

6

**C**

Carbon

13

**Al**

Aluminium

16

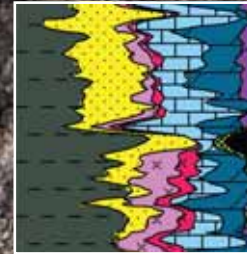
**S**

Sulfur

14

**Si**

Silicon



20

**Ca**

Calcium

26

**Fe**

Iron

1

**H**

Hydrogen

19

**K**

Potassium

11

**Na**

Sodium

25

**Mn**

Manganese

17

**Cl**

Chlorine

12

**Mg**

Magnesium



## Litho Scanner

Спектрометрия  
высокого разрешения

## Области применения

- Детальная количественная оценка минералогического состава сложных литологических комплексов
- Определение литологического состава в режиме реального времени
  - Ca, Fe, Mg и S для литологии карбонатов
  - Al, Fe, и Si для литологии терригенных пород
  - Al, Ca, Fe, K и Si для нетрадиционных коллекторов
- Количественная оценка общего содержания органического углерода ( $C_{\text{орг.вес.}\%}$ ) и насыщения УВ независимо от минерализации пластовой воды
  - Объем керогена в нетрадиционных коллекторах
  - Массовая доля нефти в залежах высоковязких нефтей в слабосцементированных нефтенасыщенных песчаниках
  - Объем нефти из  $C_{\text{орг.вес.}\%}$
- Свойства матрицы для петрофизической интерпретации
  - Точная пористость по данным плотностного каротажа
  - Идентификация газа по данным нейтронного и плотностного каротажа с учетом свойств матрицы
  - Достоверная оценка макросечения захвата пластового флюида
- Геохимические данные для стратиграфической корреляции разрезов скважин
- Металлы для рудной геологоразведки: Cu, Gd, Ni и Ti
- Быстрое и точное определение минералогии и  $C_{\text{орг.вес.}\%}$  - исходных данных для классификации литофаций с целью выделения интервалов наилучших коллекторских свойств (специальная обработка sCore\*)

## Особенности и преимущества

- Расширенный ряд определяемых элементов, включая Al, Ba, C, Ca, Cl, Fe, Gd, K, Mg, Mn, Na, S, Si, Ti, а также металлы: Cu и Ni
- Независимый метод оценки  $C_{\text{орг.вес.}\%}$
- Уникальный детектор гамма-квантов на основе легированного церием бромида лантана (LaBr3:Ce), применяемый в Litho Scanner, является самым точным в отрасли детектором для определения минералогического состава
  - Отличное разрешение регистрируемого спектра
  - Широкий диапазон рабочих температур
  - Самая высокая скорость счета в индустрии
- Применение высокопроизводительной электроники для высоких скоростей счета
- Мощный импульсный источник нейтронов (PNG)
  - Не применяется постоянный источник ионизирующего излучения, как в приборах предыдущего поколения (AmBe)
  - Мощный поток нейтронов обеспечивает повышенную точность
  - Одновременная обработка спектров гамма-излучения неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов
  - рабочая T = до 350 град. F (177 град. C)
- Прибор совместим с большинством приборов используемых в открытом стволе; возможны различные способы доставки на забой (на кабеле, на бурильных трубах, скважинными тракторами)
- Повышенная точность определения элементов, высокое качество данных при повышенных скоростях ГИС
- Неограниченное время измерения в условиях высокой температуры для работы в глубоких или горизонтальных скважинах



26

Fe

Iron

8

O

Oxygen

25

Mn

Manganese

17

Cl

Chlorine

29

Cu

Copper

11

Na

Sodium

16

S

Sulfur

6

C

Carbon

12

Mg

Magnesium

13

Al

Aluminium

## Выявление ключевых компонентов Ваших коллекторов

Прибор спектрометрии высокого разрешения Litho Scanner\* произвел революцию в индустрии, обеспечив возможность получения детальных характеристик сложных коллекторов. Кроме высокоточного определения основных элементов в условиях различных типов пород, Litho Scanner позволяет осуществлять независимую количественную оценку общего содержания органического углерода ( $C_{\text{орг.вес, \%}}$ )

20

Ca

Calcium

14

Si

Silicon

## Определение минералогического состава пород-коллекторов

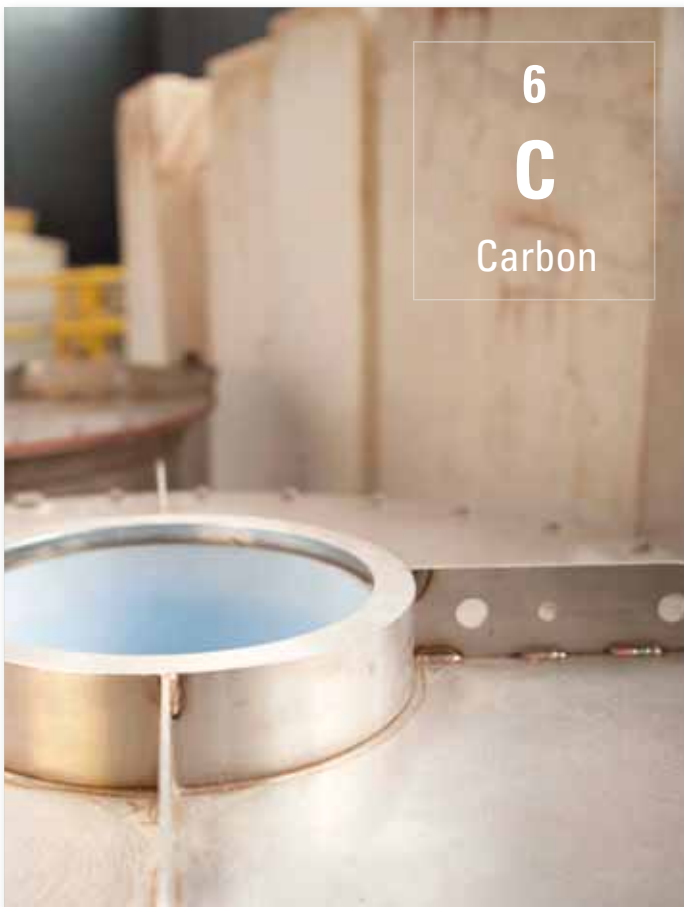
Работа в условиях сложнопостроенных коллекторов требует точного понимания их минералогического состава. Это особенно важно в случае нетрадиционных коллективов, когда количественная оценка минералогического состава и содержания органического углерода в породе крайне необходимы для точной оценки запасов углеводородов. Спектрометрия высокого разрешения Litho Scanner позволяет осуществить количественную оценку содержания химических элементов и минералогического состава пород с недоступной прежде скоростью и точностью. Высокая мощность потока нейтронов, высокая скорость счета, уникальная разрешающая способность обеспечивают возможность проведения ГИС на высоких скоростях записи без потери точности измерений. Специальная схема работы генератора нейтронов и детектор нового поколения обеспечивают возможность получать энергетические спектры гамма-квантов радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов высокого разрешения. Отсутствие источника  $^{241}\text{AmBe}$  повышает уровень радиационной безопасности и охраны окружающей среды при выполнении работ.

## Малый диаметр, высокая эффективность

Внешний диаметр прибора Litho Scanner составляет 4.5 дюйма (11.4 см), что делает его самым компактным прибором спектрометрии в отрасли. Генератор нейтронов обеспечивает мощность потока 14.1-МэВ при плотности около  $3 \times 10^8$  нейтронов/сек, что приблизительно в 8 раз больше по сравнению с другими приборами спектрометрии, имеющими химические источники нейтронов. Четкое разделение спектров неупругого рассеяния и радиационного захвата гамма квантов позволяет определять более широкий ряд элементов (включая углерод), чем при использовании приборов предыдущего поколения. Высококоростной сцинтиллятор  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  (бромид лантана, легированный церием) обеспечивает высокий световыход и превосходное разрешение регистрируемого энергетического спектра. Интеграция сцинтиллятора с самым современным фотоэлектронным умножителем и высокопроизводительной электроникой позволили довести скорость счета до более чем 2 500 000 измерений в секунду без ущерба для спектрального разрешения, в отличие от счетчиков предыдущего поколения приборов. Сцинтиллятор  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  обладает уникальной способностью работать в условиях высоких температур (до  $350^\circ\text{F}/177^\circ\text{C}$ ) без системы охлаждения, обеспечивая высокое качество спектра даже при большой продолжительности каротажных работ. Кожух детектора окружен экраном для защиты от тепловых нейтронов, содержащим бор, для минимизации влияния на измерения гамма-излучения радиационного захвата, создаваемого прибором.



Компактный прибор Litho Scanner заключает в себе мощный генератор нейтронов и уникальный сцинтилляционный детектор на основе  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ , который более чем в 10 раз быстрее, имеет от в 10-15 раз более высокий световыход и в 3 раза более высокое разрешение по сравнению с обычными висмут-германиевыми (BGO) сцинтилляционными детекторами. Массивный экран из вольфрама между ИГН и детектором служит для предотвращения прямого попадания быстрых нейтронов.

