Это соотношение $DTCO > DTSH_XX$ является прямым следствием газонасыщения и надежным индикатором газа. Схождение кривых DTCO и DTSH_XX на глубине 2374 м является индикатором газоводяного контакта, выделенного по акустическим данным.

Трек 13 (Волна Стоунли). Превышение измеренной кривой Стоунли (DTST, фук-

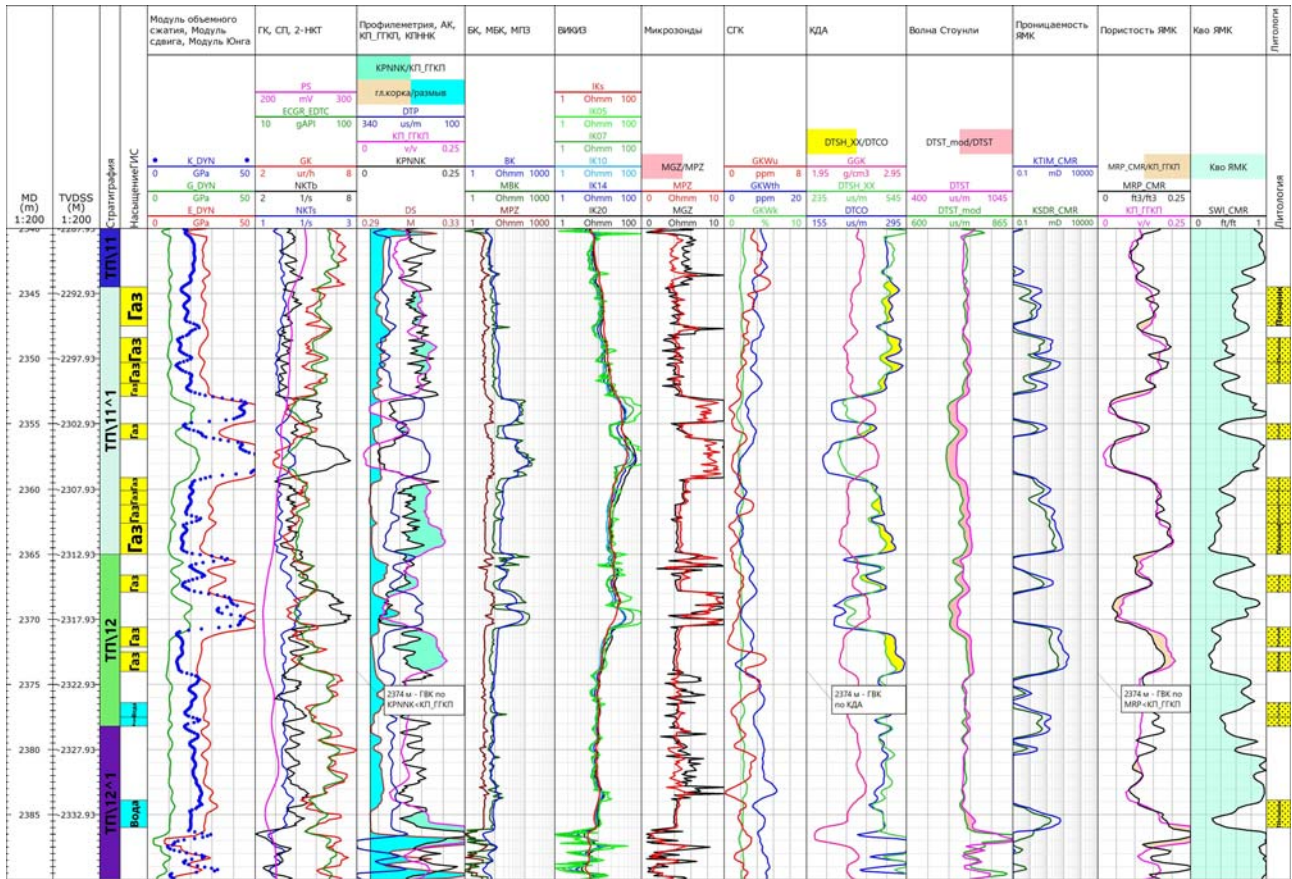


Рис. 1. Комплексная интерпретация данных КДА, стандартного комплекса ГИС и ЯМК (CMR) терригенных отложений танопчинской свиты Ямала

сия) над нормированной модельной кривой Стоунли (DTST_mod, зеленая) указывает на интервалы коллекторов. Наибольшее расхождение кривых DTST и DTST_mod, интерпретируемое как зоны повышенной проницаемости коллекторов, наблюдается в интервалах 2344,5–2374,5, 2376,8–2378,8, 2383,9–2386,2 м.

