



## Pulsar

Малогабаритный прибор импульсной нейтрон-гамма спектрометрии для оценки фильтрационно-емкостных свойств коллекторов через обсадную колонну

**Schlumberger**

Новый прибор для независимой оценки минералогии, ФЕС коллекторов и мониторинга выработки пластов через колонну



## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

- Независимые исследования для поиска и характеристики пропущенных залежей УВ через обсадную колонну, выделения нефтенасыщенных и газонасыщенных коллекторов и оценки их ФЕС
- Разделение газонасыщенных коллекторов и плотных низкопористых пропластков путем совместной интерпретации измерений водородосодержания по тепловым нейтронам и макросечения рассеяния быстрых нейтронов
  - Достоверная оценка ФЕС благодаря учету минералогии и свойств матрицы при оценке пористости
  - Весовое содержание органического углерода ( $C_{\text{орг.вес, \%}}$ ) оценивается как разность между измеренной концентрацией углерода в породе и доли углерода, приходящегося на минералы (т.н. неорганический углерод)
  - Оценка объема нефти в породе по данным  $C_{\text{орг.вес, \%}}$
  - Выделение нефтегазонасыщенных интервалов-коллекторов в низкоомных пластах
  - Выделение нефтегазонасыщенных интервалов-коллекторов в условиях пресных пластовых вод или пластовых вод с неизвестной минерализацией
- Выделение коллекторов и оценка их ФЕС, определение уровней контактов через колонну в интервалах, где современный комплекс ГИС не регистрировался
  - Геохимия и минералогия высокой точности для литологического и седиментологического анализа, уточнения стратиграфической корреляции
  - Карбонаты: измерение весовых концентраций Ca, Mg, Fe, Mn и S позволяет с высокой точностью оценивать содержание в породе различных карбонатных минералов: кальцита, доломита, анкерита, сидерита и др.
  - Песчано-глинистые коллектора: измерение весовых концентраций Si, Al, Fe, K, Ca и Mg позволяет с

высокой точностью оценить содержание в породе кварца, полевых шпатов, слюд и глинистых минералов

- В результате обработки спектральных данных определяются весовые концентрации более чем 20 химических элементов с целью дальнейшей высокоточной оценки минералогии пород. Кроме того, возможно выделение из спектра дополнительных (специфических) элементов по специальному заказу
- Геохимические индексы для стратиграфической корреляции разрезов скважин
- Мониторинг выработки пластов-коллекторов при любой минерализации пластовых вод и конструкции скважины
- Компонентный состав флюидов в скважине при любом зенитном угле
- Выявление интервалов притока воды, заколонных перетоков воды
- Оценка качества гравийной набивки по данными спектрометрии
- Металлы для рудной разведки
- Проведение исследований без буровой установки

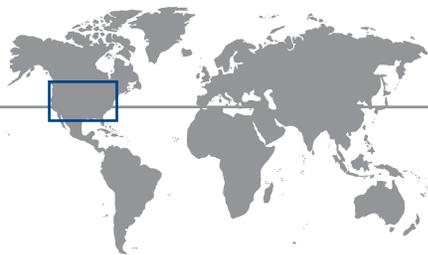
## ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА

- Высокопроизводительный импульсный генератор нейтронов (ИГН)
  - Специальная последовательность длинных и коротких импульсов позволяет выполнять четкое разделение регистрируемых спектров гамма-квантов неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов
  - Мощный поток нейтронов:  $3.5 \times 10^8$  нейтронов в секунду обеспечивает высокую точность измерений
- Детекторы нового типа
  - ближний и средний гамма-детекторы со сцинтилляторами из бромида лантана, легированного церием ( $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ )

- дальний гамма-детектор со сцинтиллятором из иттрий-алюминиевого перовскита (YAP)
- компактный счетчик быстрых нейтронов, расположенный рядом с генератором
- сцинтилляторы нового типа, фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и высокопроизводительная электроника, малочувствительные к повышенным температурам, обеспечивают регистрацию спектров высокого разрешения
- самая высокая скорость счета в индустрии
- нет стабилизационных источников
- калиброванные измерения весовых концентраций химических элементов: Al, Ca, Fe, Gd, K, S, Si, Ti, Ba, Cl, H, Mg, Mn, Na, Br, O, Cu. Возможно измерение и других элементов по специальному заказу
- Измерение  $C_{\text{орг.вес, \%}}$  в пластовых условиях
- Компенсированные за влияние скважины измерения водородосодержания по тепловым нейтронам и макросечение захвата тепловых нейтронов («сигма»)
- Одновременная регистрация временных и энергетических спектров
- Улучшенная точность оценки содержаний химических элементов из спектров позволяет получать данные отличного качества даже при повышенных скоростях регистрации
- Обширная база данных измерений в калибровочных блоках и математическое моделирование обеспечивают высокую точность измерений пластовых свойств в любых условиях
- Прибор совместим с компоновкой приборов ПГИ (PS Platform), малогабаритным АКЦ (SCMT), модульной компоновкой малогабаритных приборов ГИС с возможностью спуска через долото (ThruBit), а также – со скважинными тракторами
- Коррозионно-устойчив (соответствует NACE MR0175)

## Оценка ФЕС пластов-коллекторов

Pulsar\* – многофункциональный прибор импульсной нейтрон-гамма спектрометрии – первый в индустрии прибор, в котором реализовано измерение макросечения рассеяния быстрых нейтронов с целью достоверного выделения газонасыщенных коллекторов и оценки их ФЕС



### Пример применения

Разделение газонасыщенных и уплотненных интервалов песчано-глинистого пласта коллектора через колонну несмотря на толщину цемента более 5 см

#### **Задача: Отличить друг от друга низкопористые газонасыщенные и плотные интервалы песчано-глинистого коллектора**

На одном из месторождений США скважина диаметром 8¼ дюйма была обсажена колонной с внешним диаметром 4½ дюйма. В результате толщина цементного кольца между породой и колонной составила не менее 5 см. Объект исследований представлен песчано-глинистым породами, с переслаивающимися низкопористыми газонасыщенными коллекторами и плотными пропластками. Несмотря на то, что стандартный каротаж в открытом стволе выполнялся, недропользователь пожелал провести высокоразрешающие исследования через обсадную колонну, чтобы получить более точную интерпретацию.

#### **Решение: исследование нового типа для определения пористости и газосодержания пород**

Новый многофункциональный прибор импульсной нейтрон-гамма спектрометрии Pulsar позволяет выполнять независимую достоверную оценку ФЕС коллекторов через колонну с полным учетом минералогического состава, который количественно оценивается по данным прибора. Наличие данных ГИС в открытом стволе необязательно – достаточно лишь одной записи новым прибором. Кроме весовых концентраций химических элементов и  $S_{\text{орг.вес, \%}}$  прибор Pulsar выполняет измерения сигмы, нейтронной пористости, углерод-кислородного отношения (C/O) через колонну с более высоким разрешением и в два раза быстрее, чем приборы предыдущего поколения.

Кроме того, прибор Pulsar позволяет измерять макросечение неупругого рассеяния быстрых нейтронов (FNXS), которое позволяет надежно разделять газонасыщенные и нефте-водонасыщенные интервалы коллекторов и плотных пропластков. Благодаря тому, что параметр FNXS, в отличие от стандартного

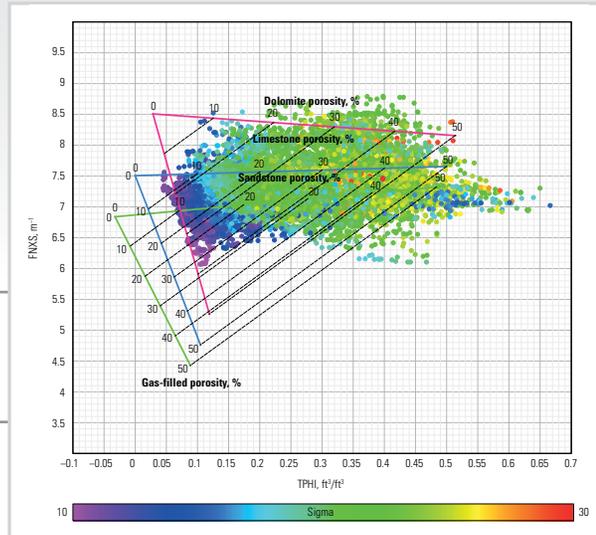
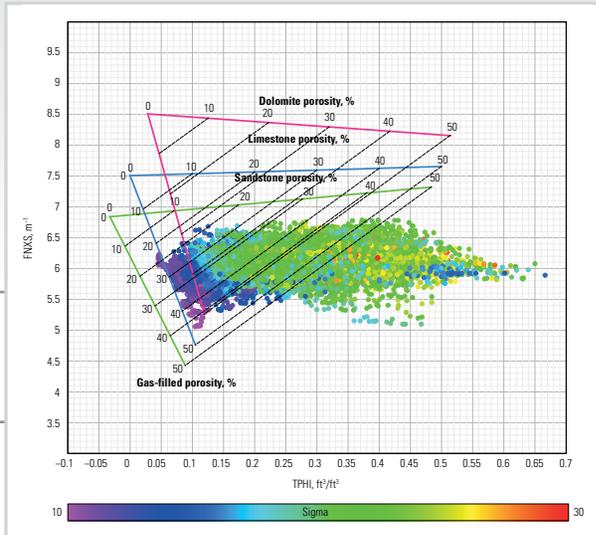
нейтронного каротажа, не имеет специфической чувствительности к какому-либо химическому элементу, значения данного параметра для твердой матрицы, нефти и воды сопоставимы. Это обуславливает полное отсутствие чувствительности данного измерения к пористости в интервалах коллекторов, насыщенных нефтью или водой, и делает это измерение чувствительным исключительно к газонасыщенным порам.

#### **Результат: выделены газонасыщенные интервалы, оценена их пористость и газонасыщенность, выделены интервалы плотных прослоев**

По результатам обработки лишь одной записи данных Pulsar было выделено две зоны интереса: X,160-X,180 футов и X,270-X,330 футов. Значения газового индекса и FNXS (треки 6 и 7, соответственно) показывают, что только нижний интервал содержит газ, несмотря на то, что по данным стандартного комплекса радиоактивного каротажа через колонну верхний интервал также мог получить характеристику газонасыщенного коллектора. Проведена независимая интерпретация данных Pulsar, построена объемная петрофизическая модель (треки 10 и 11), связывающая результаты обработки данных прибора (водородосодержание, сигма, FNXS) с соответствующими параметрами минералов и флюидов и их объемами в породах. Полученные результаты полностью подтверждаются данными стандартного комплекса ГИС, зарегистрированного ранее в открытом стволе (треки 8 и 9).