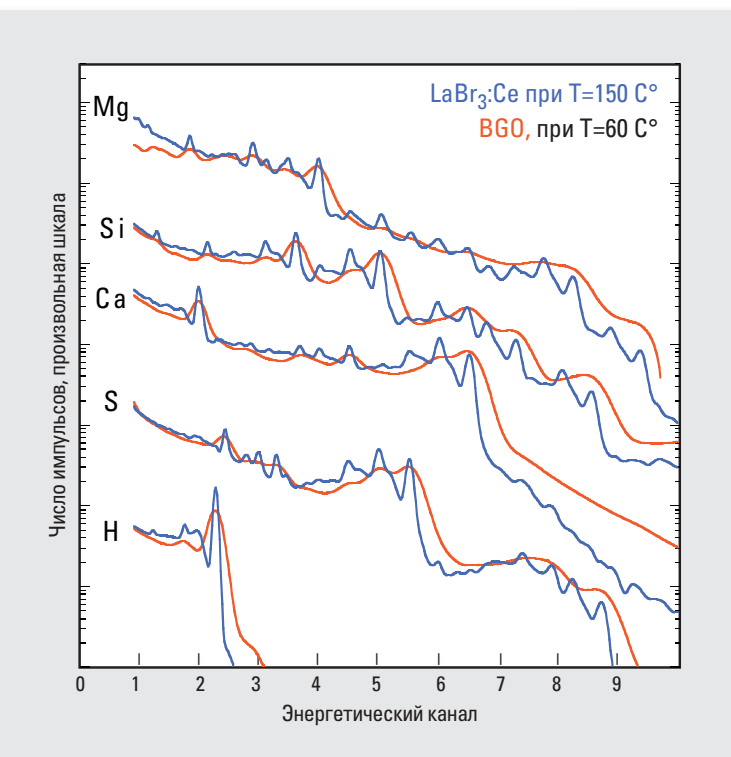
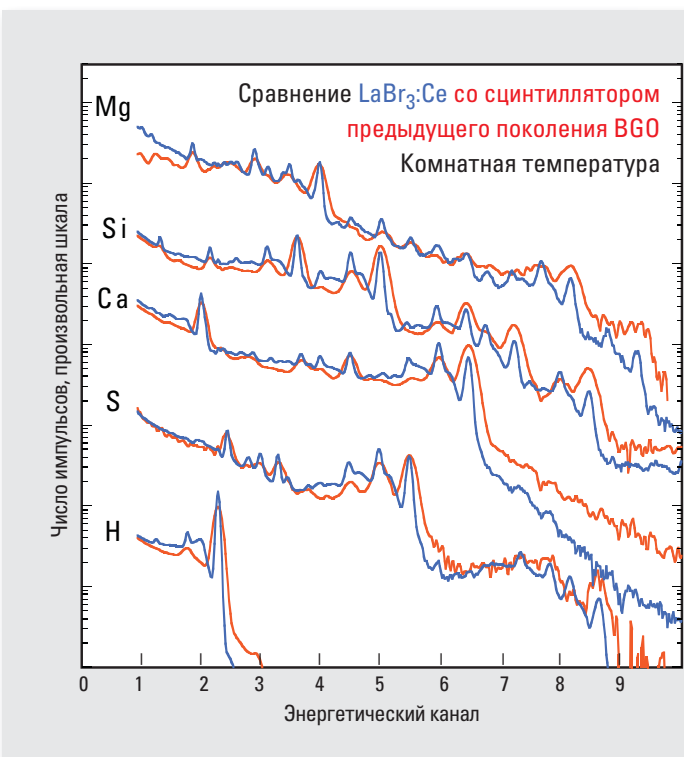


20  
Ca  
Calcium

12  
Mg  
Magnesium

14  
Si  
Silicon

С целью обеспечения точности измерений калибровка прибора производится в Калибровочном центре компании «Шлюмберге» в широком диапазоне литологического состава, величин пористости и условий измерений в средах с известными свойствами.



Энергетический спектр гамма-квантов, измеренный прибором Litho Scanner с гамма-детектором  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  (синий цвет) на левом рисунке имеет более высокое разрешение, с более дифференцированными характеристическими пиками, чем спектр, получаемый традиционными детекторами BGO (красный цвет), что способствует более точному количественному анализу элементов спектра. 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  $T=60^\circ\text{C}$ .

# Принцип работы

## Физические основы нейтрон-гамма спектрометрии

Нейтроны, испускаемые импульсным генератором прибора Litho Scanner, вызывают гамма-излучение пород в результате двух типов взаимодействия нейтронов с веществом, сопровождающихся эмиссией гамма-квантов: неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов. В результате каждого взаимодействия происходит эмиссия гамма-квантов, обладающих специфическими энергетическими характеристиками. Сцинтиллятор прибора Litho Scanner на основе лантана бромид, легированного церием (LaBr3:Ce) соединен с фотоэлектронным умножителем, формирующим комплексные цифровые

сигналы, обрабатываемые высокопроизводительным амплитудным анализатором импульсов. Анализатор определяет амплитуду импульса (пропорциональную энергии гамма-квантов) каждого регистрируемого гамма-кванта, суммирует сигналы в гистограммы распределений амплитуд: энергетические спектры гамма-излучения. Спектр измеряется во время и после каждой эмиссии нейтронов, что позволяет осуществить разделение спектров неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов. Каждый спектр разделяется на линейную комбинацию стандартных элементных спектров. На данном этапе вводятся необходимые поправки за условия измерений. Коэффициенты линейной

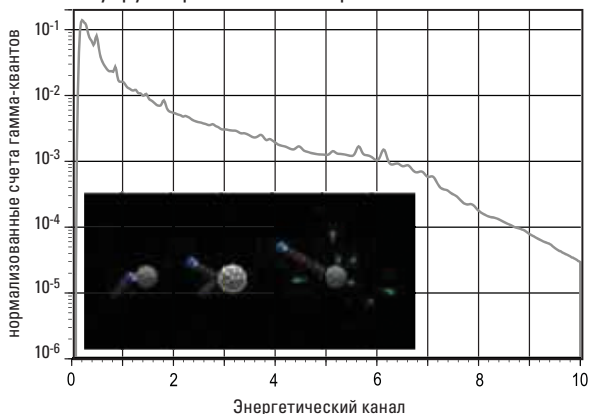
комбинации стандартных спектров преобразуются в весовые доли элементов по алгоритму модифицированной геохимической модели оксидов или путем инверсии измерений. Для оценки минералогического состава из концентраций элементов могут использоваться два метода. Первый метод – последовательная обработка SpectroLith\*, основанная на эмпирических соотношениях между концентрациями элементов и концентрациями минералов. Второй метод – использование итеративного инверсионного алгоритма, например применение многокомпонентной одно-временной инверсии комплекса ГИС в программном модуле Techlog\* Quanti ELAN\*.

# 1

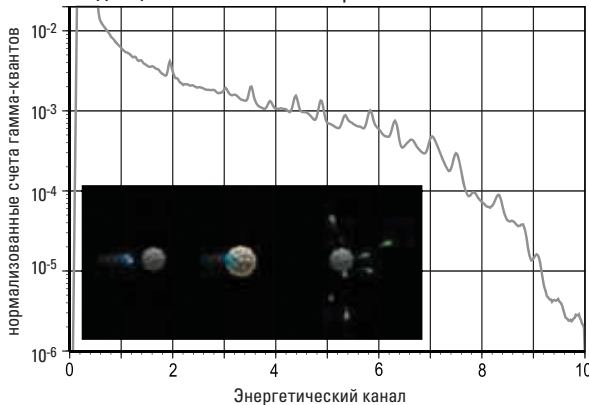
## Регистрация спектра

- Спектр неупругого рассеяния
- Спектр радиационного захвата

### Неупругое рассеяние нейтронов



### Радиационный захват нейтронов

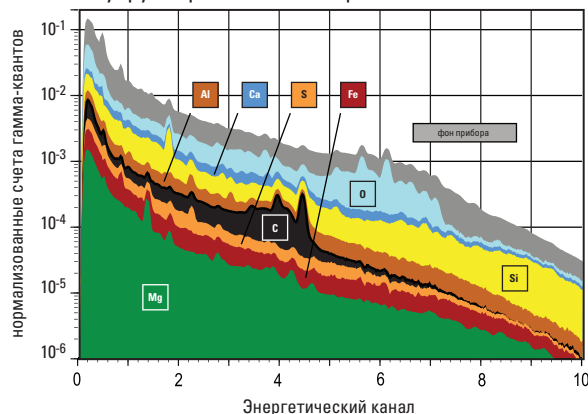


# 2

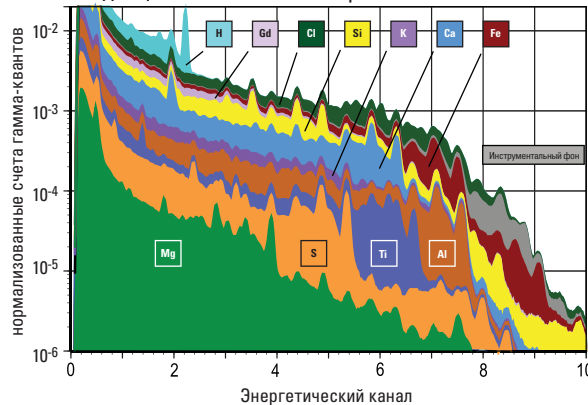
## Разделение спектра

- 13 элементов по спектру неупругого рассеяния
- 18 элементов по спектру радиационного захвата

### Неупругое рассеяние нейтронов



### Радиационный захват нейтронов



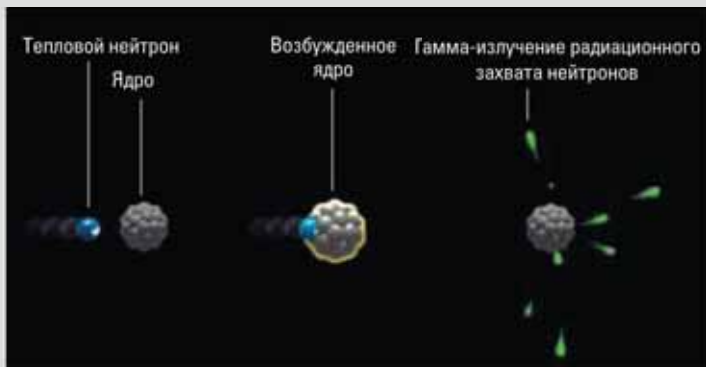
Процесс обработки данных спектрометрии начинается с получения отдельных спектров гамма-излучения: неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов.

Каждый из спектров разделяется на комбинацию спектров отдельных элементов.