Трек 15 (Пористость ЯМК). Наличие дефекта пористости по данным ЯМК (MRP_CMR, черная) относительно пористости по плотностному каротажу (КП_ГГКП, фуксия) является еще одним независимым признаком газового эффекта в коллекторах (Джафаров, 2002). Исчезновение данного дефекта и схождение кривых MRP_CMR и КП_ГГКП на глубине 2374 м уверенно определяет положение ГВК.

Результаты обработки данных КДА (превышение нормированного интервального времени пробега продольной волны DTCSO над интервальным временем пробега поперечной волны DTSH_XX) убедительно идентифицировали интервалы газонасыщения,

что полностью согласуется с наблюдаемыми дефектами пористости (MRP_CMR<КП_ГГКП, КРNNK<КП_ГГКП), признаками коллектора (низкие показания GK, отрицательная аномалия PS, MPZ>MGZ, DTST_mod<DTST). Данные КДА доказали свою высокую диагностическую ценность для идентификации газовых залежей в представленном терригенном разрезе Ямала.

На рисунке 2 представлены результаты комплексной интерпретации данных КДА, стандартного комплекса ГИС, ядерно-магнитного каротажа (CMR) и опробование MDT по интервалу сложнопостроенных карбонатных газоносных отложений осинского горизонта одного из месторождений Восточной Сибири.

Разрез осинского горизонта сложен доломитами, известняками и их переходными разностями. В роли непроницаемых пропластков выступают как плотные карбонатные породы, так и прослои доломитизированных ангидритов и известковистых аргил-