Данный пример показывает, что недропользователь может отказаться от стандартной практики регистрации данных ГИС в открытом стволе, проводя лишь одну запись в уже обсаженной скважине одним единственным прибором. Это позволит как минимизировать производственные риски, так и снизить затраты на строительство скважины.





С целью достоверной оценки пористости и газонасыщенности коллекторов требовалось учесть большой объем цемента в колонном пространстве. На кросс-плоте слева представлен результат обработки данных водородосодержания по тепловым нейтронам и FNXS, зарегистрированных прибором Pulsar. К данным FNXS применена стандартная поправка за скважину. Очевидно, что плотность цемента, принятого в базе данных для ввода поправок, выше. Поэтому в данные была введена дополнительная поправка, чтобы учесть свойства легкого цемента, который стал причиной смещения точек на графике в область, характерную для низкопористых глинистых интервалов. Как видно на графике справа, дополнительная поправка обеспечила корректную оценку FNXS – точки на графике характеризуют песчано-глинистый коллектор.

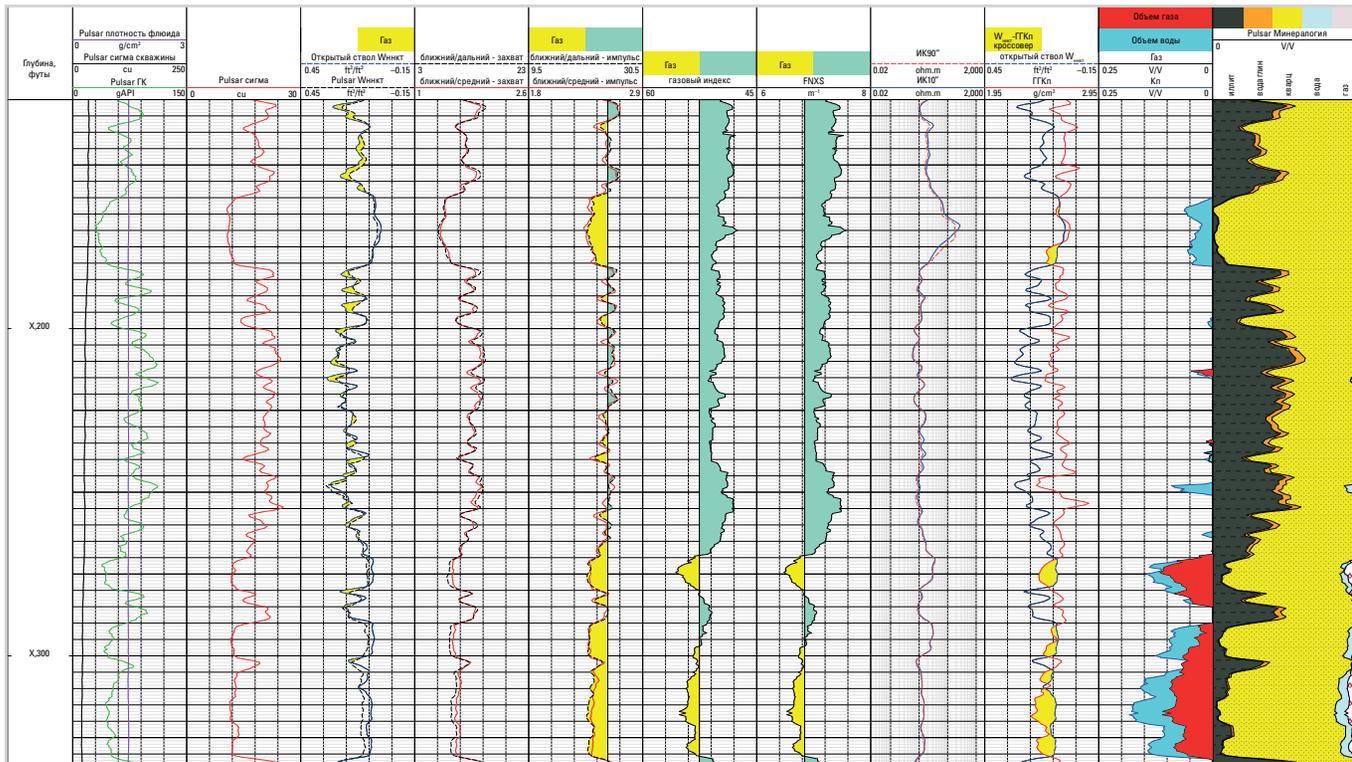
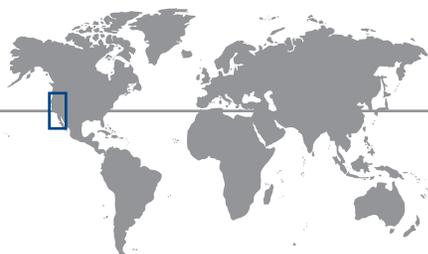


Диаграмма FNXS, полученная в результате корректного ввода поправок за большой объем легкого цемента в данные Pulsar позволила дифференцировать газонасыщенный интервал X,160 – X,180 футов и плотный пропласток в интервале X,270-X,330 футов. По данным стандартных измерений ИНГКс через колонну верхний интервал был бы охарактеризован как газонасыщенный (трек 5).

## Мониторинг выработки пласта

Прибор Pulsar обеспечивает независимый мониторинг выработки пластов-коллекторов при любой минерализации пластовых вод и без привлечения других данных ГИС



### Пример применения

Точное прослеживание фронта продвижения пара и оценка текущей нефтенасыщенности в интервале коллектора с пресной пластовой водой (Калифорния)

#### **Проблема: Мониторинг выработки пластов, насыщенных высоковязкой нефтью и пресной пластовой водой**

Недропользователь, добывающий высоковязкую нефть на одном из месторождений Калифорнии путем закачки пара, решил проводить систематический мониторинг продвижения фронта закачиваемого пара в пласте и оценивать текущую нефтенасыщенность через наблюдательную скважину. Перед обсадкой скважины, в ней был отобран керн и проведен расширенный комплекс ГИС с целью получения наиболее информативного фоновое измерения. Поскольку пластовая вода пресная, отличить нефтенасыщенный интервал от водонасыщенного по измерению макросечения захвата тепловых нейтронов невозможно. Поэтому для достоверной оценки эффективности закачки пара и мониторинга выработки традиционные приборы ГИС не подходят.

#### **Решение: Мониторинг выработки пласта многофункциональным прибором Pulsar**

Для импульсной нейтрон-гамма спектрометрии прибора Pulsar нет ограничений при оценке ФЕС коллекторов через колонну, присущих приборам предыдущего поколения, благодаря высокопроизводительному импульсному генератору нейтронов нового поколения и современным детекторам, помещенным в малогабаритный корпус прибора диаметром всего 44 мм. Результатом обработки данных прибора является объемная петрофизическая модель изучаемых пород, получаемая с использованием количественной оценки минералогического состава,  $C_{орг.вес, \%}$ , а также – нейтронной пористости, сигма и углерод/кислородного отношения.

Новое измерение FNXS, воплощенное только в приборе Pulsar, позволяет уверенно дифференцировать газонасыщенные коллекторы от нефте- и водонасыщенных, а также – от плотных пропластков. Благодаря тому, что макросечение неупругого рассеяния быстрых нейтронов не имеет специфической чувствительности

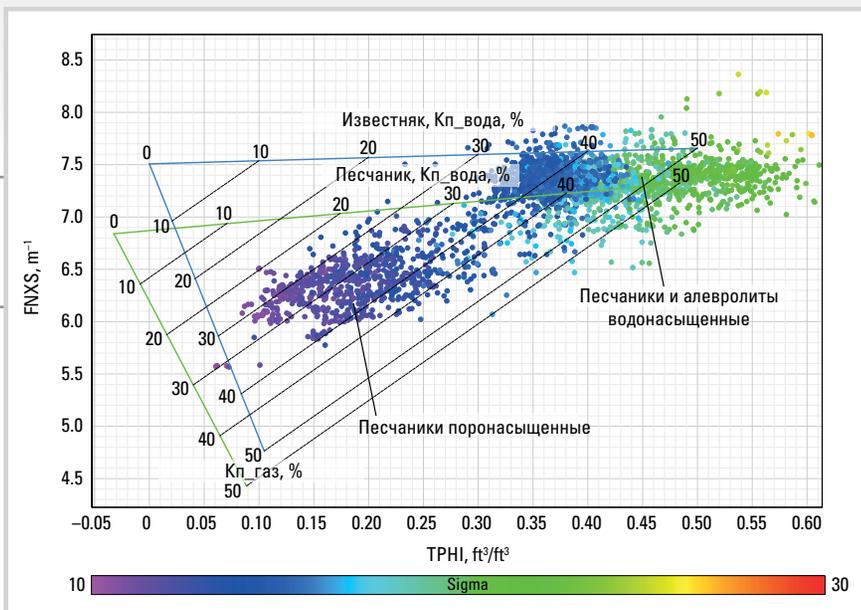
к какому-либо химическому элементу, значения параметра FNXS для твердой матрицы, нефти и воды сопоставимы. Таким образом, это измерение исключительно чувствительно к интервалам, насыщенным газом или паром.

#### **Результат: Надежно прослеживается продвижение пара и текущая нефтенасыщенность пласта**

Прибор Pulsar был применен в наблюдательной скважине с целью одновременного получения характеристик неупругого рассеяния быстрых нейтронов (FNXS), сигмы, водородосодержания, геохимической спектрометрии гамма-излучения неупругого рассеяния (ГИНР) и радиационного захвата (ГИРЗ) нейтронов. Полученные оценки  $C_{орг.вес, \%}$  и рассчитанная из данной характеристики нефтенасыщенность полностью подтверждаются аналогичными оценками, полученными по данным LithoScanner в открытом стволе. Как показано на втором треке справа, значения  $C_{орг.вес, \%}$  полученные прибором Pulsar со скоростью записи 50 фут/час (черный), хорошо согласуется со значениями данной характеристики, зарегистрированными ранее в открытом стволе прибором большего диаметра LithoScanner со скоростью записи 450 фут/час. Нефтенасыщенность, рассчитанная по измерениям  $C_{орг.вес, \%}$  в обсаженной скважине, отлично согласуется с оценками нефтенасыщенности на сохраненном керне (крайний правый трек).