## Неупругое рассеяние нейтронов



## Радиационный захват нейтронов

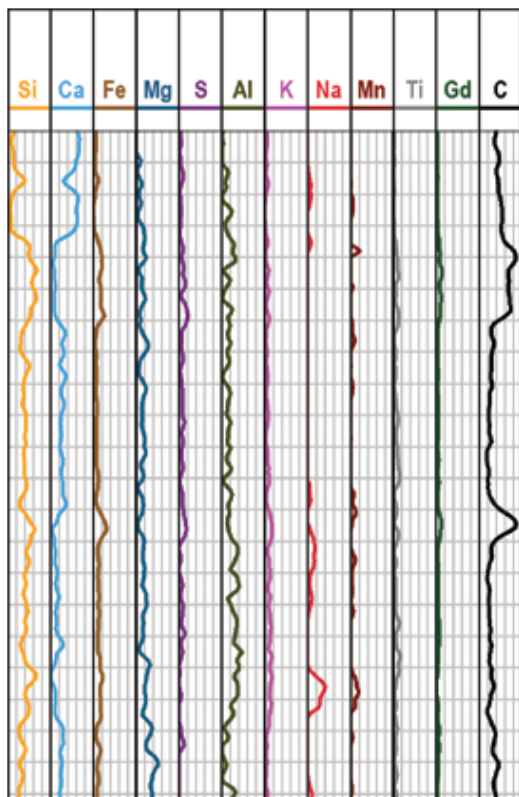


При неупругом взаимодействии (слева) быстрые нейтроны (энергия > 1 МэВ) теряют значительную часть своей энергии. Эта часть энергии передается нейтронам или протонам ядра, приводя их в возбужденное состояние. Возврат в состояние покоя сопровождается эмиссией одного или более гамма-квантов с энергетической характеристикой возбужденного ядра. Захват нейтрона (справа) заключается в поглощении нейтронов малой энергии (энергия < 0.4 эВ) определенными ядрами, которые переходят в состояние более тяжелых изотопов данного элемента. После захвата нейтронов ядро находится в возбужденном состоянии и излишняя энергия быстро испускается в виде характерного гамма-излучения. Так как выход нейтронов из импульсного генератора является нормированным, спектр захвата не подвергается искажению спектром неупругого взаимодействия, а точный спектр неупругого рассеяния можно получить путем вычитания фона из спектра, полученного во время эмиссии нейтронов. В результате получается два набора высококачественных измерений, которые являются взаимодополняющими для некоторых элементов.

3

### Завершение обработки

- Весовые доли элементов

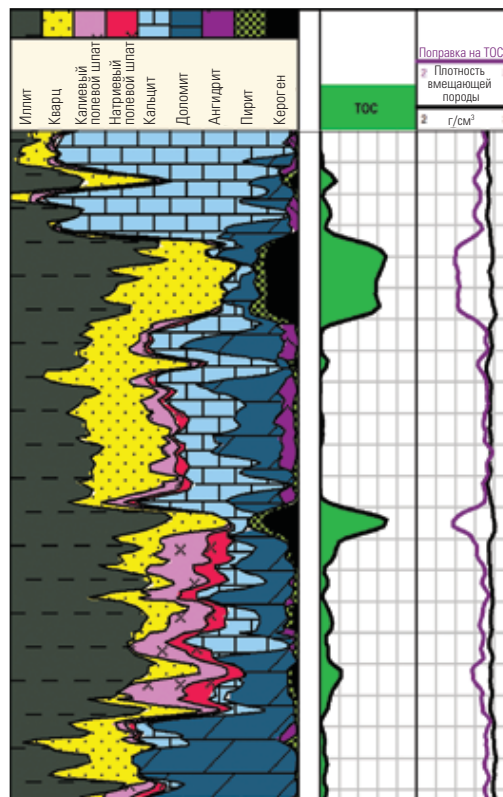


Индивидуальные спектры преобразуются в весовые доли элементов, представляемые в виде диаграмм.

4

### Интерпретация

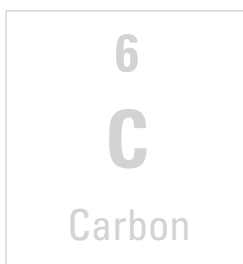
- Минералы
- Характеристики вмещающих пород
- $C_{\text{орг. вес. \%}}$



Интерпретация весовых долей элементов определяет минералогический состав, свойства матрицы, общее содержание органического углерода.

## Оценка минералогического состава

Нейтрон-гамма спектрометрия уже давно применяется при геофизических исследованиях скважин для определения концентрации элементов в породах, вскрываемых скважинами. Как показано в таблице справа, прибор Litho Scanner позволяет определять более широкий ряд элементов по сравнению со своими предшественниками. Два независимых набора энергетических спектров гамма-квантов: неупругого рассеяния и радиационного захвата высокого разрешения, получаемых прибором Litho Scanner, содержат информацию об элементах, присутствующих в породах. Некоторые элементы характерны только для одного типа взаимодействия нейтронов с веществом, другие присутствуют в обоих спектрах, что служит подтверждением корректности измерений и позволяет повысить их точность. Измерения спектра неупругого рассеяния прибором Litho Scanner представляют особый интерес, обусловленный чувствительностью к С и Mg. Не менее полезным является возможность количественной оценки содержания S.



- Магний: сопоставление характеристических пиков Mg в обоих спектрах позволяет повысить точность измерений путем определения средне-взвешенного содержания Mg в сухом весе, рассчитанного по обоим спектрам.
- В карбонатах определение Mg может применяться для точного разделения кальцита и доломита при стандартной скорости каротажа даже при использовании барита в буровом растворе. Усовершенствованный метод определения S также обеспечивает возможность количественной оценки содержания ангидрита и кальцита.

- Углерод - элемент, присущий всем карбонатным минералам. Содержание неорганического углерода, может быть определено количественно. Поле чего результат вычитается из общего содержания С, полученного по спектру неупругого рассеяния нейтронов. В результате получают  $C_{\text{орг.в.ес.}}$  либо количественно оценивают содержание керогена в газовых сланцах. Измерения S позволяют оценивать содержание пирита в богатых органическим веществом глинах. Два других важных измерения – К и Al. Прямое измерение Al используется для количественной оценки объемной глинистости. Оценка содержания К прибором Litho Scanner хорошо согласуется с результатами оценки концентрации данного элемента по данным гамма-спектрометрии естественного излучения. При этом, измерения прибором Litho Scanner менее чувствительны к раствору KCl в скважине. Полученные спектры разделяются, по составляющим спектрам элементов. Выходные спектры преобразуются в концентрации (массовые доли) элементов, которые затем используются для определения минерального состава пород (см. таблицу внизу). Плотность породы вычисляется исходя из содержания породообразующих и акцессорных минералов, далее используется для наиболее точного расчета пористости по данным стандартных измерений объемной плотности пород по разрезу (ГГК-п). Аналогичным образом концентрации элементов используются для внесения поправок за литологические эффекты в данные нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам.

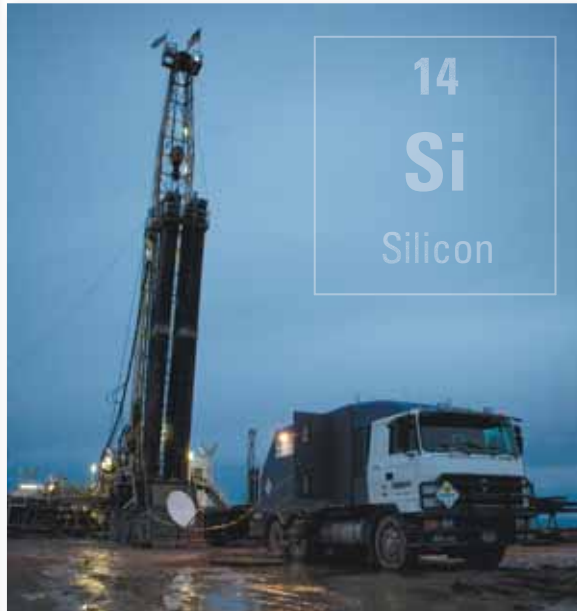
Соотношение массовых долей элементов, оцениваемых по данным Litho Scanner и минералогического состава пород

Группа минералов	Минерал	Состав
Кварц	Кварц	$SiO_2$
Полевые шпаты	Ортоклаз	$KAlSi_3O_8$
	Альбит	$NaAlSi_3O_8$
Слюда	Анортит	$CaAl_2Si_2O_8$
	Мусковит	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$
Биотит	$K(Mg, Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH, F)_2$	
Кальцит	Кальцит	$CaCO_3$
Доломит	Доломит	$CaMg(CO_3)_2$
Глины	Каолинит	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
	Иллит	$(K, H_2O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$
	Смектит (влажный)	$(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n(H_2O)$
	Смектит (сухой)	
	Хлорит	$(Ca, Na, K)(Mg, Fe, Al)_9(Si, Al)_8O_{20}(OH)_{10} \cdot n(H_2O)$
Глауконит	$(K, Na)(Fe, Al, Mg)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$	
Железосодержащие минералы	Анкерит	$Ca(Fe, Mg, Mn)(CO_3)_2$
	Сидерит	$FeCO_3$
	Пирит	$FeS_2$
	Гематит	$Fe_2O_3$
Эвапориты	Гипс	$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$
	Ангидрит	$CaSO_4$



Химический символ	Название элемента	Спектр радиационного захвата	Спектр неупругого рассеяния
Al	Алюминий	●	●
Ba	Барий	●	●
C	Углерод		●
Ca	Кальций	●	●
Cl	Хлор	●	
Cu	Медь	●	
Fe	Железо	●	●
Gd	Гадолиний	●	
H	Водород	●	
K	Калий	●	
Mg	Магний	●	●
Mn	Марганец	●	
Na	Натрий	●	
Ni	Никель	●	
O	Кислород		●
S	Сера	●	●
Si	Кремний	●	●
Ti	Титан	●	

20  
Ca  
Calcium



Прибор Litho Scanner позволяет оценивать массовые доли многих химических элементов