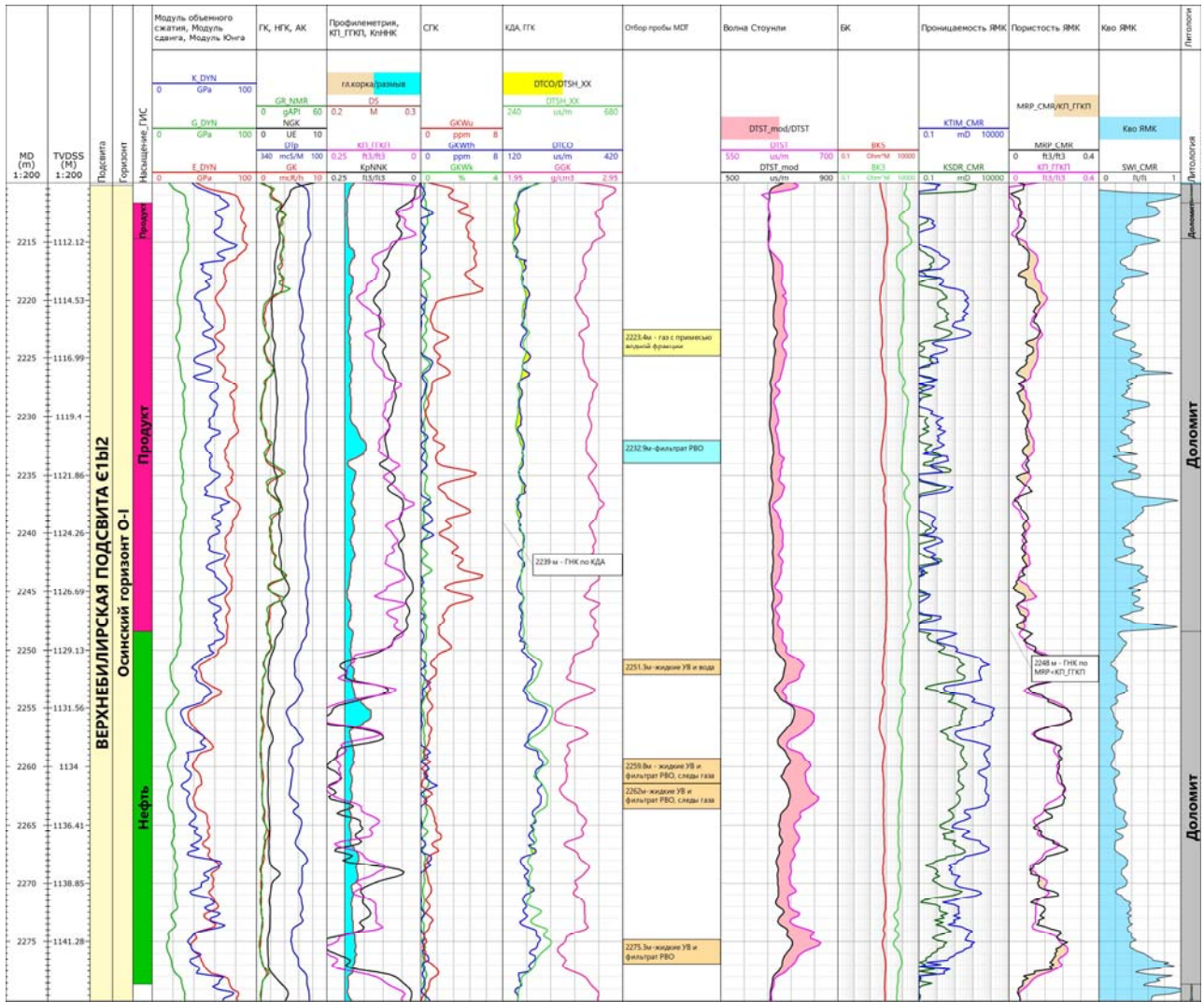


Рис. 2. Комплексная интерпретация данных КДА, стандартного комплекса ГИС, ЯМК (СМР) и отпробование MDT в карбонатных отложениях осинского горизонта O-I Восточной Сибири

литов. Данные рентгеноструктурного анализа показывают литологическую неоднородность пласта: его верхняя часть сложена преимущественно доломитовыми известняками, а в нижней части возрастает доля доломитов известковистых с повышенным содержанием сульфатных и глинисто-кремнистых минералов. По данным СГК (урановая составляющая), в интервалах 2210–2220, 2234–2250 м отмечено повышение урана, что свидетельствует о вторичной доломитизации карбонатных пород. Причем доломитизация способствует увеличению пористости: в верхнем интервале $K_p = 0,05–0,18$ у.ед., во втором – $K_p = 0,1–0,12$ у.ед.

Трек 7 (ГК, НГК). Интервалы развития карбонатных коллекторов уверенно диагностируются по низким значениям естественной радиоактивности (ГК, красная кривая) и

средним значениям кривой нейтронного гамма-каротажа (NGK, черная кривая).

Трек 8 (Профилеметрия, АК, ГГК-П). Наличие углеводородов в поровом пространстве проявляется в виде устойчивого дефекта нейтронной пористости (КРNNK, черная) относительно плотностной пористости (КП_ГГКП, фикусия) – признак газонасыщения, обусловленный низкой плотностью газа и его слабым воздействием на тепловые нейтроны.

Трек 10 (Кросс-дипольный акустический каротаж, КДА). Ключевым диагностическим критерием газонасыщения в данном исследовании выступает превышение кривой нормированного интервального времени пробега продольной волны (DTCO, синяя) над кривой нормированного времени пробега поперечной волны (DTSH_XX, зеленая).

Схождение кривых DTCO и DTSH_XX на глубине 2239 м определяет положение ГНК.

Трек 12 (Волна Стоунли). Коллекторские интервалы маркируются превышением измеренной кривой Стоунли (DTST, фиуксия) над нормированной модельной кривой, рассчитанной для непроницаемой среды (DTST_mod, зеленая). Расхождение нормированных кривых DTST и DTST_mod, интерпретируемое как зоны повышенной проницаемости, наблюдается в интервале 2216–2278,6 м.

