
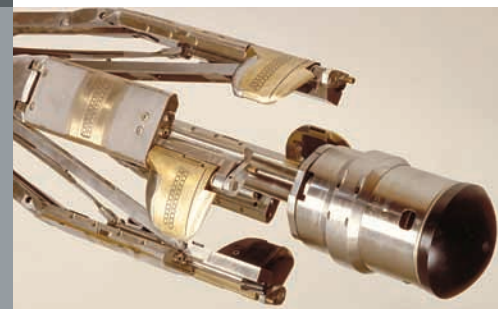




Schlumberger

FMI



Геология скважины,
геомеханика и
трехмерное
моделирование
пласта

Области применения

- Структурная геология
 - Элементы залегания геологических объектов – угол падения и азимуты простираения пластов
 - Разрывные нарушения
- Седиментологический анализ
 - Конседиментационный структурный угол
 - Направление палеотечений
 - Оконтуривание осадочных тел
 - Анизотропия ФЕС, гидродинамически сообщающиеся и экранированные пласты
 - Тонкослоистые коллектора
- Текстура горных пород
 - Вертикальное изменение гранулярного состава
 - Тектурные особенности карбонатов
 - Оценка вторичной пористости
 - Системы трещин
- Дополнение к программам исследований сплошного и бокового керна, и исследований с помощью пластоиспытателя на кабеле
 - Привязка керна по глубине и пространственная ориентировка образцов керна
 - Детальное описание особенностей коллекторов в интервалах, не охарактеризованных керном
 - Привязка по глубине образцов бокового керна и выбор оптимальных интервалов для модульного пластоиспытателя MDT*
- Геомеханический анализ
 - Анализ механического воздействия на призабойную зону в процессе бурения
 - Геологическая калибровка механической модели среды
 - Определение оптимальных параметров бурового раствора
- Дополнительная информация для обработки и интерпретации комплекса геологических и геофизических данных
 - Моделирование пласта с использованием детерминированного подхода
 - Критерии распределения для стохастического моделирования
 - Определение петрофизических параметров с высокой степенью достоверности

Общие сведения

Прибор FMI* (патент) позволяет регистрировать имиджи микробового каротажа в скважинах, заполненных раствором на водной основе:

- Покрытие исследованием ствола скважины составляет 80% в скважине диаметром 215,9 мм (8 дюймов)
- Вертикальное и горизонтальное разрешение 5 мм (0.2 дюйма)
- Данные после обработки на скважине могут использоваться с целью определения элементов залегания вскрытых отложений
- Прибор является концевым и может комбинироваться с другими приборами на кабеле, например приборами Platform Express (стандартный комплекс), ARI* (азимутальный боковой каротаж) или AIT* (индукционный каротаж) и т.д.

Имиджи FMI регистрируются 192-мя электродами расположенными на 8 башмаках прибора. Специальный контур фокусировки направляет токи измерения в пласт. Низкочастотная составляющая регистрируемого сигнала информативна для определения петрофизических и литологических характеристик пород, а высокочастотная составляющая используется для