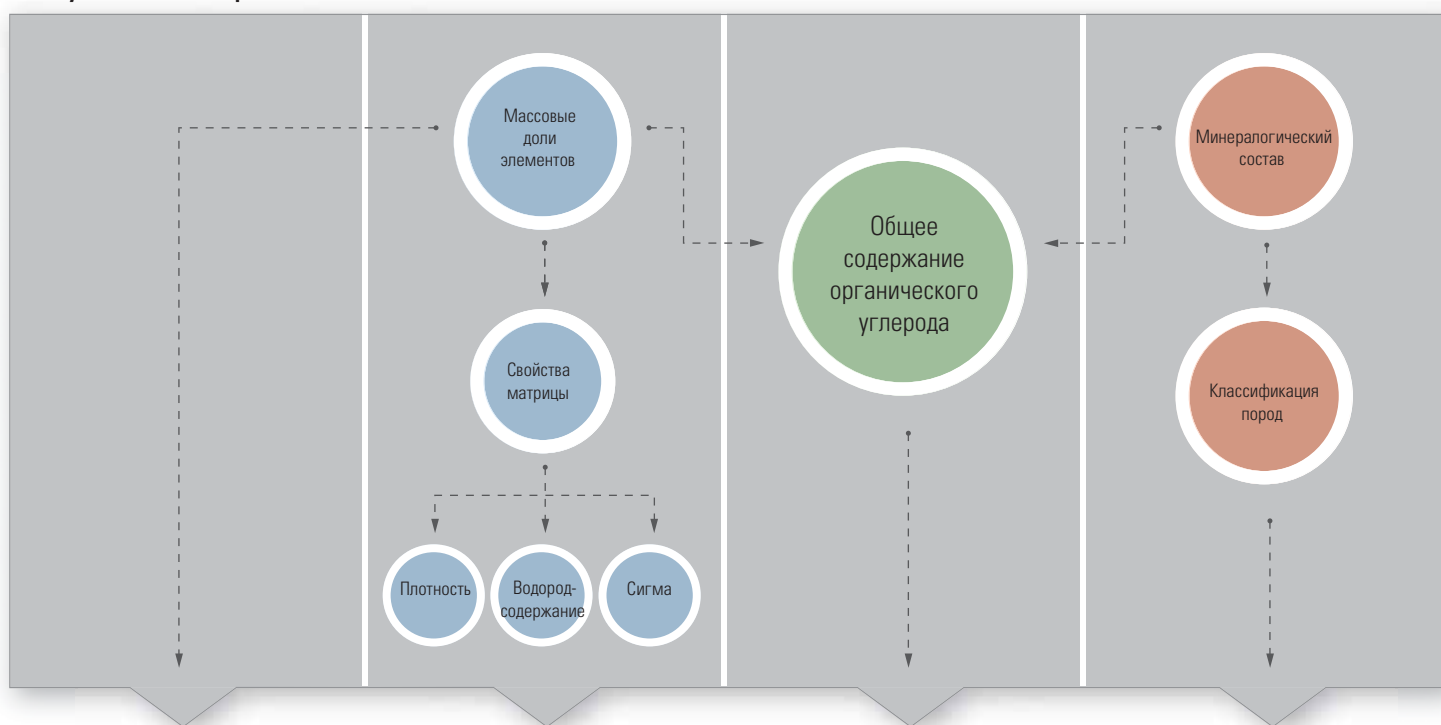
Основные элементы	Al	C	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	S	Si
Si										0.467
Al, Ca, K, Na, Si	0.097				0.141					0.303
	0.103							0.088		0.321
Al, K, Si	0.194		0.144							0.202
	0.191			0.013	0.078	0.001	0.001	0.005		0.212
C, Ca	0.060		0.002	0.136	0.072	0.077	0.003	0.004		0.182
		0.120	0.400							
C, Ca, Mg		0.130	0.217			0.132				
Al, Fe, K, Si	0.204		0.001	0.008	0.001	0.001		0.001		0.210
	0.132		0.005	0.048	0.045	0.012		0.004		0.249
	0.070		0.007	0.015	0.006	0.015		0.008		0.205
	0.091		0.013	0.020	0.006	0.020		0.007		0.264
	0.100		0.001	0.230		0.070	0.001			0.114
C, Ca, Fe	0.044		0.005	0.155	0.059	0.021		0.001		0.231
		0.116	0.194	0.162		0.035	0.027			
C, Fe		0.104		0.482						
Fe, S				0.466					0.535	
Fe				0.699						
Ca, S			0.233						0.190	
			0.294						0.240	

12  
Mg  
Magnesium

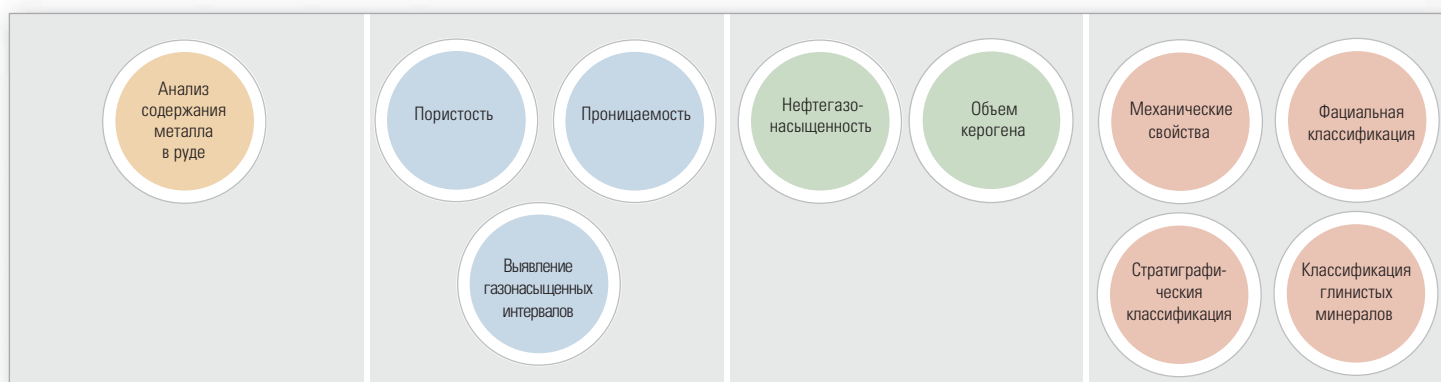
## Массовые доли элементов по данным спектроскопии

Al	C	Ca	Cu	Fe	Gd	K	Mg	Mn	Na	Ni	S	Si	Ti
----	---	----	----	----	----	---	----	----	----	----	---	----	----

## Результаты обработки данных Litho Scanner



## Петрофизическая интерпретация



Применение высокоточной оценки минералогического состава пород по результатам обработки данных Litho Scanner позволяет получать наиболее достоверные петрофизические характеристики коллекторов.

## Калибровочный центр компании «Шлюмберже»

Калибровочный центр (ЕЕСФ) был построен в 1985 г. на юго-западе г. Хьюстона. В Центре производятся измерения приборами радиоактивного каротажа в широком диапазоне искусственно созданных пластовых и геолого-технологических условий с использованием точных и эффективных методов контроля. В этой сверхсовременной лаборатории производится калибровка приборов радиоактивного каротажа производства компании «Шлюмберже». В Центре имеется большое количество искусственных пород с известными характеристиками для калибровки приборов плотностного и нейтронного каротажей. Это позволяет получить подробные экспериментальные характеристики и провести эталонное тестирование результатов моделирования в широком диапазоне литологических характе-

ристик, величин пористости, в разнообразных геолого-технологических условиях (диаметр ствола, величина отклонения от стенки скважины, тип бурового раствора, удельный вес и минерализация бурового раствора, минерализация пластовой воды). Кроме того, для характеристики работы прибора в условиях обсаженных скважин, используется набор различных обсадных колонн. Сегодня Центр является передовым отраслевым исследовательским комплексом для испытания и калибровки приборов радиоактивного каротажа. В Центре имеется полный спектр технических возможностей – от создания реалистических моделей пластовых условий до сверхсовременных технологий контроля точности производимых измерений. Специально для калибровки прибора Litho Scanner в центре были созданы дополнительные физические модели пластов, позволяющие



получать точные стандартные энергетические спектры, характеризующие широкий диапазон химических элементов, определяемый по результатам стандартной обработки данных прибора. Что касается приборов предыдущего поколения, спектральные характеристики получают на основе измеренных спектров, что обеспечивает гарантию точности и объективности измерений.