Трек 15 (Пористость ЯМК). Дефект пористости по данным ЯМК (MRP_CMР, черная) относительно пористости по плотностному каротажу (КП_ГГКП, фиуксия) представляет собой независимый признак, маркирующий наличие газа в коллекторах. По исчезновению дефекта пористости MRP_CMР относительно КП_ГГКП на глубине 2248 м выделяется газонефтяной контакт (ГНК).

Трек 11 (Результаты опробования MDT). Опробование пластов модульным испытателем пластов на кабеле (MDT) верифицировало продуктивность выделенных интервалов и подтвердили прогноз:

- 2223,4 м: приток газа, с примесью водной фракции (вероятно, фильтрата РВО);
- 2232,9 м: приток водной фракции (вероятно, фильтрат РВО). Признаков УВ в притоке не обнаружено;
- 2251,3 м: приток фракции жидких УВ и водной фракции (вероятно, фильтрат РВО);
- 2259,8 м: фракция жидких УВ с примесью фильтрата РВО, также отмечаются следы газа, вероятно, газ разгазации, за счет повышенной депрессии на пласт;
- 2262 м: приток фракции жидких УВ с примесью фильтрата РВО, также отмечаются следы газа, вероятно, газ разгазации, за счет повышенной депрессии на пласт;
- 2275,3 м: фракция жидких УВ с примесью фильтрата РВО;
- 2317 м: приток фракции воды (вероятно, фильтрат РВО).

Таким образом, надежность диагностики газонасыщения по данным КДА, основанной на расхождении нормированных акустических времен (DTSH_XX < DTCO), получила комплексное подтверждение. Выделенные

интервалы полностью согласуются с независимыми данными: дефектом пористости (КРNNK<КП_ГГКП), признаком наличия коллектора (DTST_mod<DTST) и что особенно важно – с прямыми результатами опробования (MDT). Полученный опыт подтверждает высокую эффективность методики КДА для выявления газовых залежей в сложных карбонатных резервуарах Восточной Сибири.

По MDT следы газа отмечаются на глубине 2262 м, по КДА ГНК выделяется на глубине 2239 м, по данным ЯМК-ГГКП ГНК – на глубине 2248 м. Принимая во внимание, что дефицит пористости по НК относительно КП_ГГКП прослеживается до глубины 2248 м, констатируем, что ГНК находится на глубине 2248 м.

Разные глубины ГНК, полученные нами, объясняются сложным строением залежи (трещиноватость, кавернозность пород, вторичная доломитизация и т.д.), а также различной информативной глубиной методов.

На рисунке 3 представлены результаты комплексной интерпретации данных КДА, стандартного комплекса ГИС, ядерномагнитного каротажа (CMR) и опробование MDT по интервалу сложнопостроенных карбонатных газоносных отложений Верхнебилирской подсвиты одного из месторождений Восточной Сибири.

Породы осинского горизонта Верхнебилирской подсвиты представлены доломитами, известняками и их переходными разновидностями. Непроницаемые пропластки, помимо карбонатных плотных пород, включают ангидриты доломитизированные и известковистые аргиллиты.

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, верхняя часть пласта представлена преимущественно известняками доломитовыми, нижняя – доломитами известковистыми с увеличением доли примесей преимущественно в виде сульфатов и глинистокремнистых минералов.

Трек 6 (ГК, 2-НКТ). Низкие показания ГК (ГК, красная кривая) и средние показания НКТ (НКТb, черная) однозначно определяют интервалы карбонатных коллекторов, кото-