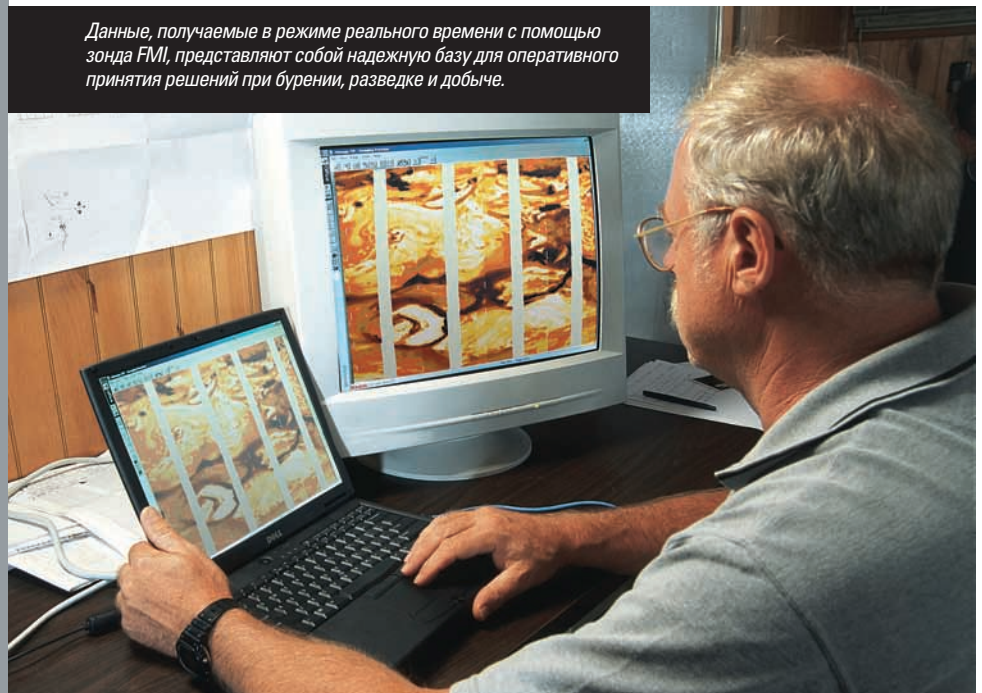
детализации имиджей. Глубина зондирования, достигающая 762 мм, сопоставима с глубиной зондирования приборов каротажа.

Изображение нормализуется путем калибровки по опорному низкочастотному сигналу сопротивления с большей глубины исследования, зарегистрированному самим прибором, или по данным сопротивления, зарегистрированным другими приборами бокового каротажа.

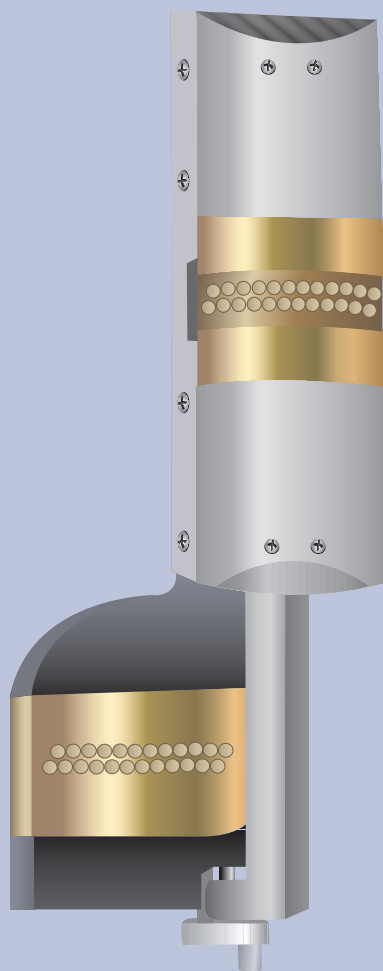
Благодаря точно рассчитанному расстоянию между дисковыми электродами, новой конструкции основного и откидного башмаков, а также высокой скорости передачи данных системой цифровой телеметрии удалось достичь разрешения по вертикали и по горизонтали в 5 мм. Таким образом, изображение позволяет проводить точную оценку параметров любого объекта размером от 5 мм. Оценка объектов менее 5 мм может быть произведена путем измерения количества тока на электроде. На изображениях, получаемых с помощью FMI, отчетливо прослеживаются мелкомасштабные объекты, например трещины размером 50 мкм, заполненные проводящим раствором.

Физические принципы, на которых основана работа FMI, делают прибор универсальным средством для получения комплекса инфор-

Данные, получаемые в режиме реального времени с помощью зонда FMI, представляют собой надежную базу для оперативного принятия решений при бурении, разведке и добыче.



Прибор FMI: башмак и затвор со смещенной по горизонтали системой дисковых электродов.