26

Fe

Iron

12

Mg

Magnesium

13

Al

Aluminium

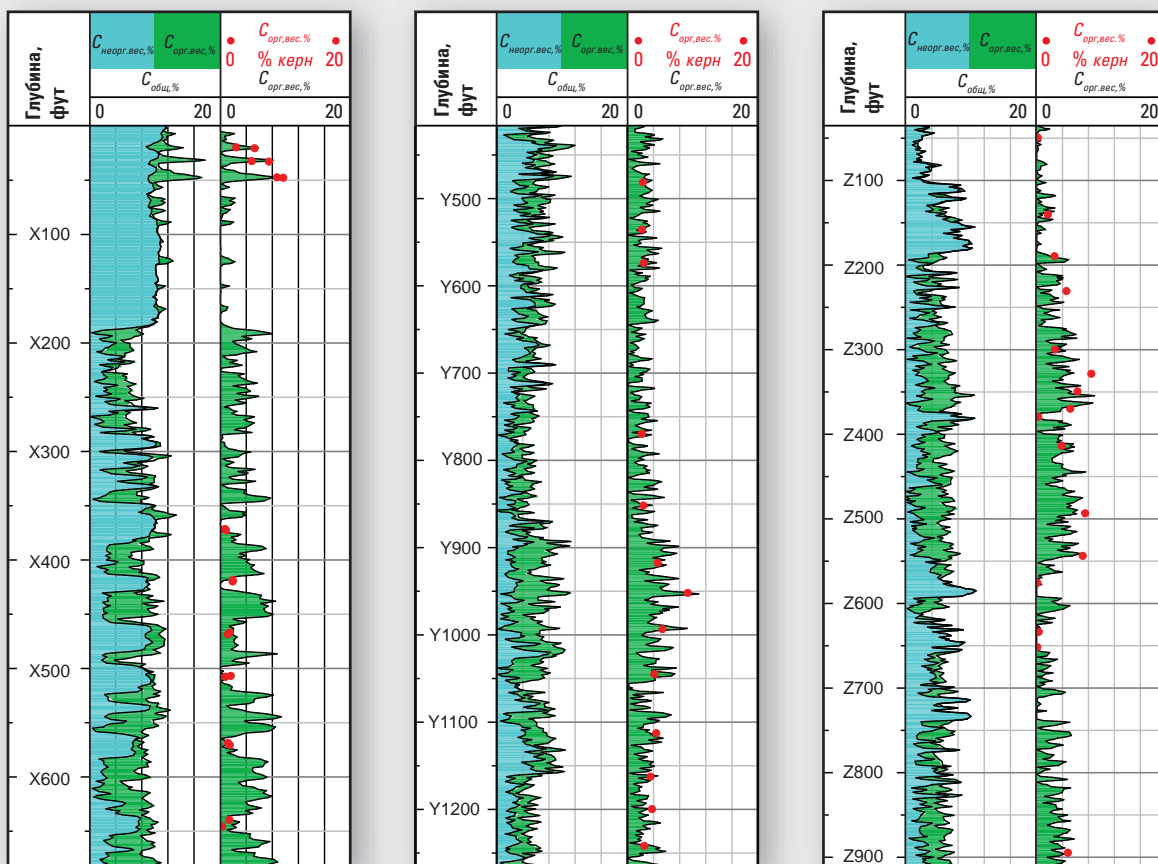


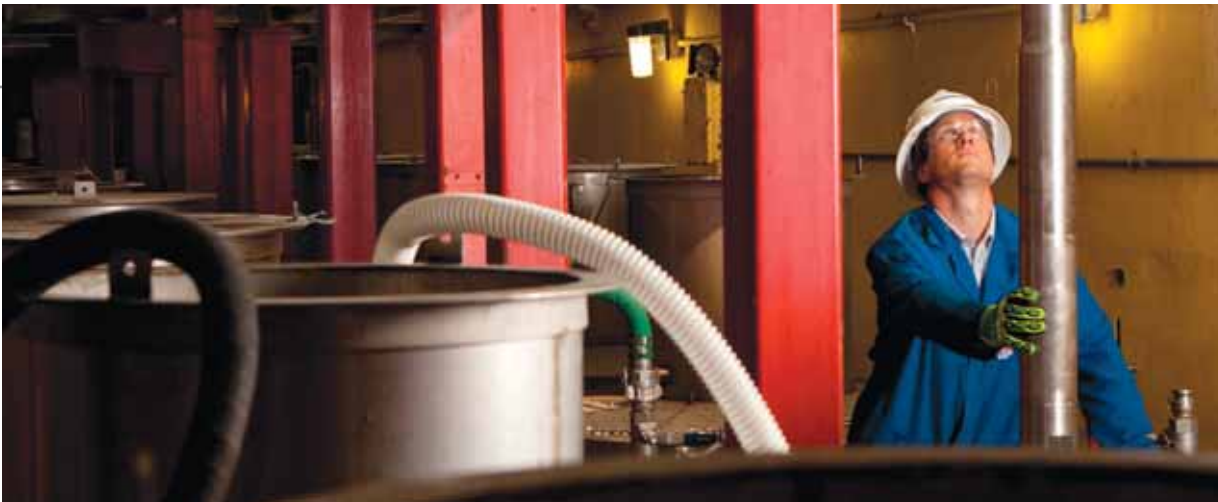
## Применение Litho Scanner для точной независимой оценки $C_{\text{орг.вес, \%}}$ в условиях нетрадиционных коллекторов

До недавнего времени для определения общего содержания органического углерода ( $C_{\text{орг.вес, \%}}$ ) использовались различные сложные модели интерпретации, требовавшие комплексирования измерений различных методов ГИС, а также – результатов лабораторных исследований образцов керна. При этом, зачастую при использовании одной и той же методологии разные исследователи получают различные результаты. Подобная неконтролируемая изменчивость результатов интерпретации данных ГИС сказывается на точности оценки важнейших параметров - емкостных свойств нетрадиционных коллекторов. Независимая

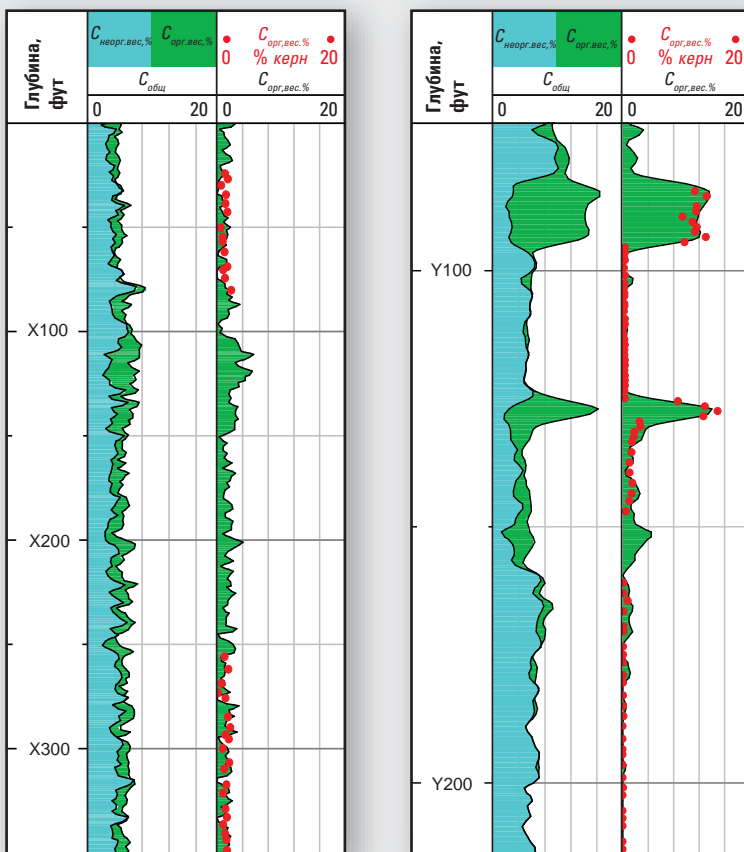
оценка содержания органического углерода основана на измерениях лишь одного прибора - Litho Scanner, позволяющего получать концентрацию углерода в породах, проводить количественную оценку минералов, содержащих углерод, в составе пород и последующий расчет концентрации неорганического углерода в породах. Разница между двумя последними показателями и есть искомое значение  $C_{\text{орг.вес, \%}}$ , получаемое независимо от геолого-технологических и пластовых условий.  $C_{\text{орг.вес, \%}}$  представляется в виде непрерывной диаграммы, получаемой при полевой обработке данных прямо на скважине.

Буровой раствор на водной основе





### Буровой раствор на углеводородной основе



Результаты оценки  $C_{\text{орг.вес.}\%}$  получаемые по данным Litho Scanner в условиях буровых растворов на водной и углеводородной основе совпадают с результатами лабораторных измерений  $C_{\text{орг.вес.}\%}$  на образцах керна, отобранных на различных месторождениях Северной Америки. Для каждой скважины: первая дорожка соответствует общему содержанию углерода в породе ( $C_{\text{общ}}$ , черная кривая) по результатам измерения спектра неупругого рассеяния нейтронов и общего содержания неорганического углерода ( $C_{\text{неорг.вес.}\%}$ , синяя заливка) в минералах пород по результатам обработки данных спектрометрии. Разница между этими кривыми соответствует общему содержанию органического углерода ( $C_{\text{орг.вес.}\%}$ , зеленая заливка), сопоставленному на второй дорожке с результатами лабораторных определений данной характеристики на образцах керна (красные точки).

## Пример №2

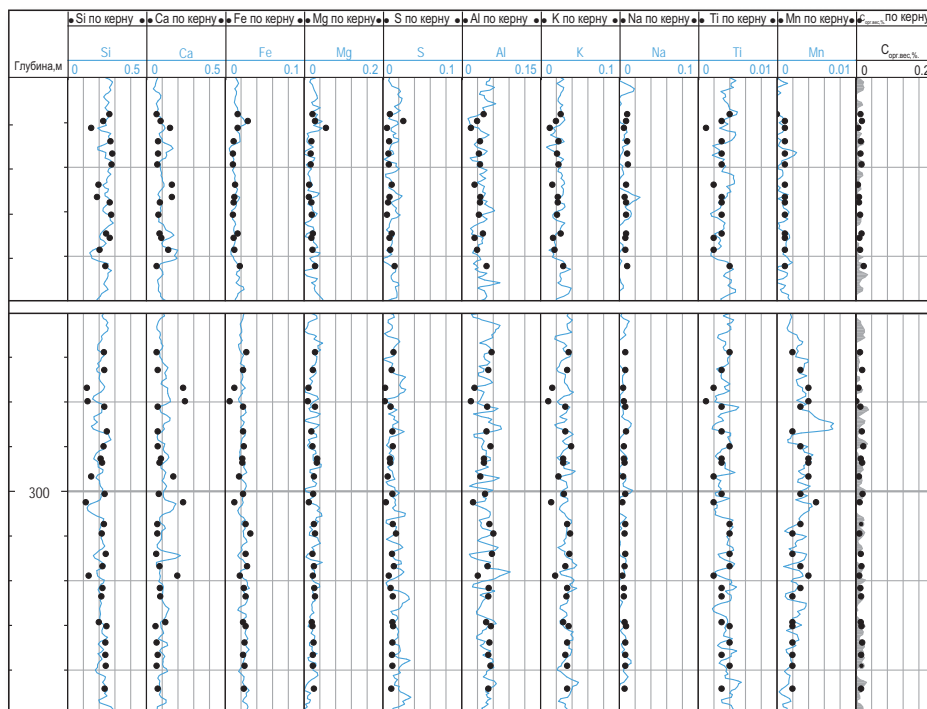


Высокоточная оценка пористости и объемного содержания керогена коллекторов залежи сланцевого газа по результатам литологического анализа, количественного определения  $C_{\text{орг.вес, \%}}$  и плотности матрицы пород, полученных по данным Litho Scanner