По данным НККт и ГГКп, зарегистрированным в открытом стволе, выше отметки X,500 футов выделяются интервалы коллекторов, насыщенных паром и воздухом. Согласно измерениям водородосодержания, сигмы и FNXS, полученным прибором Pulsar в колонне диаметром 7", те же интервалы характеризуются как газонасыщенные (пар+воздух). В случае, когда есть данные расширенного комплекса ГИС в открытом стволе, они могут быть использованы совместно с любым из измерений в колонне, чувствительным к газу – обычно используется водородосодержание или сигма.

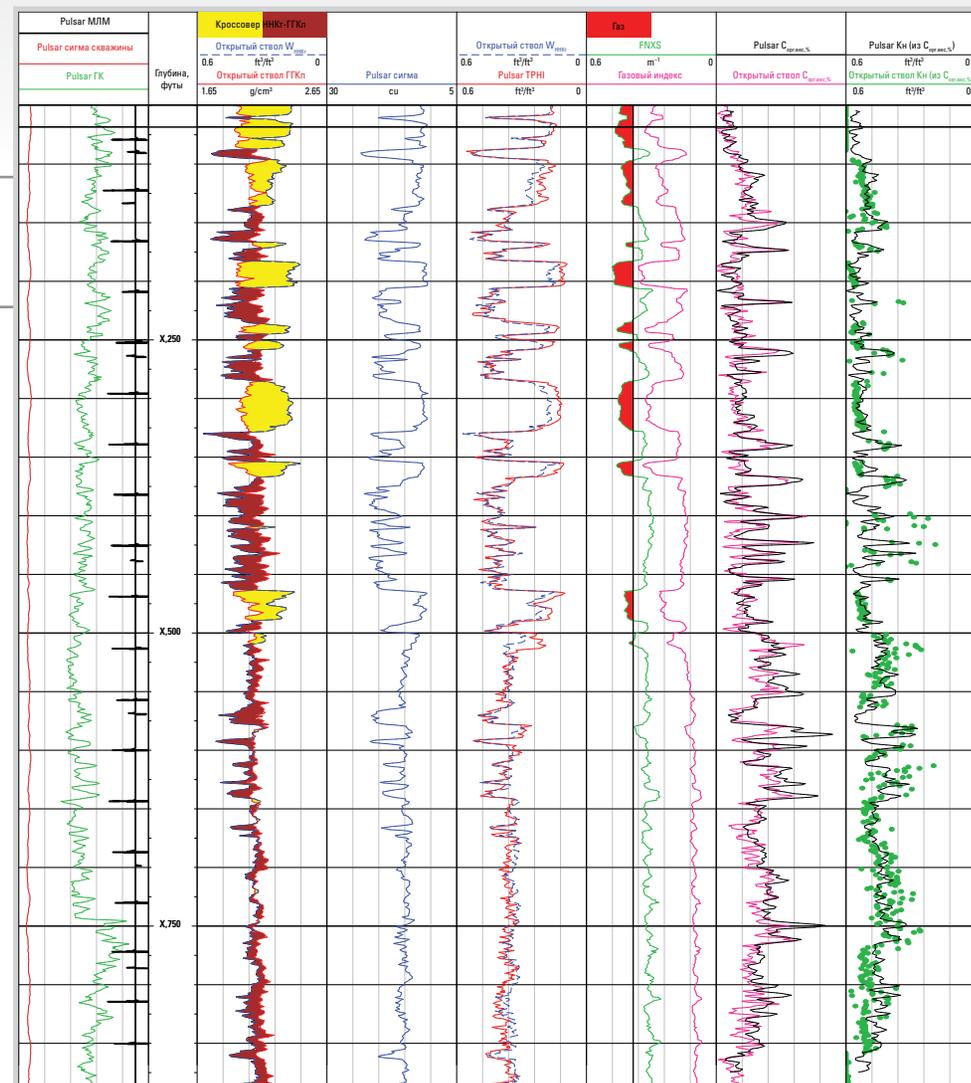




Кросс-плот FNXS-TPNI позволяет четко дифференцировать газонасыщенные коллекторы от нефте- и водонасыщенных

Однако, если данные ГИС по открытому стволу недоступны, то, используя кросс-плот FNXS-TPNI, можно не только выделить газонасыщенные интервалы, но и оценить их пористость (с поправкой за газ) и газонасыщенность. Палетки на кросс-плотах характеризуют породы различной литологии. Верхние, субгоризонтальные линии палеток соответствуют 100% водонасыщенной породе, а левые субвертикальные линии – 100% газонасыщенной. Существенное разделение точек на графике обусловлено тем, что измерение TPNI характеризует главным образом содержание водорода, в то время как FNXS не имеет специфической чувствительности к какому-либо элементу.

Выделение газонасыщенных интервалов и оценка их пористости и газонасыщенности без данных ГИС по открытому стволу или измерений FNXS имели бы существенную неоднозначность. При анализе данных ГИС в открытом стволе, эти задачи обычно решаются путем комплексной интерпретации данных ГГКп и ННКт. В обсаженном стволе вместо плотностного каротажа используется измерение FNXS – сопоставление этой характеристики с водородосодержанием позволяет аналогичным образом решать поставленные задачи. Как видно на кросс-плотах, насыщенные паром интервалы попадают в область газонасыщенных коллекторов, а остальные коллекторы отображаются вдоль линии 100% водонасыщенности.



На втором треке справа представлено сопоставление оценок  $C_{орг.вес.}$  по данным спектрометрии в открытом стволе (розовый) и по данным Pulsar – в колонне (черный). Хорошая сходимость полученных оценок подтверждает достоверный расчет нефтенасыщенности по данным Pulsar. На последнем треке представлено подтверждение корректности расчета  $Kп$  по данным Pulsar значениями нефтенасыщенности определёнными на сохраненном керне. По данным ГИС в открытом и обсаженном стволе, газонасыщенные интервалы выделяются выше глубины X,500 футов.

## Нетрадиционные коллекторы

Высокоразрешающие спектральные данные прибора Pulsar позволяют определять минералогическое и литологическое строение пород с высокой детальностью, оценивать качество ёмкости (RQ) и качество заканчивания (QC) сланцевого коллектора



### Пример применения

Один прибор в колонне вместо всего комплекса ГИС в открытом стволе

#### Задача: Оптимизация комплекса ГИС без потери информативности

С целью изучения сложнопостроенного газонасыщенного сланцевого коллектора на одном из месторождений штата Пенсильвания (США), недропользователь выполнил регистрацию расширенного комплекса ГИС в открытом стволе скважины. Комплекс включал, помимо стандартных исследований, ядерно-магнитный каротаж (ЯМК), а также – геохимический каротаж ИНГКс. Геохимический каротаж является в данном случае крайне важным, т.к. позволяет выполнять оценку минералогического состава пород, а также - весовое содержание органического углерода ( $C_{\text{орг.вес.}\%}$ ), из которого рассчитывается объем керогена в породе, определяющий качество коллектора такого типа. Включение в комплекс ГИС ЯМК и плотностного каротажа требуется для оценки газонасыщенности и пористости с поправкой за газ (кероген и газ имеют контрастные значения измеряемых свойств).

Для того чтобы в дальнейшем существенно экономить время на строительство скважины и снизить производственные риски, связанные с нестабильностью ствола скважины в целевом интервале, недропользователь искал возможность выполнения исследований коллектора в полном объеме через обсадную колонну.

#### Решение: Высокоинформативные исследования пород-коллекторов через колонну без привлечения данных ГИС по открытому стволу

Разработанный для поиска пропущенных залежей новый малогабаритный многофункциональный прибор Pulsar позволяет выполнять полную оценку ФЕС коллекторов через колонну. В приборе используются детекторы гамма-квантов со сцинтилляторами из бромида лантана, легированного церием ( $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ )

– уже доказавшие свои преимущества в приборе геохимической спектromетрии высокого разрешения LithoScanner. Pulsar позволяет аналогичным образом выполнять в обсаженной скважине высокоточную оценку геохимического и минералогического состава пород и  $C_{\text{орг.вес.}\%}$ . Кроме этого прибор регистрирует данные: сигма, водородосодержание, углерод/кислородное отношение, а также измерение нового типа FNXS - макросечение неупругого рассеяния быстрых нейтронов, которое позволяет четко дифференцировать газонасыщенные интервалы от нефте-водонасыщенных и плотных пропластков.

#### Результат: точная дифференциация газонасыщенных и плотных пропластков, чего ранее нельзя было сделать по данным ГИС через колонну

Прежде чем спустить в скважину обсадную колонну диаметром 5½", в открытом стволе, заполненном пресным буровым раствором, был проведен расширенный комплекс ГИС. Эти данные планировалось использовать для сопоставления с результатами последующих исследований через обсадную колонну. После обсадки скважины прибором Pulsar было выполнено три отдельных записи со скоростью 300 фут/час в гибридном режиме GSH-lithology, который позволяет регистрировать одновременно каротаж сигмы, нейтронной пористости и FNXS в дополнение к геохимическому каротажу, включающему  $C_{\text{орг.вес.}\%}$  и C/O-каротаж. Данные трех записей были усреднены для улучшения статистики измерений, после чего была выполнена независимая комплексная интерпретация. При такой относительно низкой скорости записи данные спектromетрии прибора Pulsar имеют высокую точность и хорошо коррелируются