мации, позволяющей с большой степенью надежности и точности определять геологические и геофизические параметры среды и коллекторские свойства пласта. Поступающая в процессе записи информация используется для изучения тектоники горных пород, определения и оценки режимов осадконакопления и свойств осадочного комплекса, определения текстуры горных пород, а также в качестве дополнения к данным, получаемым в результате исследования керна. Данные FMI также используются для анализа геомеханики пласта с целью выявления образований, являющихся резуль-

татом бурения, например, ориентированных вывалов и трещин на стенке скважины. Проведение анализа анизотропии напряжений по данным FMI позволяет получить важнейшую информацию, необходимую для обеспечения стабильности ствола скважины путем корректировки программы бурения и оптимизации параметров буровых растворов. Кроме того, данные о направлении максимального горизонтального напряжения используются для повышения эффективности нефтяных и газовых объектов.

Преимущества

- Экономия времени и затрат: полноценная геолого-геофизическая интерпретация имиджей, зарегистрированных за один спуск-подъем
- Получение качественных данных при проведении работ в сложных технических условиях, включая сильно-наклонные и горизонтальные скважины
- Точная и надежная интерпретация особенностей горных пород
- Детальное описание пластов-коллекторов
- Точное определение продуктивных зон
- Получение информации непосредственно на рабочей площадке для оперативного принятия решений

Особенности

- Покрытие исследованием ствола скважины составляет 80% в скважине диаметром 215,9 мм (8 дюймов)
- Измерения с высоким разрешением 5 мм (0.2 дюйма)
- Детальность имиджей до 50 мкм
- Возможность проведения исследований в наклонных и горизонтальных скважинах
- Проведение первичной обработки, экспресс-интерпретации и определения основных элементов залегания пластов в автоматическом режиме непосредственно на скважине
- Различные режимы сканирования: полное изображение, сканирование в режиме пластового накломера (четыре электрода)
- Совместимость прибора FMI с другими типами каротажных приборов
- Отличное качество сигнала благодаря фокусировке тока измерения
- Имиджи микробоккового каротажа в меньшей степени подвержены влиянию неровностей и каверн в стволе скважины

Физические принципы измерения

На рисунке ниже иллюстрируются физические принципы, на которых основаны измерения прибора FMI. Напряжение создает переменный ток (АС), испускаемый каждым дисковым электродом в нижней секции прибора и регистрируемый электродом в верхней секции корпуса прибора.

Линия тока, исходящего из каждого дискового электрода, изначально фокусируется на небольшом объеме пласта, находящимся в непосредственном контакте с электродом. Далее токовые линии распространяются, охватывая больший объем породы между нижним и верхним электродами. Ток измерения состоит из двух компонентов:

- высокоразрешающая составляющая, модулируется по изменениям удельного сопротивления объема пласта, в непосредственной близости от дискового электрода
- низкоразрешающая составляющая, модулируется по удельному сопротивлению зоны между нижним и верхним электродами.

Использование переменного тока в качестве тока измерения, позволяет свести к минимуму влияние постоянного тока, создаваемого при трении башмака о стенки скважины, а также эффекты от измене-

ния потенциала собственной поляризации (СП).