Канадской нефтегазодобывающей компании потребовалась оценка ФЕС коллекторов залежи сланцевого газа, включая оценку пористости и объема керогена. Коллектора представлены глинистыми сланцами полиминерального состава. В состав этих пород входит несколько различных глинистых минералов, кварц, полевой шпат, кальцит, доломит, анкерит и пирит. Однако, данных стандартного комплекса ГИС (РК, электрометрия и АК) недостаточно для корректной оценки литологии и объемного содержания керогена – важнейших характеристик для адекватной оценки пористости данного типа коллекторов. Понимая, что для корректной оценки минералогического состава пород по данным спектрометрии необходима как можно более точная и детальная оценка концентрации химических элементов,

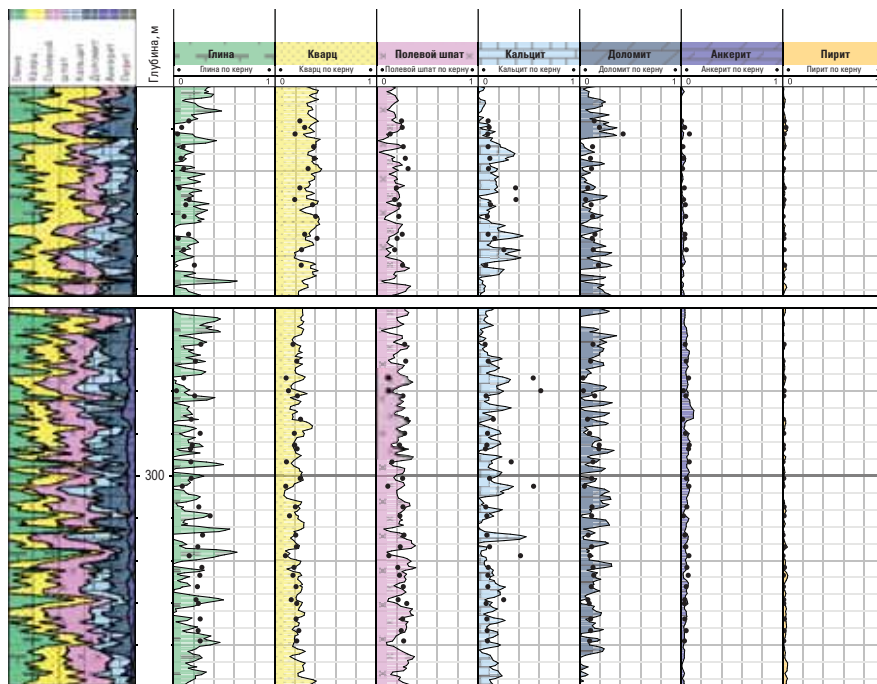
недропользователь выполнил регистрацию данных прибором Litho Scanner. Общая концентрация углерода по данным обработки спектра неупругого рассеяния нейтронов, а также – результаты оценки минералогического состава (с использованием обоих энергетических спектров) были использованы для оценки объемного содержания органического углерода ( $C_{\text{орг.вес, \%}}$ ). Оценка выполнена независимо от измерений пористости и УЭС. Плотность матрицы коллекторов полученная по результатам оценки концентраций химических элементов по данным Litho Scanner была скорректирована за содержание  $C_{\text{орг.вес, \%}}$ . Скорректированная плотность матрицы и объемная плотность, полученная по данным ГГК-п были использованы для высокоточного расчета пористости коллекторов.

Как видно из планшета, результаты оценки концентрации химических элементов и  $C_{\text{орг.вес, \%}}$  полученные по данным Litho Scanner весьма точно соответствуют результатам лабораторных исследований керна.

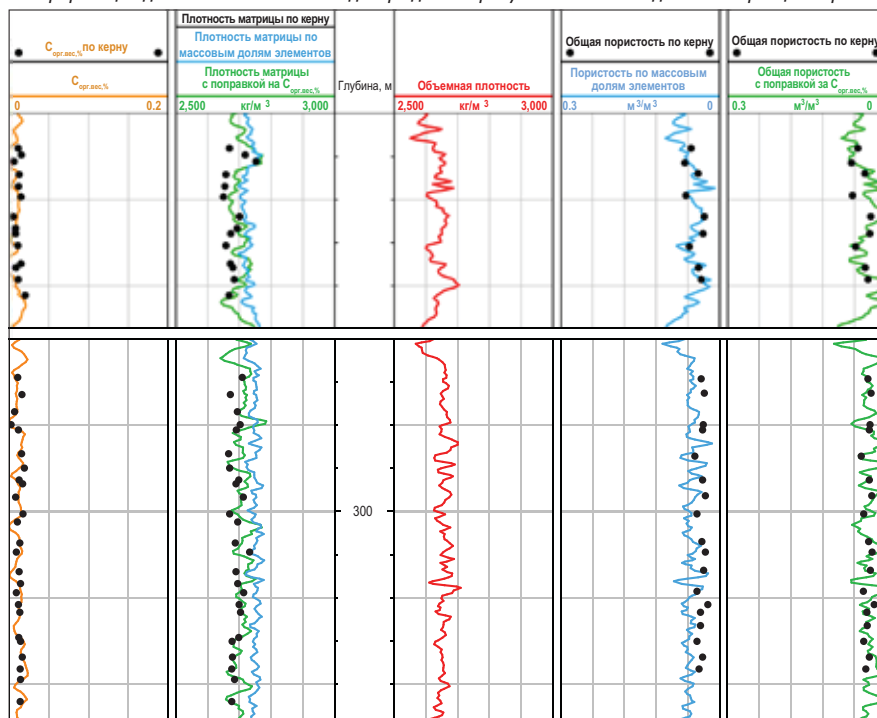


Точное определение массовых долей элементов необходимо для выполнения минералогического анализа коллекторов залежи сланцевого газа. Значения концентраций химических элементов, оцененных по данным Litho Scanner подтверждаются результатами лабораторных исследований образцов керна. Результаты оценки  $C_{\text{орг.вес, \%}}$  по данным Litho Scanner также имеют очень хорошую сходимость с результатами лабораторных определений данной характеристики на образцах керна.

Высокоточная оценка пористости и объемного содержания керогена коллекторов залежи сланцевого газа по результатам литологического анализа, количественного определения  $C_{\text{орг.вес.}\%}$  и плотности матрицы пород, полученных по данным Litho Scanner



Результаты оценки минералогического состава пород, полученные по результатам обработки и интерпретации данных Litho Scanner подтверждаются результатами исследований образцов керна.



Оцененная по результатам обработки данных Litho Scanner плотность матрицы, скорректированная за содержание органического углерода (дорожка 2) и полученная в результате интерпретации пористость (дорожка 5) гораздо лучше согласуются с результатами оценки соответствующих характеристик на образцах керна нежели плотность матрицы (трек 2) и пористость без применения поправки за содержание органики (трек 4).

Весовые доли элементов, полученные по результатам обработки данных Litho Scanner были использованы в качестве исходных данных для построения объемной литологической модели в программном приложении Techlog Quanti ELAN. В качестве компонентов, модель включала в себя глины, кварц, полевой шпат, кальцит, доломит, анкерит и пирит. Как видно из верхнего планшета, рассчитанный минералогический состав хорошо согласуется с результатами оценки минералогического состава на керне. Для точной оценки пористости по данным плотностного каротажа, необходимо использовать корректные значения плотности матрицы пород. Плотность матрицы, рассчитанная из концентраций химических элементов не включает в себя объем керогена, что делает ее значения завышенными по сравнению с аналогичной характеристикой, оцененной на керне (дорожка 2 на нижнем планшете). Для поправки плотности матрицы за содержание керогена было использовано  $C_{\text{орг.вес.}\%}$  полученное по данным Litho Scanner. После ввода поправки результат оценки плотности матрицы имеет хорошую сходимость с определениями на керне. Таким образом, оценки плотности матрицы были получены по результатам обработки данных лишь одного прибора. Результаты расчета пористости по данным ГГК-п при использовании плотности матрицы, скорректированной за содержание твердого органического вещества (дорожка 5) имеют лучшую сходимость с результатами оценки пористости на образцах керна, нежели при использовании плотности матрицы без введения данной поправки (дорожка 4).



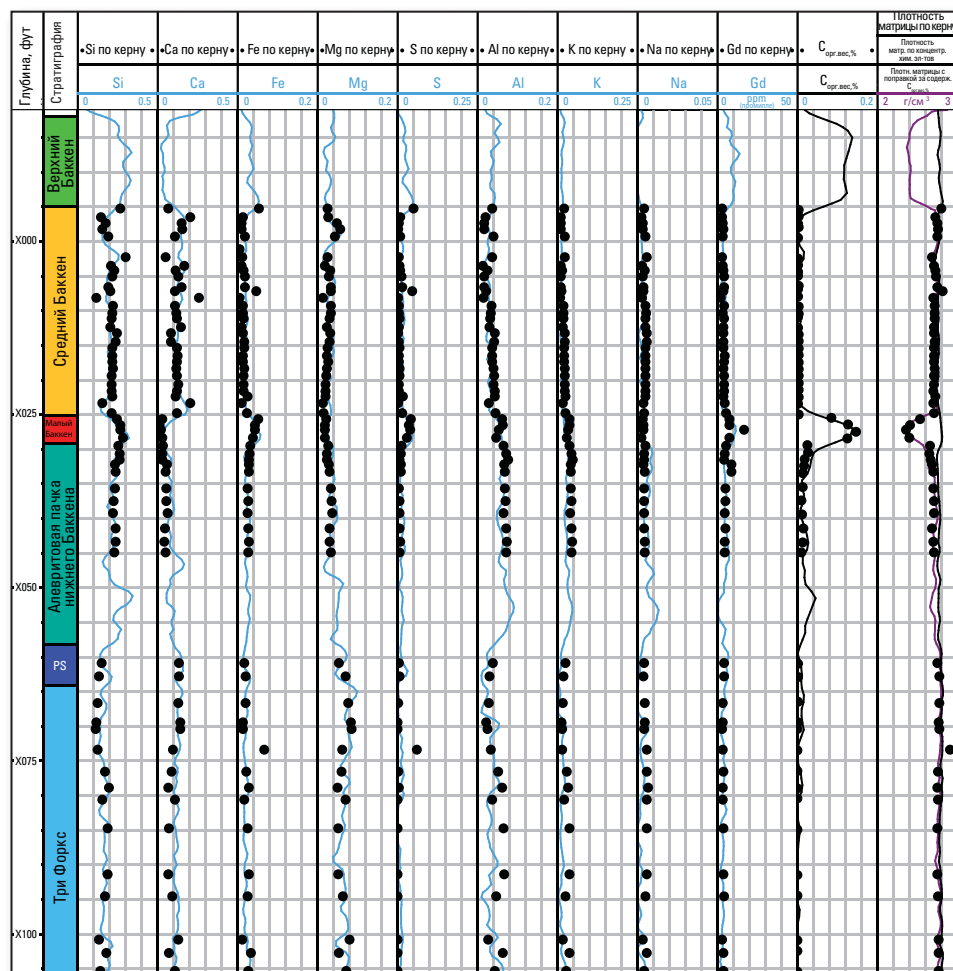
## Высокоточная оценка пористости коллекторов с учетом $C_{\text{орг.вес, \%}}$ и минералогического состава на месторождениях Баккен и Три Форкс