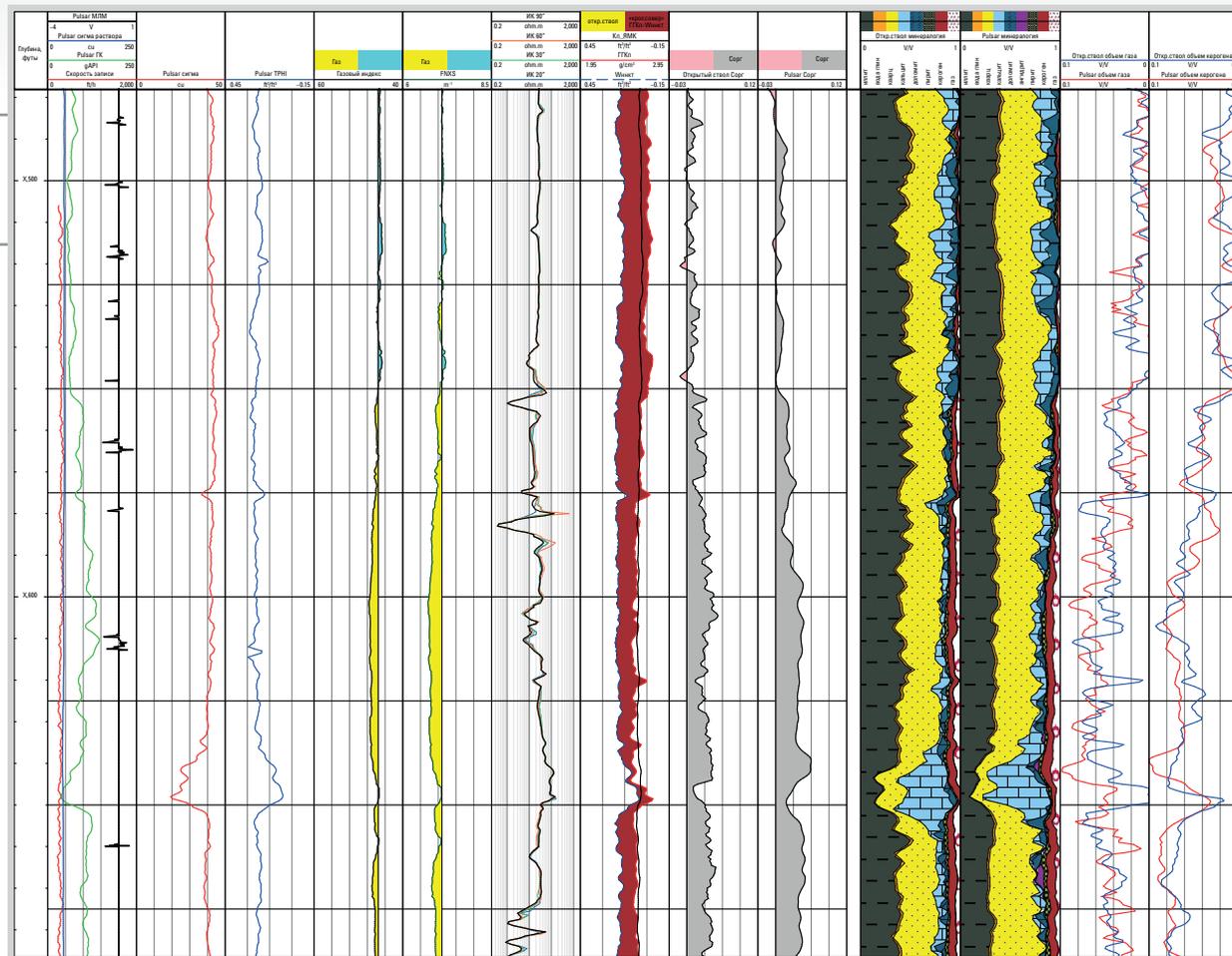


с данными, зарегистрированными прибором спектрометрии большего диаметра в открытом стволе.

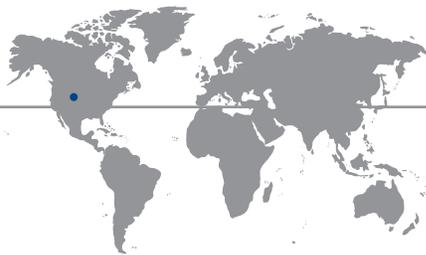
По данным Pulsar была выполнена независимая интерпретация с использованием системы линейных уравнений, связывающих измеренные свойства с объемами минералов в породе. Полученные результаты, включая пористость и газонасыщенность, очень четко согласуются с результатами интерпретации расширенного комплекса ГИС, выполненного в открытом стволе.

Ниже глубины X,550 футов, где по данным плотностного каротажа и  $C_{орг.вес, \%}$  зарегистрированных в открытом стволе, отмечается увеличение пористости, газонасыщенности и содержания керогена, по измерениям FNXS и  $C_{орг.вес, \%}$  прибора Pulsar в обсаженном стволе отмечается переход от интервала плотных пластов к газонасыщенным. На каротаже водородосодержания и сигмы оба интервала выглядят одинаково, что говорит о невозможности выделения газонасыщенных коллекторов на основе лишь стандартных измерений через колонну.

Недропользователь с удовольствием отметил, что один прибор в обсаженном стволе столь же эффективен для оценки качества коллектора, что и расширенный комплекс ГИС в открытом стволе. Эта новая, надежная альтернатива полноценных исследований газонасыщенных сланцевых коллекторов позволит недропользователю в дальнейшем существенно оптимизировать строительство скважин и минимизировать производственные риски, связанные с нестабильностью ствола скважины.



Сопоставление результатов интерпретации расширенного комплекса ГИС (треки 10 и 12), выполненного в открытом стволе, с независимой интерпретацией данных Pulsar, зарегистрированных через колонну (треки 11 и 13), подтверждает высокую точность и достоверность данных Pulsar. Оценки пористости и газонасыщенности, для которых при использовании приборов предыдущего поколения требовались данные по открытому стволу, по данным Pulsar получаются идентичными оценкам этих параметров в открытом стволе по данным расширенного комплекса. Новое измерение FNXS прибора Pulsar позволяет выполнять независимую оценку газонасыщенности коллекторов.



## Пример применения

Разработка петрофизической модели сланцевого коллектора Ниобрара по данным одного геофизического прибора в обсаженном стволе с целью выбора интервалов заканчивания

### **Проблема: отсутствие высокоточного комплекса ГИС через колонну с целью оценки качества коллектора (RQ) и качества заканчивания (CQ) горизонтальных скважин**

Оценка ФЕС коллекторов и получение данных для корректного моделирования гидроразрыва пласта с помощью ГИС через обсадную колонну всегда были очень сложными задачами, особенно в горизонтальных скважинах. Недропользователь, разрабатывающий сланцевый коллектор Ниобрара, столкнулся с проблемой получения высокоточных данных для оценки качества коллектора и выбора интервалов интенсификации в двух горизонтальных скважинах. Единственными имеющимися данными ГИС был гамма каротаж (ГК), зарегистрированный в открытом стволе в процессе бурения этих скважин. Таких данных, разумеется, недостаточно для решения поставленных задач.

### **Решение: Изучение нетрадиционных коллекторов с помощью ГИС через колонну с такой же информативностью и точностью, как при проведении расширенного комплекса ГИС в открытом стволе**

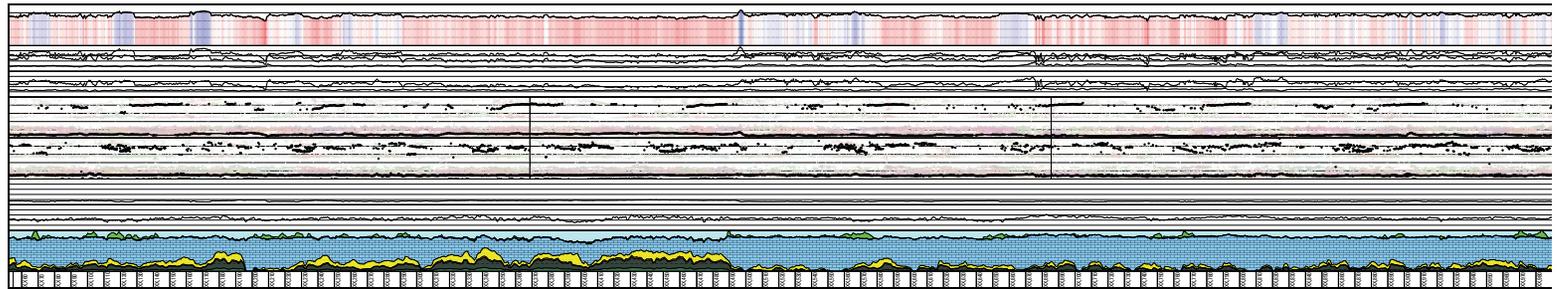
В одной компоновке за одну спуско-подъемную операцию были выполнены исследования двумя приборами: Pulsar и ThruBit Dipole Sonic. Данные прибора Pulsar использовались для выполнения достоверной оценки минералогического состава и емкостных характеристик коллекторов, включая объем керогена по измерению параметра  $C_{орг}$  и объем свободного газа по измерению параметра FNXS. Малогабаритный прибор кросс-дипольного широкополосного акустического каротажа ThruBit Dipole Sonic (TBDS) применялся с целью получения данных для исследования петроупругих свойств коллектора, геомеханического моделирования, для выбора интервалов

заканчивания скважины и проектирования гидроразрыва пласта. Прибор TBDS идеально подходит для исследований сланцевых коллекторов, так как позволяет выделять и классифицировать акустическую анизотропию пород по генезису - является ли она следствием тонкого переслаивания или вызвана локальным перераспределением горизонтальных напряжений при бурении скважины. Получаемые в результате комплексной интерпретации данных Pulsar оценки объемной плотности дополняют акустические исследования и позволяют выполнять достоверный расчет механических свойств пород по разрезу, что является важнейшей информацией для проектирования заканчивания скважин, моделирования многостадийных ГРП, выбора траектории и обеспечения стабильности бурения следующих скважин.