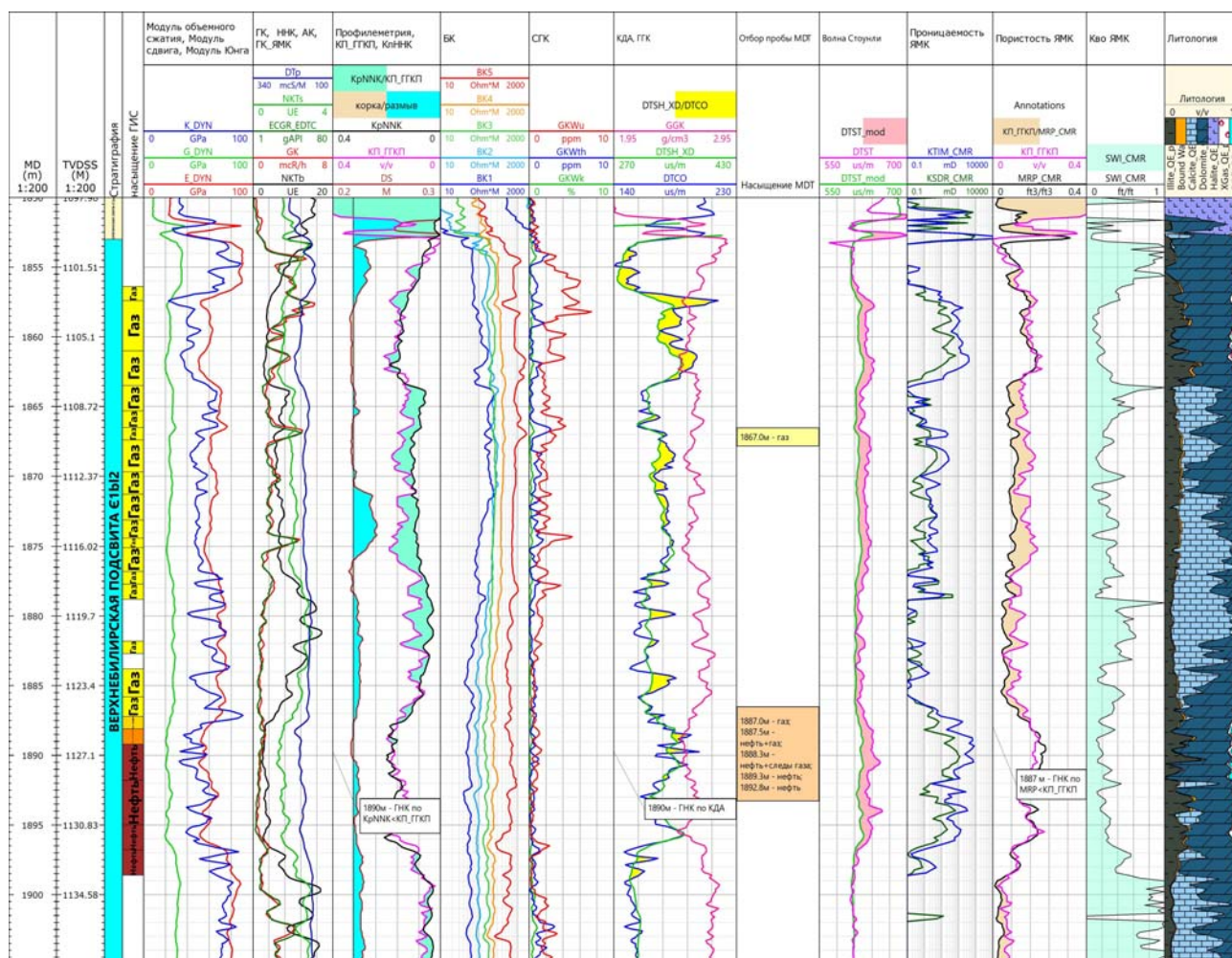


Рис. 3. Комплексная интерпретация данных КДА, стандартного комплекса ГИС, ЯМК (CMR) и опробование МДТ в карбонатных отложениях Верхнебилирской подсвиты Восточной Сибири

рые представлены преимущественно доломитами и известняками.

Трек 7 (Профилеметрия, АК, ГГК-П). Показания коэффициента пористости по плотностному каротажу (КП_ГГКП, фиолетовый) превышают относительно значения пористости по нейтронному (КРННК, черная). Данное различие КРННК < КП_ГГКП служит признаком газонасыщения в коллекторах. Исчезновение данного дефекта и схождение кривых КРННК и КП_ГГКП на глубине 1890 м уверенно определяет положение ГНК.