Оценка пористости и насыщения низкопористых и очень низкопроницаемых доломитистых известняков в первую очередь требует корректной оценки плотности матрицы, которая, в свою очередь, зависит от точности определения минералогического состава пород. Высокая точность оценки концентрации химических элементов по данным Litho Scanner, а, в частности, магния, позволяет производить детальную оценку минералогического состава даже таких сложнопостроенных пород-коллекторов, как Баккен и Три Форкс.

Другой важной задачей при изучении нетрадиционных коллекторов подобного рода является количественная оценка объемного содержания органического углерода ( $C_{\text{орг.вес, \%}}$ ). Применение прибора Litho Scanner позволяет проводить измерение общей концентрации углерода, а также – рассчитывать объемное содержание неорганического углерода из минералогической модели. Далее из двух этих характеристик получают высокоточную оценку  $C_{\text{орг.вес, \%}}$  без дополнительной настройки на керновые данные и другой априорной информации.

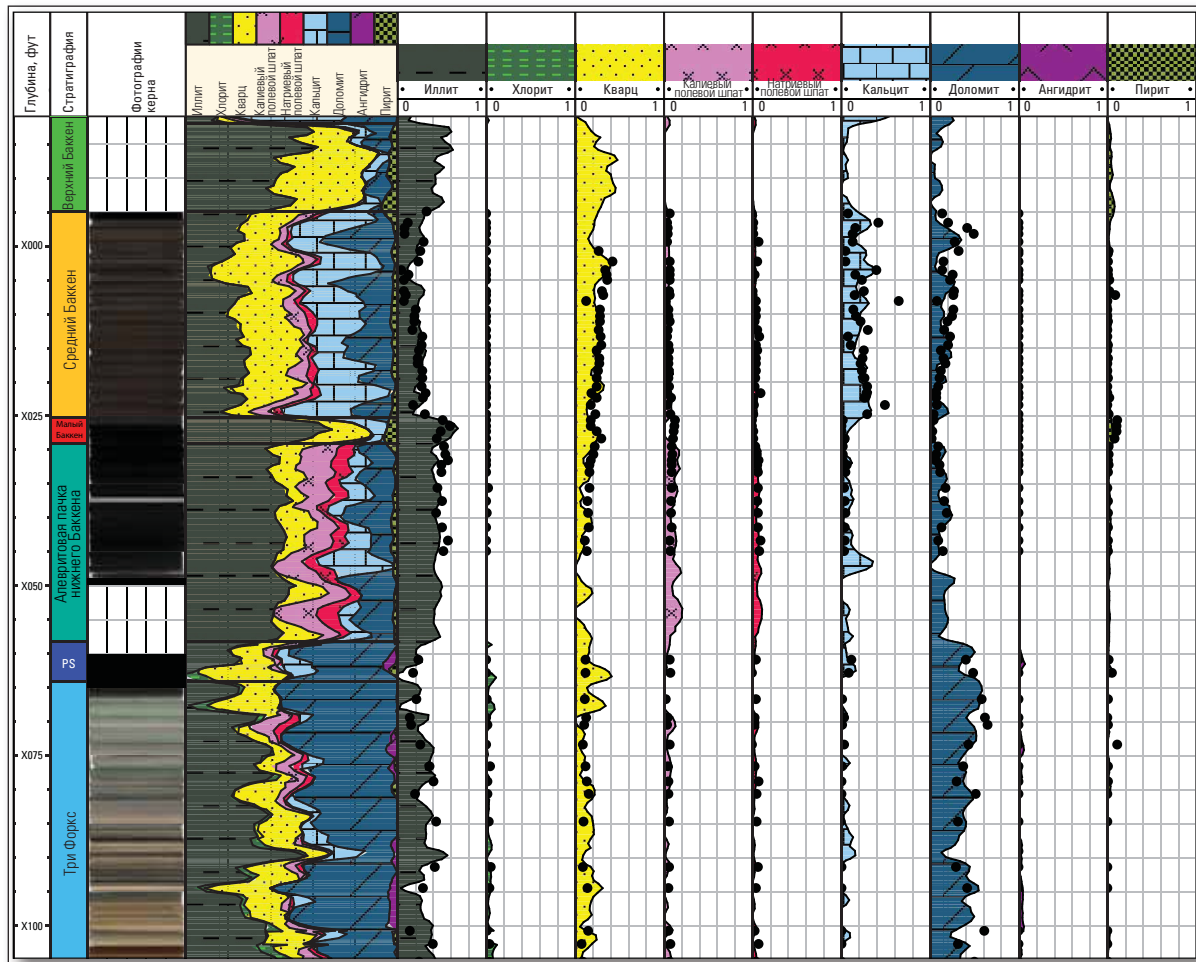
Получаемые в результате минералогический состав коллекторов и плотность матрицы коллекторов, скорректированная за содержание органики позволяют производить корректный расчет пористости.

Как показано на планшетах, результаты оценки концентраций химических элементов и минералогического состава пород по данным Litho Scanner подтверждаются результатами исследований образцов керна. Результаты оценки плотности матрицы, скорректированной за содержание органики по данным Litho Scanner имеют очень хорошую сходимость с результатами лабораторных исследований образцов керна.



Точная оценка концентраций химических элементов играет важнейшую роль при оценке минералогического состава нетрадиционных пород-коллекторов. Результаты оценки концентраций химических элементов по данным Litho Scanner имеют очень хорошую сходимость со значениями концентраций элементов, определенными при лабораторных исследованиях образцов керна. В частности, результаты оценки концентрации магния, необходимой для разделения карбонатной составляющей на кальцит и доломит, имеют очень близкие значения.





Минералогический состав пород, полученный по результатам оценки концентраций химических элементов по данным Litho Scanner имеет хорошую сходимость с результатами оценки минералогического состава, выполненной на образцах керна. Как видно из фотографий керна, пласт Три Форкс представлен тонким переслаиванием различных по своим свойствам пород, что является причиной некоторого несоответствия определений параметров по данным ГИС вследствие различной вертикальной разрешающей способности методов.