### **Результат: Высокоточная оценка качества коллектора и проектирование заканчивания скважин с использованием геомеханической модели по данным одного исследования ГИС через колонну**

За одну СПО в обсаженном стволе была выполнена запись приборами Pulsar и TBDS с целью оценки петрофизических свойств пород и построения геомеханической модели. Доставка приборов на забой горизонтальной скважины осуществлялась с использованием скважинного трактора TuffTRAC. Интерпретация результатов обработки данных Pulsar выполнена в программном модуле Quanti.Elan (Techlog), позволяющим инвертировать различные геофизические измерения в объёмы минералов и флюидов посредством одновременного решения системы уравнений. Были получены количественные оценки минералогии, пористости и нефтегазонасыщенности коллекторов, кроме того, было выполнено моделирование объемной плотности пород по разрезу, необходимой для

Мин. гориз. напр-е (анизотр.)  
 Петроупругие модули (анизотр.)  
 Медленная S-волна  
 Быстрая S-волна  
 P-волна  
 ГК-п  
 Объемная модель

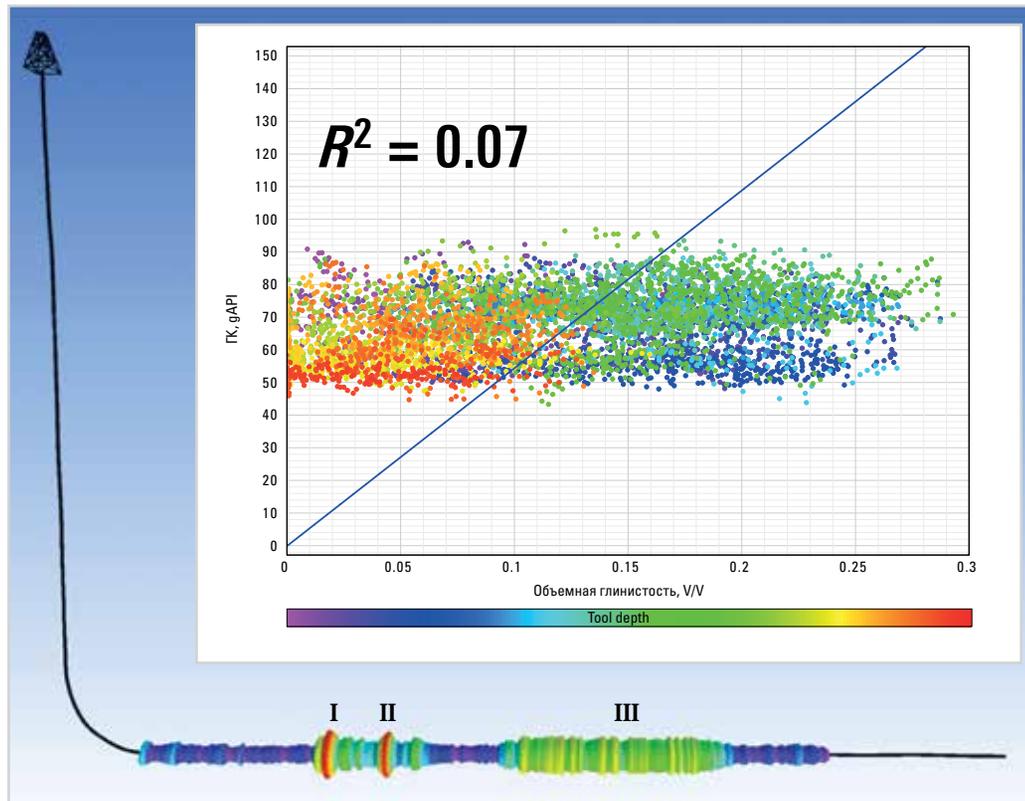


В результате петрофизической интерпретации данных Pulsar в скважине «В» получены: минералогический состав, плотность пород и объемы пластовых флюидов. Интервальные времена продольной, быстрой и медленной поперечных волн получены по данным прибора ThruBit Dipole Sonic. Интервальные времена и объемная плотность пород использованы для расчета значений коэффициента Пуассона и модуля Юнга вдоль и перпендикулярно напластованию. Далее, анизотропные механические модули использованы для моделирования многостадийного ГРП.

оценки упруго-прочностных свойств горных пород. В дополнение к высокоточной оценке качества коллектора и выбору интервалов заканчивания, по результатам интерпретации были выделены прослой мергеля, соответствующие разломам, выделяемым на сейсмических данных, но не выявленные по данным ГИС в процессе бурения.

По данным кросс-дипольной акустики и объемной плотности выполнена оценка коэффициента Пуассона и модуля Юнга пород по разрезу, которые далее использовались для оценки минимального горизонтального напряжения пород по анизотропной модели с целью выбора наиболее подходящих интервалов для многостадийного ГРП.

Объемная глинистость по результатам комплексной интерпретации данных Pulsar интенсивно варьирует по всему стволу скважины, в особенности в интервалах, где скважина пересекает разломы, заполненные мергелями. Некоторые из выделенных таким образом разломов даже не видны на сейсмических данных (из-за недостаточной разрешающей способности сейсмики). Мергели в интервале III скважины «А» также ранее не выделялись, поскольку между ГК в процессе бурения и объемной глинистостью корреляционной связи нет. Выделение интервалов таких мергелей крайне важно для эффективного проектирования заканчивания горизонтальных скважин.



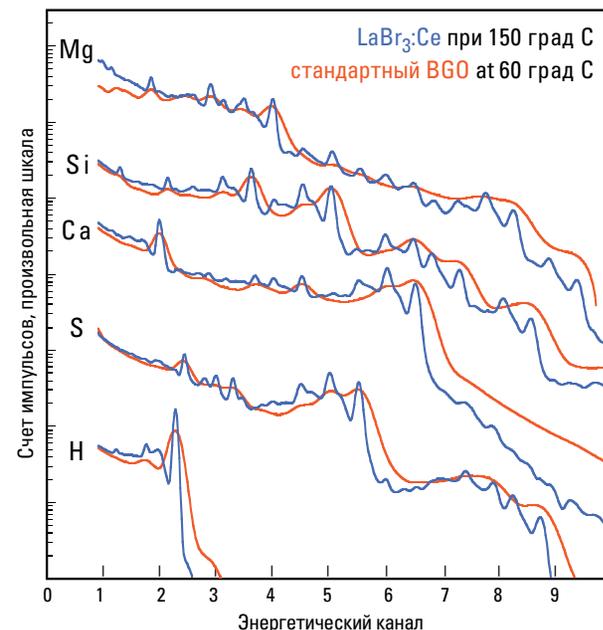
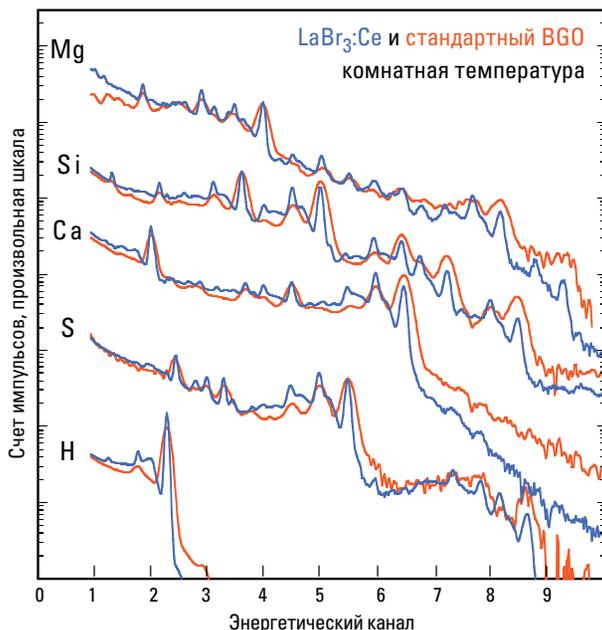
# Новое поколение приборостроения для оценки ФЕС коллекторов и мониторинга выработки пластов через колонну

Многофункциональный малогабаритный прибор импульсной нейтрон-гамма спектрометрии Pulsar имеет диаметр всего 44 мм, что позволяет проводить исследования в колоннах малого диаметра, а также – спускать его в скважину через НКТ. Построенный на основе технологий, ранее воплощенных в приборе геохимического каротажа ИНГКс высокого разрешения LithoScanner, новый прибор Pulsar имеет импульсный генератор нейтронов и четыре детектора:

- Компактный счетчик быстрых нейтронов, расположенный рядом с генератором, служит для точного измерения излучаемого потока нейтронов;
- Три сцинтилляционных детектора гамма квантов:
  - Ближний и средний детекторы имеют сцинтилляторы из бромида лантана, легированного церием ( $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ );
  - Дальний детектор имеет сцинтиллятор из иттрий-алюминиевого перовскита (YAP);

Все три детектора оснащены высокотемпературными фотоэлектрическими умножителями. Получаемые импульсы регистрируются высокопроизводительной электроникой устойчивой к повышенным температурам. Благодаря использованию  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ , разрешение спектров практически не снижается при повышенных температурах. Это обеспечивает стабильную работу прибора без потери качества данных при температурах до 175 градусов Цельсия без применения какой-либо системы охлаждения.

Малогабаритный прибор обеспечивает возможность проведения работ практически при любых конструкциях заканчивания скважин. Прибор коррозионно-устойчив (соответствует NACE MR0175), может применяться в условиях присутствия  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ .



Энергетический спектр гамма-квантов, измеряемый прибором Pulsar с гамма-детекторами  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  (синий цвет) на левом рисунке имеет более высокое разрешение, с лучшей дифференциацией характеристических пиков, чем спектр, получаемый традиционными детекторами BGO (красный цвет). Это способствует более точному количественному анализу элементов спектра прибора нового поколения. На правом рисунке приводится сравнение получаемых спектров в условиях повышенных температур. При  $T=150^\circ\text{C}$   $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  (синий) обеспечивает высокий световыход, четкий энергетический спектр гамма-квантов, тогда как BGO (красный) работает со значительным снижением световыхода уже при  $T=60^\circ\text{C}$ .

## Компактный счетчик нейтронов

В отличие от изотопных источников нейтронов, выход нейтронов, излучаемых импульсным генератором, может изменяться во времени. Это означает, что вариации регистрируемых счетов могут быть связаны как с изменениями характеристик изучаемых пород, так и с изменением мощности потока нейтронов от генератора. Эти две причины не могут быть надежно разделены без применения отношений счетов двух зондов разной длины, либо комбинации временных окон. Стандартной практикой при обработке данных приборов предыдущих поколений является использование отношения счетов дальнего и ближнего детекторов. Несмотря на то, что это довольно

эффективный способ нормализации вариаций потока нейтронов от генератора, счет нейтронов ближнего детектора более чувствителен к условиям скважины, нежели дальнего, и не все эффекты условий измерений устраняются при таком подходе. С целью проведения наиболее корректной нормализации выхода нейтронов, в приборе Pulsar установлен специальный полупроводниковый алмазный детектор нейтронов. Этот детектор исключительно чувствителен к быстрым нейтронам и практически нечувствителен к нейтронам низких энергий и гамма-квантам. Помимо этого, новый счетчик нейтронов имеет еще несколько преимуществ. Ширина запрещенной зоны у него составляет 5.5 эВ, что позволяет минимизировать тенью

## Новая аппаратура для высокоточных исследований

ток, ток утечки и шум. Кроме того, он стабильно работает даже при повышенных температурах. Отличная радиационная стойкость детектора гарантирует незначительное изменение чувствительности к быстрым нейтронам в течение срока его службы. Несомненно, очень важным фактором для малогабаритного прибора является и компактный размер детектора, что позволило установить его в непосредственной близости к генератору нейтронов, не увеличивая расстояние до детекторов гамма-квантов и не усложняя схему защитного экрана.