Трек 10 (КДА). Основным диагностическим признаком газа в данном исследовании выступает значительное превышение нормированного интервального времени пробега продольной волны (DTCO, синяя) над нормированным интервальным временем пробега поперечной волны (DTSN_XX, зеленая) в интервалах коллекторов. Это соотношение (DTCO > DTSN_XX) – прямое следствие

влияния газа и надежный индикатор газонасыщения. На глубине 1890 м схождение нормированных кривых DTCO и DTSN_XX маркирует положение газоводяного контакта (ГВК).

Трек 12 (Волна Стоунли). Превышение нормированной кривой Стоунли (DTST, фиолетовый) над модельной кривой Стоунли (DTST_mod, зеленая) маркирует интервалы коллекторов. Наибольшее расхождение кривых DTST и DTST_mod, интерпретируемое как зоны повышенной проницаемости, наблюдается в интервале 1856–1898 м.

Трек 14 (Пористость ЯМК). Дефект пористости по данным ЯМК (MRP_CMР, черная) относительно пористости по плотностному каротажу (КП_ГГКП, фиолетовый) величиной до 10 % представляет собой еще один независимый признак, указывающий на наличие газа в коллекторах. На глубине 1887 м схождение кривых MRP_CMР и

КП_ГГКП маркирует положение газово-нефтяного контакта (ГНК).

Трек 11 (Результаты MDT). Опробование пластов модульным испытателем пластов на кабеле (MDT) подтвердило продуктивность интервалов: на глубине 1867,0 и 1887,0 м зафиксирован приток газа с примесью водной фракции (около 10–15 %, вероятно, фильтрат РВО); на глубине 1887,5 м также получен приток газа и нефти с примесью водной фракции (около 10 %, вероятно, фильтрат РВО); на глубине 1888,3 м отобра на проба нефти, присутствуют следы газа; на глубине 1889,3 и 1892,8 м получен приток нефти с примесью водной фракции (около 15 %, вероятно, фильтрат РВО); на глубине 1927,5 м получен приток водной фракции, вероятно, фильтрат РВО (УЭС составило 0,28 Ом*м при 13°С). Таким образом, результаты MDT достоверно доказывают наличие притока газа именно в тех интервалах, где наблюдается превышение DTСO над DTSH_XX.

Диагностика газонасыщения по данным КДА, основанная на характерном превышении нормированного интервального времени пробега продольной волны DTСO над интервальным временем пробега поперечной волны DTSH_XX, получила комплексное подтверждение: выделенные по данному признаку интервалы полностью согласуются с дефектом пористости (MRP_CMР<КП_ГГКП, KPNNK<КП_ГГКП), классическими признаками коллектора (низкий ГК, средние значения НКТ, DTST>DTST_mod) и прямым подтверждением MDT. Полученные результаты убедительно подтверждают высокую диагностическую ценность КДА для идентификации газовых залежей в карбонатных разрезах Восточной Сибири.

Заключение

Проведенные исследования и успешный опыт применения кросс-дипольного акустического каротажа подтверждают высокую эффективность этой технологии для достоверного выделения газонасыщенных интервалов.

Выводы

1. Для терригенных коллекторов аномалия по данным КДА в виде устойчивого превышения нормированного DTСO над DTSH_XX является надежным диагностическим признаком газонасыщения и хорошо согласуется с данными по дефекту общей пористости ядерно-магнитного каротажа относительно пористости по плотностному каротажу (MRP_CMР<КП_ГГКП).

2. Для карбонатных коллекторов метод КДА также показал свою высокую чувствительность к наличию газа, что особенно ценно в условиях неоднородности пустотного пространства и сложностей интерпретации стандартных методов ГИС.

3. Надежность методики подтверждена прямыми испытаниями пластов (MDT) на двух из трех исследованных объектах.

4. Полученный опыт позволяет рекомендовать использование кросс-дипольного акустического каротажа в качестве дополнительного элемента к комплексу ГИС при поисках газовых залежей в сложнопостроенных геологических объектах.