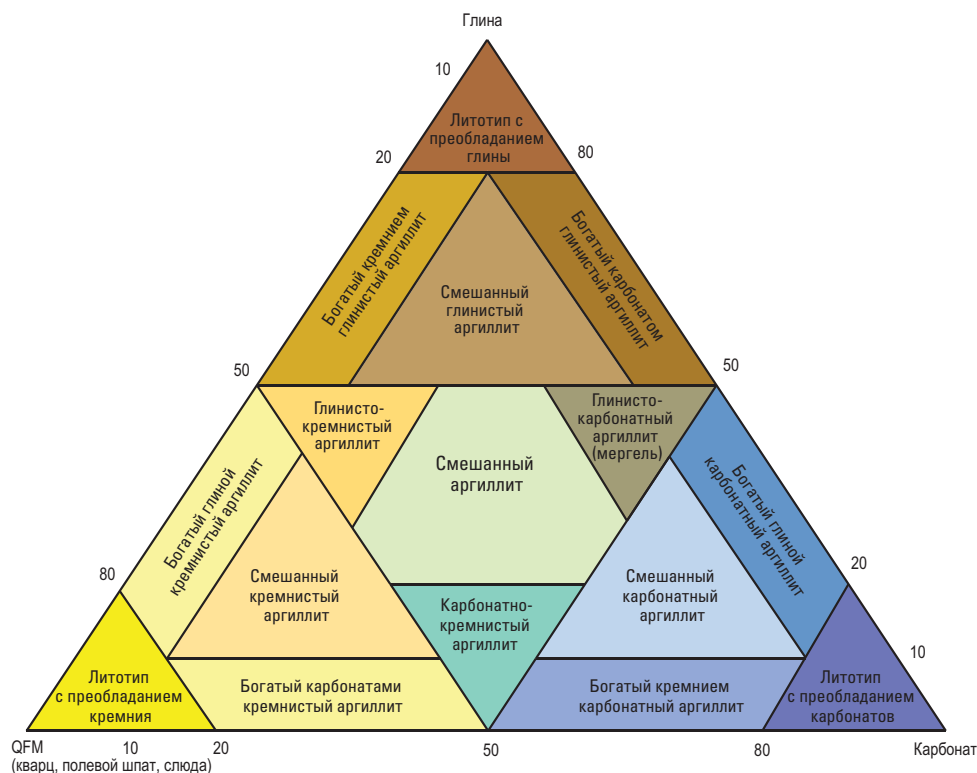


### Точная классификация органосодержащих аргиллитов по минералогическому составу, определенному по данным Litho Scanner

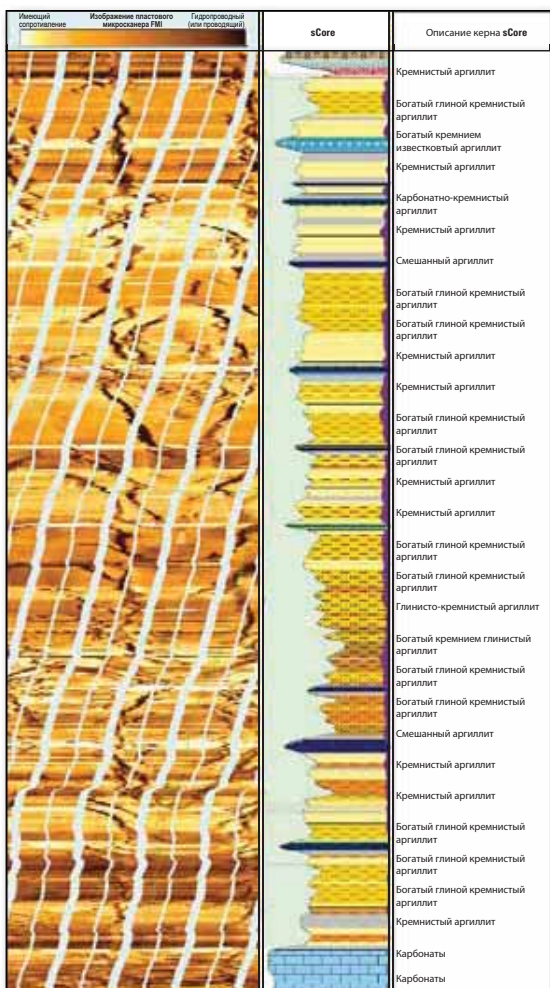
Важнейшим условием для успешного заканчивания скважин в условиях нефтяных и газовых глинистых сланцев является возможность обоснованного выбора интервалов пласта, характеризующихся наилучшими фильтрационно-емкостными характеристиками и, потенциально, высоким качеством заканчивания. Выделение таких интервалов возможно осуществлять оперативно и в автоматическом режиме, применяя систему литофациальной классификации sScore. Данная система классификации основана на соотношении минералогических групп в пределах треугольной диаграммы для оценки коллекторских свойств и индикаторов качества заканчивания для органосодержащих аргиллитов. Несмотря на широко распространенное обобщающее название

«глинистых сланцев», органосодержащие аргиллиты являются мелкозернистыми осадочными породами с высоким содержанием органического углерода и обычно имеют сложный минералогический состав с высокой вертикальной неоднородностью. В дополнение к выделению оптимальных интервалов с наилучшими коллекторскими свойствами и высоким качеством заканчивания, классификация sScore помогает недропользователю точнее понять условия осадконакопления и выполнить наиболее корректную корреляцию коллекторов в пределах месторождений и нефтегазоносных провинций. Анализ диаграммы sScore проводится при минимальной степени обработки данных, проведения стандартной интерпретации исходных данных не требуется.

Краткие поинтервальные описания, такие как содержание органического углерода, пирита и наличие разбухающих глин, после обработки данных по этой методике выводятся на графический планшет. В результате обработки по алгоритму sScore предоставляется краткое описание разреза органических аргиллитов, вскрытого скважиной, а также необходимая информация для оперативного принятия решений о выборе целевых интервалов глубин для бурения горизонтальных стволов, интервалов установки хвостовиков. Такие характеристики как пористость, общее содержание органического углерода, плотность трещин и напряжение горных пород наносятся на треугольную диаграмму sScore для их совместного сопоставления с типами литофаций.

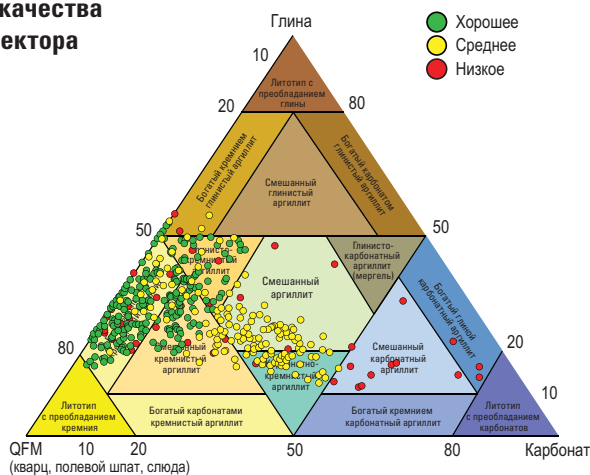


Классификация sScore, предлагаемая для описания органосодержащих аргиллитов, определяется треугольной диаграммой, три оси которой представляют собой сухие веса компонентов – глин, карбонатов, группы минералов QFM (кварца, полевых шпатов, слюды). Термин «преобладающий компонент» применяется по отношению к тем компонентам аргиллитов, содержание которых превышает 80%. Если содержание преобладающего компонента составляет от 50% до 80%, аргиллит является кремнистым (50% < сухого веса QFM < 80%), глинистым (50% < сухого веса глины < 80%), или карбонатным (50% < сухого веса карбонатов < 80%). Термин «богатый» применяется, если содержание вторичного компонента - от 20% до 50% общего состава.

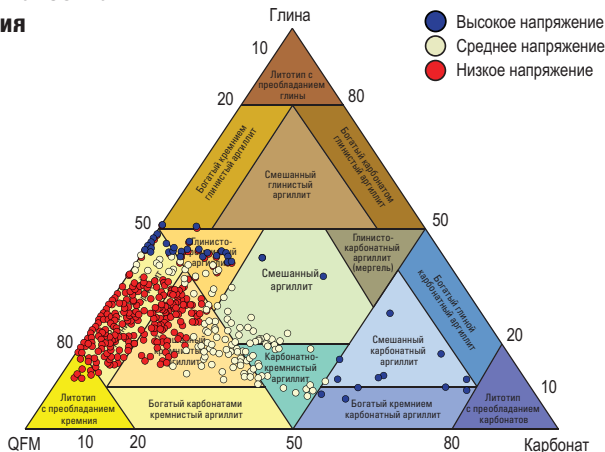


В данной скважине, пробуренной в аргиллитах пласта Барнетт, исследования проведенные прибором Litho Scanner в комплексе с данными стандартного каротажа позволили получить высококачественные исходные данные для выполнения детального объемного минералогического анализа, оценки содержания  $C_{org.вес.}\%$ , которые были использованы для оперативной обработки по алгоритму sCore. Использование результатов минералогического анализа по данным прибора Litho Scanner позволяет существенно экономить время благодаря высокой скорости обработки данных, получаемых сразу же после проведения исследований в скважине. Проведение рентгено-структурного анализа на образцах керна подразумевает подготовку образцов, доставку их в лабораторию, что зачастую занимает довольно продолжительное время. Показатели качества коллекторов и качества заканчивания наносятся на треугольную диаграмму sCore, как показано ниже, с целью выбора оптимальных интервалов для заканчивания как вертикальных, так и горизонтальных скважин.

**Показатель качества пласта-коллектора**



**Показатель качества заканчивания**



На планшете представлены результаты обработки данных по системе sCore для 200-футового интервала вертикальной скважины, пробуренной в аргиллитах пласта Барнетт. Диаграмма пластового микроимиджера сопротивлений FMI\* (дорожка №1) показывает многочисленные интервалы развития техногенных трещин. Заливкой светло-серого цвета на дорожке №2 показан интервал разреза, для которого была применена классификация sCore. Диаграмма литофаций sCore, представленная на дорожке №2 построена по данным прибора Litho Scanner. Флаг  $C_{org.вес.}\%$  показанный заливкой лилового цвета на дорожке №2, справа, соответствует условию  $C_{org.вес.}\% > 2\%$ . Темно-серая заливка соответствует зонам размывов ствола скважины. Левая граница литофаций соответствует коэффициенту хрупкости (MBI). На дорожке №3 представлены краткие описания литофаций sCore в текстовом формате.

Пористость по газу (вверху) и напряжение пород в пластовых условиях (внизу), нанесенные на диаграмму sCore, позволяют точнее оценить показатели качества коллектора и заканчивания в интервалах органосодержащих аргиллитов.



## Технические данные

### Прибор Litho Scanner

#### Измерения

Результаты обработки данных Спектры химических элементов, концентрации химических элементов,  $C_{\text{орг.вещ.}\%}$ , сухие веса минералов, свойства матрицы

Скорость каротажа<sup>†</sup> Макс.: 3 600 фут/ч (1097 м/ч)

Диапазон измерений от 1 до 10 МэВ

Вертикальное разрешение 18 дюймов (45.72 см)

Тип БР и ограничения по удельному весу БР Отсутствуют

#### Механические характеристики

Рабочая температура 350°F (177°C)

Рабочее давление 20 000 psi (138 МПа)

Диаметр ствола - мин. 5.5 дюйма (13.97 см)

Диаметр ствола—макс.<sup>††</sup> 24 дюйма (60.96 см)

Внешний диаметр 4.5 дюйма (11.4 см)

Длина 14 футов (4.27 м)

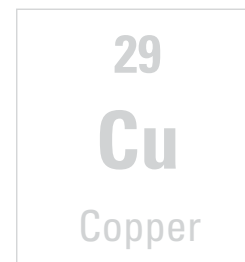
Вес (в воздухе) 366 фунтов (166 кг)

Предельное натяжение 55 000 фунтов (244 652 Н)

Предельное сжатие 22 500 фунтов (100 085 Н)

<sup>†</sup> При планировании работы возможно проведение оценки точности определения концентраций элементов и интерпретируемых характеристик, таких как плотность матрицы с учетом конкретных условий измерений и рекомендуемой скорости записи каротажа.

<sup>††</sup> С учетом отклоняющей рессоры



[www.slb.com/ls](http://www.slb.com/ls)

**Schlumberger**