### Дальний детектор YAP

Рассматривались различные материалы для сцинтиллятора дальнего (третьего) детектора. Назначение дальнего детектора – получать информацию о породе, которую невозможно получить с помощью ближних детекторов. Ближний и средний детекторы расположены довольно близко к генератору нейтронов и поэтому имеют очень высокие значения счетов гамма-квантов – номинально,  $1 \cdot 10^6$  и  $0.7 \cdot 10^6$  счетов в секунду, соответственно, для стандартных условий.  $\text{LaBr}_3$  был выбран в качестве сцинтиллятора для этих детекторов благодаря его высокому световыходу и отличному разрешению получаемого спектра. В случае дальнего детектора поток гамма-квантов значительно ниже, и если его использовать для спектрометрии, точность ее улучшится незначительно. Поэтому дальний

детектор был оптимизирован для измерения макросечения рассеяния быстрых нейтронов (FNXS).

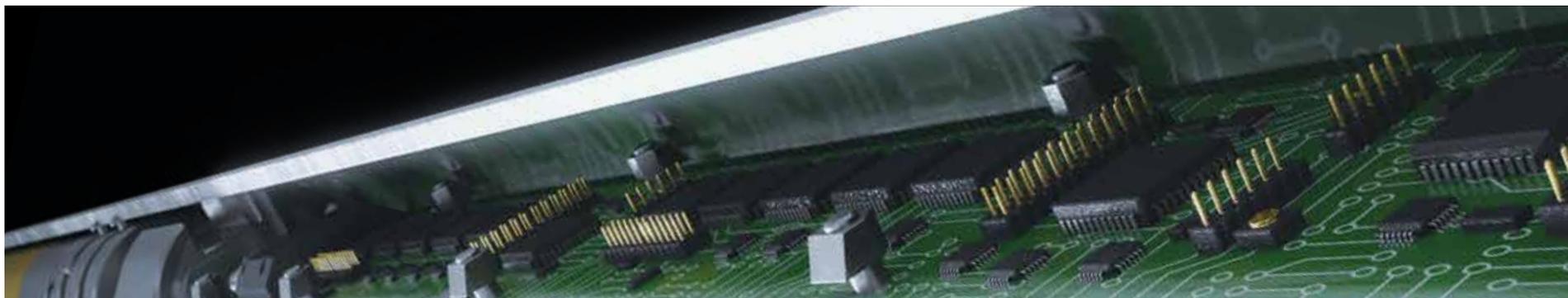
Материал YAP ( $\text{YAlO}_3$ ) имеет несколько преимуществ в качестве сцинтиллятора для измерения FNXS. Одним из главных преимуществ является то, что элементы в его составе (Y, Al, O) имеют низкие значения захвата надтепловых и тепловых нейтронов. Это позволяет минимизировать нежелательный фоновый сигнал от захвата нейтронов в детекторе и усилить относительный вклад гамма-квантов, эмитированных в изучаемых породах, что обеспечивает надежное разделение счета гамма-квантов неупругого рассеяния и счета гамма-квантов захвата нейтронов, возникающих во время работы генератора. Разделение этих счетов крайне важно для измерения FNXS. Еще одно преимущество YAP – его высокая плотность –  $5.37 \text{ г/см}^3$ , что обеспечивает высокую эффективность сцинтиллятора. Кроме того, он не гигроскопичен, не нуждается в герметичной упаковке, что позволяет использовать кристалл максимально возможного размера для получения наивысшей скорости счета. YAP механически прочен, что практически исключает риски его повреждения при транспортировке и выполнении работ. К тому же сцинтилляционные характеристики его остаются практически постоянными в диапазоне температур от  $-40$  до  $175$  град Ц.

Для регулировки шкалы измерения YAP детектор не нуждается в применении стабилизационного источника. Точнее,

это реализуется с использованием свойств регистрируемых спектров. Аналогичный подход используется и для  $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$  детекторов. Данный подход позволяет совершенно исключить использование каких-либо радиоактивных материалов в приборе, за исключением трития в импульсном генераторе нейтронов.

### Обработка сигнала

Мощный поток нейтронов от генератора и быстрая регистрация гамма-квантов в детекторе бесполезны, если нет высокопроизводительной электроники, способной эффективно обрабатывать получаемые импульсы. В приборе Pulsar применена такая же электроника для счета импульсов как в приборе LithoScanner, которая обеспечивает получение спектров высокого разрешения при высокой скорости счета. Для обеспечения хороших характеристик спектра, каждый импульс должен быть четко отделен от соседних. При высоких скоростях счета наложение импульсов может исказить спектр. В приборе Pulsar используется усовершенствованная технология отбраковки наложенных импульсов, которая в комбинации с высокой разрешающей способностью кристалла, отличными температурными характеристиками и высокопроизводительной электроникой позволяет получать самое высокое в индустрии качество спектра неупругого рассеяния быстрых нейтронов.



# Физические основы нейтрон-гамма спектрометрии

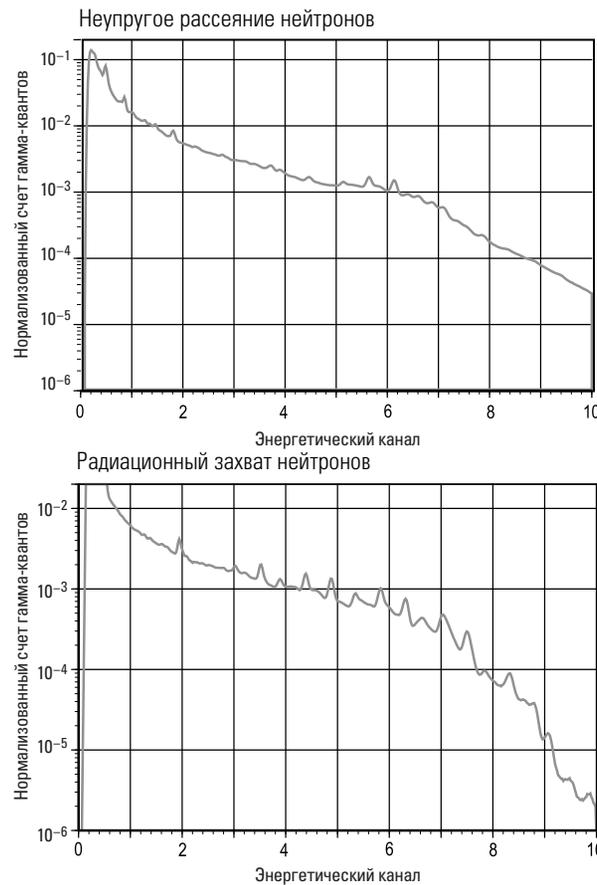
Нейтроны, излучаемые импульсным генератором прибора Pulsar, вызывают гамма-излучение пород в результате двух типов взаимодействия нейтронов с веществом, сопровождающихся эмиссией гамма-квантов: неупругого рассеяния и радиационного захвата тепловых нейтронов. В результате каждого взаимодействия происходит эмиссия гамма-квантов, обладающих специфическими энергетическими характеристиками.

Сцинтиллятор прибора Pulsar на основе бромид лантана, легированного церием (LaBr<sub>3</sub>:Ce) соединен с фотозлектронным умножителем, формирующим комплексные цифровые сигналы, обрабатываемые высокопроизводительным амплитудным анализатором импульсов. Анализатор определяет амплитуду импульса (пропорциональную энергии) каждого регистрируемого гамма-кванта, суммирует сигналы в гистограммы распределений амплитуд (спектры). Спектр измеряется во время и после каждой эмиссии нейтронов, что позволяет осуществить разделение спектров энергий гамма-квантов от неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов

1

## Регистрация спектра

- Спектр неупругого рассеяния
- Спектр радиационного захвата

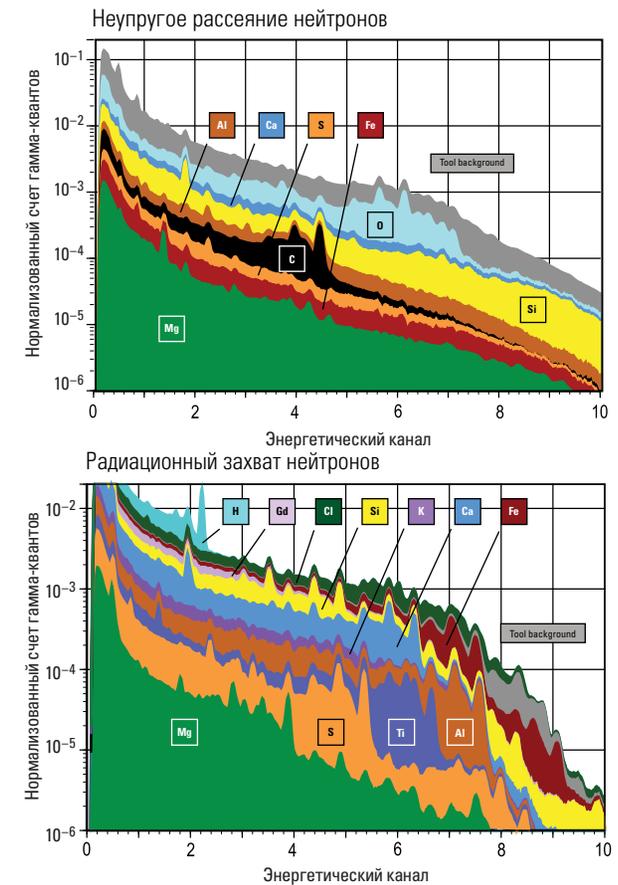


Процесс обработки данных спектрометрии начинается с получения отдельных спектров гамма-излучения неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов.