Библиографический список

- Абдуллин Р. Н., Рахматуллина А. Р., Баженов В. В., Шумилов А. В. Возможности кросс-дипольного акустического каротажа при оценке характера насыщения // Каротажник. 2024. № 5(331). С. 24–30. EDN: VOBMSS
- Джафаров И. С., Сынгаевский П. Е., Хафизов С. Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. М.: Химия, 2002. С. 132–140.
- Золоева Г. М. Акустические методы исследования скважин: учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. С. 47–52.
- Ивакин Б. Н., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. Акустический метод исследования скважин. М.: Недра, 1978. С. 63–69.
- Кошляк В. А., Султанов Т. А. Изучение нефтеотдачи пластов методами промысловой геофизики. М.: Недра, 1986. С. 140–163.
- Симоненко Е. П., Долгирев С. С., Кириченко Ю. В. Возможности анализа и практического использования упругих свойств горных пород при изучении низкопоровых карбонатов // Каротажник. 2021. № 6(312). С. 74–78.

Experience in the Application of Cross-Dipole Acoustic Logging for the Separation of Gas-Bearing Deposits in Terrigenous and Carbonate Sections of Russian Deposits

K.A. Voronov^{a,b}, R.V. Grigoriev^b, L.A. Voronova^a, R.N. Abdullin^a,
A.R. Rakhmatullina^a, S.A. Zhilin^{c,d}

^aScientific and Technical Management of TNG-Group LLC
12a Nikitina Str., Bugulma 423232, Russia

^bK(P)FU, Institute of Geology and Petroleum Technologies
4/5 Kremlevskaya Str., Kazan 420111, Russia

^cTatNIPIneft R&D Institute of the PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin
186A Sovetskaya Str., Almetyevsk 423462, Russia

^dBF FSBEI HE Kazan National Research Technological University
9 Krasnoarmeyskaya Str., Bugulma 423243, Russia

Problem of identification of gas-saturated reservoirs in complex sections, where standard geophysical well surveys (GIS) are ineffective, remains important for oil industry. The technique of cross-dipole acoustic logging (CDA) is based on the analysis of the ratio of the normalized travel times of longitudinal (DTCO) and transverse (DTSH_XX) waves. The results of the CDA were compared with data from the standard GIS complex and nuclear magnetic logging (NMR). The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of CDA for the diagnosis of gas saturation in reservoirs in Russia. It has been established that the excess of DTCO over DTSH_XX is a reliable sign of gas saturation. The modular dynamic testing (MDT) showed high sensitivity in terrigenous and carbonate reservoirs. CDA is recommended for inclusion in the GIS complex for searching for gas deposits.

Keywords: *cross-dipole acoustic logging, CDA, gas-saturated reservoirs*

References

Abdullin R.N., Rakhmatullina A.R., Bazhenov V.V., Shumilov A.V. 2024. Vozmozhnosti kross-dipol'nogo akusticheskogo karotazha pri otsenke kharaktera nasyshcheniya [Possibilities of cross-dipole acoustic logging in assessing the nature of saturation]. *Karotazhnik*. 5(331):24-30. (in Russian)

Dzhafarov I.S., Syngaevskiy P.E., Khafizov S.F. 2002. Primenenie metoda yadernogo magnitnogo rezonansa dlya kharakteristiki sostava i raspredeleniya plastovykh flyuidov [Application of nuclear magnetic resonance method for characterization of composition and distribution of reservoir fluids]. *Khimiya*. Moskva, pp. 132–140. (in Russian)

Zoloeva G.M. 2004. Akusticheskie metody issledovaniya skvazhin [Acoustic well logging methods].

Moskva, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, pp. 47–52 (in Russian)

Ivakin B.N., Karus E.V., Kuznetsov O.L. 1978. Akusticheskiy metod issledovaniya skvazhin [Acoustic well logging method]. Moskva, Nedra, pp.63-69. (in Russian)

Koshlyak V.A., Sultanov T.A. 1986. Izuchenie nefteotdachi plastov metodami promyslovoy geofiziki [Study of reservoir oil recovery using methods of production geophysics]. Moskva, Nedra, pp.140-143. (in Russian)

Simonenko E.P., Dolgirev S.S., Kirichenko Yu.V. 2021. Vozmozhnosti analiza i prakticheskogo ispol'zovaniya uprugikh svoystv gornykh porod pri izuchenii nizkoporovykh karbonatov [Possibilities of analysis and practical use of elastic properties of rocks in the study of low-porosity carbonates]. *Karotazhnik*. 6(312):74-78. (in Russian)