2

## Разделение спектра

- 14 элементов по спектру неупругого рассеяния
- 19 элементов по спектру радиационного захвата

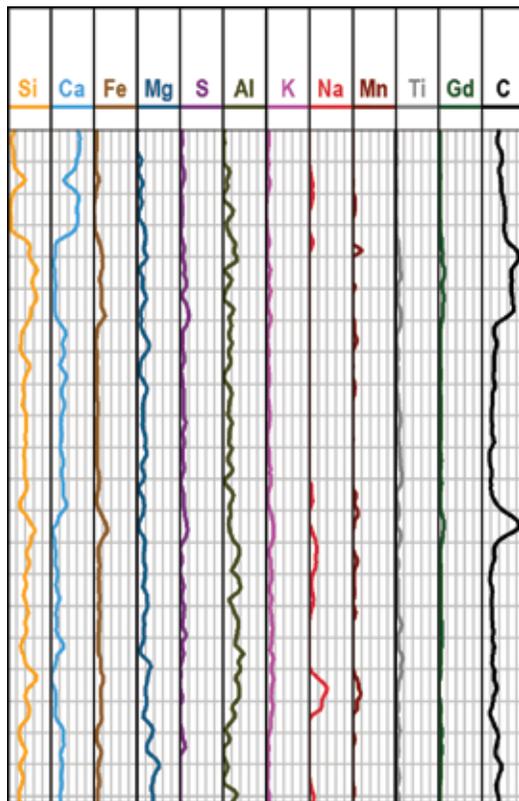


Каждый из спектров разделяется на комбинацию спектров отдельных элементов – спектральных выходов

### 3

#### Завершение обработки

- Весовые концентрации элементов

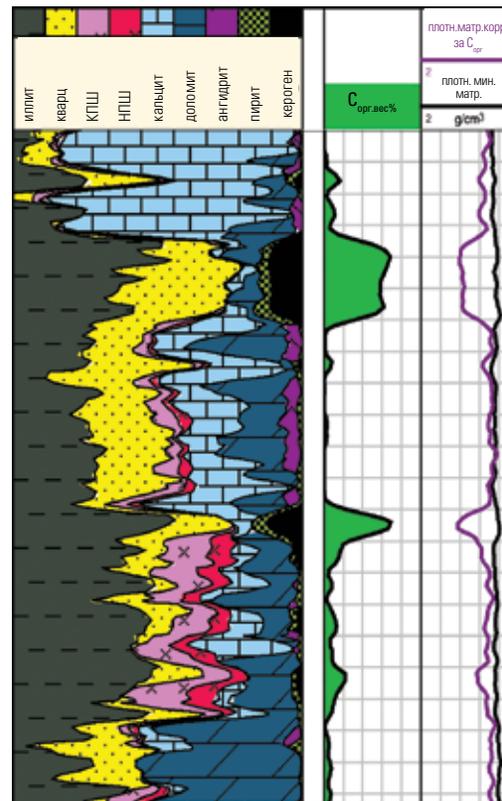


Индивидуальные спектральные выходы преобразуются в весовые доли элементов, представляемые в виде диаграмм

### 4

#### Интерпретация

- Минералы
- Свойства матрицы
- $C_{\text{орг.вес\%}}$



Интерпретация диаграмм весовых долей элементов позволяет определять минералогический состав, свойства матрицы, общее содержание органического углерода.

Каждый спектр разделяется на линейную комбинацию стандартных элементных спектров – спектральных выходов. На данном этапе вводятся необходимые поправки за условия измерений. Коэффициенты линейной комбинации стандартных спектров преобразуются в весовые доли элементов по алгоритму модифицированной геохимической модели оксидов или путем инверсии измерений. Для оценки минералогического состава из концентраций элементов могут использоваться два метода. Первый метод – последовательная обработка SpectroLith\*, основанная на эмпирических соотношениях между концентрациями элементов и концентрациями минералов. Второй метод – использование итеративного инверсионного алгоритма, например, применение многокомпонентной одновременной инверсии комплекса ГИС в программном модуле Techlog\* Quanti ELAN\*.

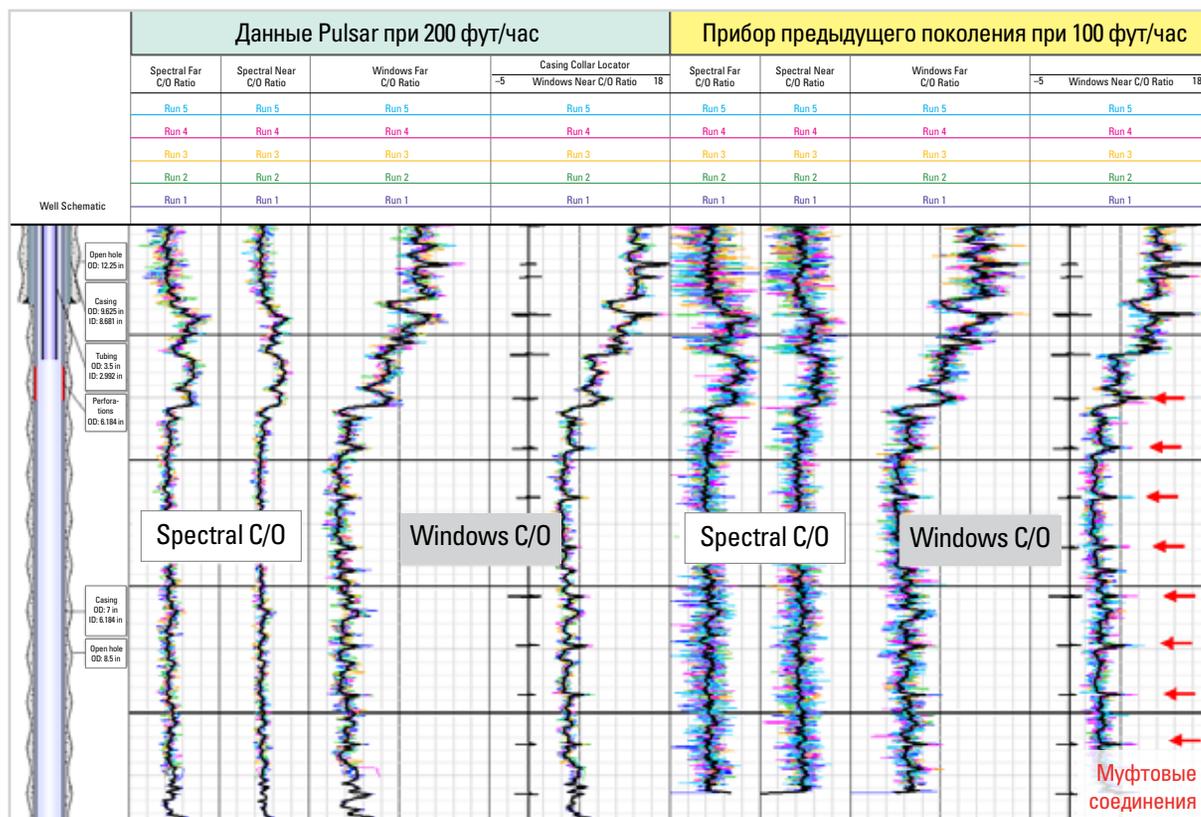
## Как это работает

Импульсный нейтрон-гамма каротаж уже давно применяется для мониторинга разработки пластов благодаря способности нейтронов и гамма-квантов, проникая через колонну и цемент, характеризовать свойства пород. Принцип действия импульсного нейтронного гамма каротажа основан на взаимодействии нейтронов с атомами минералов и флюидов, занимающих пустотное пространство. Поэтому измерения чувствительны к различным свойствам пород: водородосодержанию, макросечению захвата тепловых нейтронов (сигма), углерод/кислородному отношению (C/O), а теперь, благодаря прибору Pulsar – еще и к макросечению неупругого рассеяния быстрых нейтронов (FNXS).

Сигма-каротаж исключительно чувствителен к химическим элементам с высоким сечением радиационного захвата тепловых нейтронов. В частности, измерение очень чувствительно к хлору, который содержится в пластовой воде. Поэтому, измеряя сигму и зная минерализацию пластовой воды, можно оценивать водонасыщенность коллекторов – но только при условии, что минерализация воды относительно высокая и постоянная в исследуемом интервале.

Газ имеет более низкий водородный индекс нежели вода и нефть. Поэтому, измеряя водородный индекс через колонну и сравнивая его с пористостью, зарегистрированной в открытом стволе, возможно выделять газонасыщенные коллекторы и с достаточно высокой точностью определять положение ГНК или ГВК.

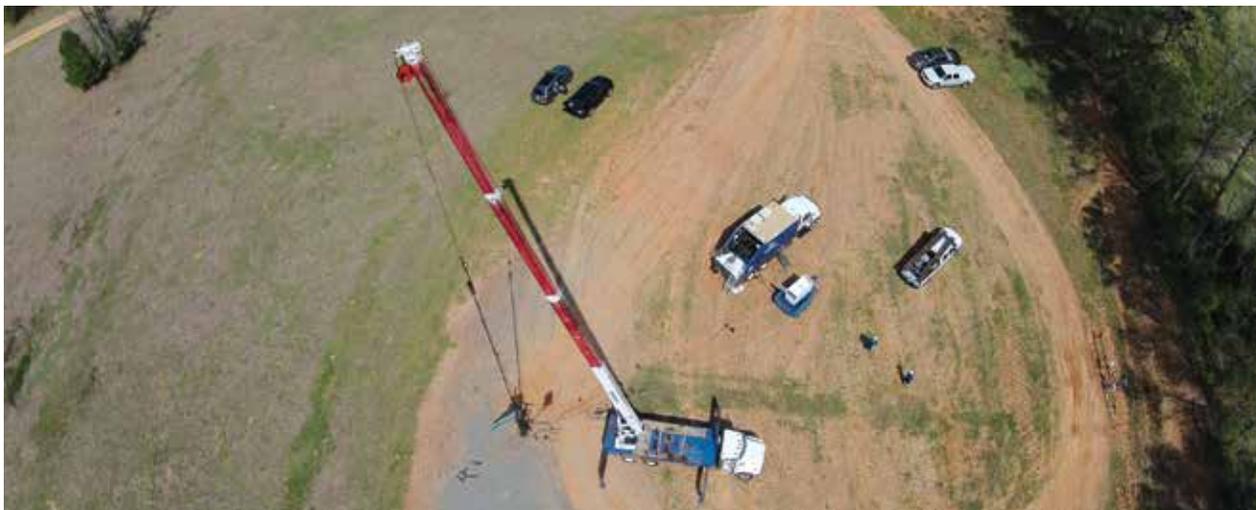
Новое измерение FNXS позволяет видеть четкий контраст между газонасыщенными интервалами и плотными пропластками, либо пропластками, насыщенными нефтью или водой. Эта способность отличает его



Прибор Pulsar позволяет регистрировать данные C/O-каротажа в два раза быстрее с более высокой точностью, чем при использовании приборов предыдущего поколения

от водородного индекса, и, по-сути, делает похожим на объемную плотность. Выполняя комплексную интерпретацию каротажа сигмы, водородного индекса и FNXS можно с высокой точностью оценить насыщенность коллекторов без привлечения данных ГИС по открытому стволу даже при смешанном насыщении.

Импульсная нейтрон-гамма спектрометрия позволяет регистрировать элементный состав слагающих горные породы минералов и флюидов. Нейтроны высоких энергий при неупругом взаимодействии с атомами вещества генерируют гамма-кванты, энергетические спектры которых могут использоваться для определения углерод/кислородного (C/O) отношения с целью оценки нефтенасыщенности независимо от минерализации пластовой воды, но при известных значениях пористости и литологического состава. Существуют два подхода к измерению C/O. Прибор Pulsar позволяет оценивать спектральное отношение C/O по результатам полной обработки энергетических спектров, сперва определяя относительные вклады углерода и кислорода отдельно. Другой подход реализует применение широких энергетических окон в диапазонах характеристических пиков углерода и кислорода в спектре неупругого рассеяния. Объем нефти, оцениваемый по данным спектрального C/O получается наиболее достоверным, несмотря на то, что стандартный метод энергетических окон имеет более высокую статистическую точность. Таким образом, прибор Pulsar обеспечивает более достоверную оценку нефтенасыщенности чем приборы предыдущего поколения, при этом регистрация C/O каротажа выполняется в два раза быстрее.



Спектрометрия ГИРЗ позволяет оценивать содержание важнейших химических элементов в породе. Относительные спектральные выходы элементов, получаемые при обработке спектров ГИНР и ГИРЗ, пересчитываются в весовые концентрации химических элементов, которые далее пересчитываются в минеральный состав и  $C_{орг.вес, \%}$  - альтернативный C/O-каротажу метод оценки нефтенасыщенности коллекторов.

Конструкция скважины и раствор могут существенно усложнять интерпретацию данных импульсного нейтронного каротажа. Основная задача обработки данных – устранить влияние скважины и цемента на измерения, оставив лишь отклик от породы. Это достигается путем

комбинирования данных ближнего зонда, измерения которого наиболее чувствительны к скважине, с данными дальних зондов, которые измеряют, по большей части, характеристики пород. Таким образом выполняется компенсация за влияние скважины измерений водородо-содержания и сигмы.

Прибор Pulsar может осуществлять регистрацию каротажа в нескольких режимах, аналогично приборам предыдущего поколения: режим GSH – для определения FNXS, сигмы, водородного индекса на большой скорости записи; и режим GSH-Lith – для одновременной регистрации GSH, элементной спектрометрии и C/O-каротажа на пониженной скорости записи.

## Самое большое количество химических элементов в пластовых условиях измеряется прибором диаметром всего 44 мм

Прибор Pulsar поднял скважинные спектрометрические измерения на абсолютно новый уровень благодаря прямому измерению весовых концентраций всех главных породообразующих химических элементов, что позволяет надёжно определять минеральный и литологический состав изучаемых горных пород. Благодаря великолепному метрологическому обеспечению компании Шлюмберже стало возможным проводить точнейшие количественные оценки концентраций элементов при пластовых температуре и давлении как в открытом, так и в обсаженном стволе.

Концентрации элементов – основа непрерывному по разрезу определению минерального состава пород. Выполняя интерпретацию данных в специализированных программных приложениях платформы Techlog, недропользователь может существенно повысить степень понимания геологического строения месторождения. Результаты геологической интерпретации далее используются в программном комплексе Petrel для более точного геологического моделирования.

Pulsar – первый прибор ГИС, позволяющий выполнять оценку  $C_{орг}$  в пластовых условиях через обсадную колонну. Количественно измеряемые концентрации химических элементов позволяют получать информацию, аналогичную расширенному анализу керна: оценку минералогического состава, содержания керогена, определения типа УВ и его объемного содержания.

$C_{орг}$  определяется путем вычитания из концентрации общего углерода, определённого из спектра Pulsar, той его части, которая приходится на твердую матрицу, в основном, за счёт карбонатных минералов. Получаемые таким образом значения  $C_{орг}$  в пластовых условиях не зависят от условий измерений и типа коллектора. Теперь недропользователю не нужно полагаться на аппроксимации, выполняемые с использованием различных эмпирических зависимостей, построенных на измерениях стандартных методов ГИС или долго ожидать результатов дорогостоящих специальных керновых исследований для достоверной оценки  $C_{орг}$ .

Имея возможность регистрировать  $C_{орг}$  по данным ГИС изучение нефтегазоматеринских пород перестало быть сложной задачей. Кроме того, диаграммы  $C_{орг}$  активно используются для оценки нефтенасыщенности обычных коллекторов.

Хим. элемент	Название элемента	ГИРЗ	ГИНР
Al	алюминий	•	•
Ba	барий	•	•
Br	бром	•	•
C	углерод		•
Ca	кальций	•	•
Cl	хлор	•	•
Cu	медь	•	
Fe	железо	•	•
Gd	гадопний	•	
H	водород	•	
K	калий	•	•
Mg	магний	•	•
Mn	марганец	•	
N*	азот*	•	
Na	натрий	•	•
O	кислород		•
P†	фосфор	•	•
S	сера	•	•
Si	кремний	•	•
Sr†	стронций	•	
Ti	титан	•	

\* по специальному заказу

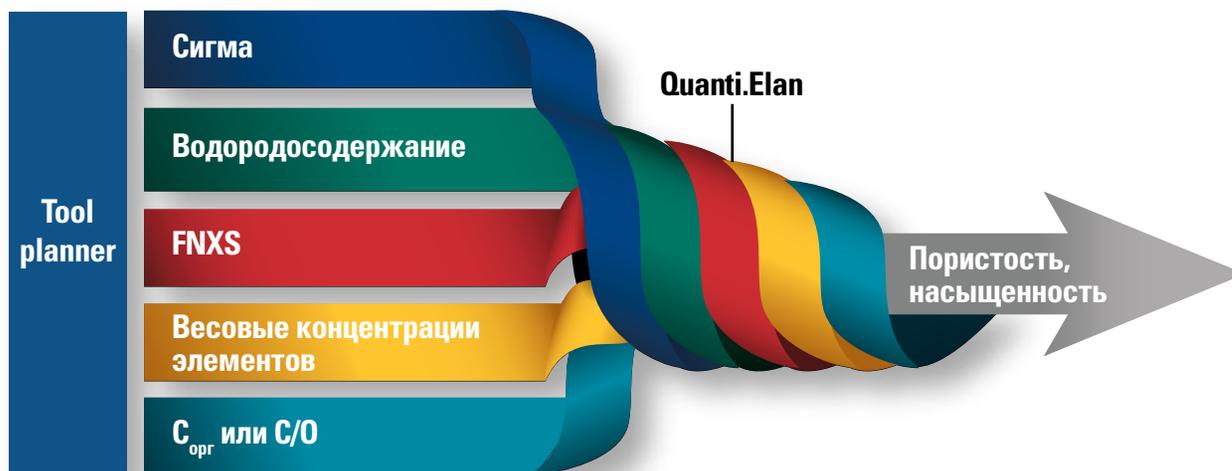
*Многофункциональный малогабаритный прибор импульсной нейтрон-гамма спектроскопии Pulsar – единственный прибор в индустрии, позволяющий выполнять оценку  $C_{орг}$  пород через колонну*

## Методика интерпретации

Благодаря компенсированным за влияние скважины высокоточным измерениям водородосодержания и сигмы, высокоточной оценке элементного и минералогического состава, а также – новому измерению FNXS, выполняемым прибором Pulsar, интерпретация данных ГИС через колонну стала высокоинформативной и самодостаточной, не требующей использования данных ГИС по открытому стволу.

Важным преимуществом этих независимых измерений является соответствие их линейным законам смещения, что позволяет применять линейные системы уравнений для одновременного расчета объемных содержаний минералов и флюидов, включая фракции воды, нефти и газа, оценивать насыщенность коллекторов даже при смешанном насыщении. По усмотрению интерпретатора, априорные данные по объекту исследований (минералогия, пористость) также могут использоваться в процессе интерпретации. Используя высокоточные измерения Pulsar и априорные данные по месторождению, можно выполнить оптимизацию петрофизической модели.

Еще одним преимуществом применения в интерпретации свойств пород, оцененных по данным Pulsar, является простота и стабильность обработки. Для обработки и интерпретации данных Pulsar используется то же программное обеспечение, что и для данных ГИС открытого ствола.



*Методика обработки настраивается для каждого конкретного случая, с учетом особенностей объекта и целей исследований. Главное преимущество такого подхода в том, что могут использоваться различные независимые измерения чтобы решить задачу относительно нескольких неизвестных (например, объемов нефти, газа и воды в пустотном пространстве) либо для перекрестной проверки достоверности измерений и точности полученных результатов.*

# Pulsar

Новый малогабаритный прибор импульсной нейтрон-гамма спектрометрии для оценки фильтрационно-емкостных свойств коллекторов через обсадную колонну



<b>Спецификация измерений</b>	
<b>Запись</b>	В реальном времени, с контролем данных на поверхности
<b>Результаты обработки</b>	
Временной спектр	Сигма, водородосодержание, сечение рассеяния быстрых нейтронов (FNXS)
Энергетический спектр	Весовые концентрации элементов из ГИНР и ГИРЗ, C/O, C <sub>орг</sub>
<b>Скорость записи*</b>	
Режим Inelastic capture	61 м/ч (200 фут/час)
Режим Inelastic gas, sigma, and hydrogen index (GSH)	1097 м/ч (3600 фут/час)
Режим Sigma lithology	305 м/ч (1000 фут/час)
<b>Диапазон измерений</b>	0-60 рп
<b>Ограничения по типу и плотности бур. р-ра</b>	нет
<b>Комбинируемость</b>	Комбинируем с приборами PS Platform и ThruBit
<b>Специальные области применения</b>	Применим в агрессивных средах: H <sub>2</sub> S и CO <sub>2</sub>
*скорость записи выбирается с использованием ПО Tool Planner	
<b>Механические спецификации</b>	
<b>Температура</b>	175 град Ц (350 град Ф)
<b>Давление</b>	103.4 Мпа (15000 psi)
<b>Мин. диаметр колонны</b>	6.03 см (2 3/8 ")
<b>Макс. диаметр колонны</b>	24.45 см (9 5/8 ")
<b>Диаметр прибора</b>	43.7 мм (1.72 ")
<b>Длина прибора</b>	5.58 м (18.3 ')
<b>Вес прибора</b>	40 кг (88 фунтов)
<b>Прочность на растяжение</b>	44480 Н (10000 фунт*с)
<b>Прочность на сжатие</b>	44500 Н (1000 фунт*с)



[slb.com/pulsar](http://slb.com/pulsar)

**Schlumberger**