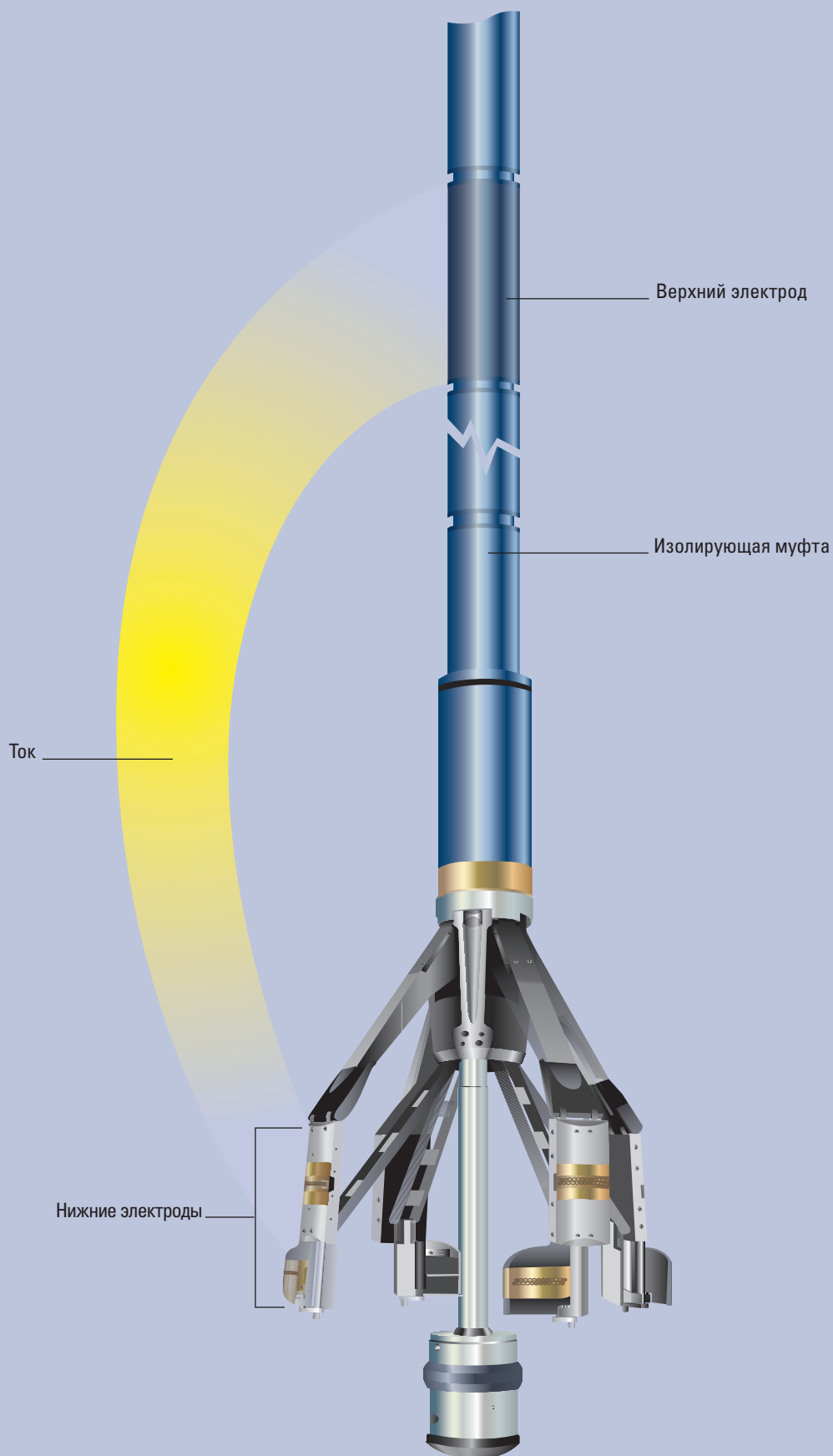
Имидж микросопротивления ствола скважины генерируется на основе измерений тока системой дисковых электродов. Высокоразрешающая компонента вносит значительный вклад в формирование изображений, поскольку ее величина может варьироваться на одной глубине от одного электрода к другому. Низкоразрешающая компонента выступает только в качестве постепенно изменяющегося фона. Изменения микросопротивления, связанные с изменениями литологических и петрофизических свойств горной породы, регистрируемые, в основном, по высокоразрешающей составляющей тока, интерпретируются на имиджах как текстурные особенности породы, внутрипластовая слоистость, а также трещины различного происхождения.

Дисковые электроды FMI регистрируют только данные изменения удельного сопротивления, отражающие корреляционную зависимость от электропроводности пласта, а не фактическую проводимость / сопротивление. Это объясняется тем, что высоко- и низкоразрешающие составляющие, регистрируемые одновременно, сходны по величине и не могут быть полностью разделены. Высокоразрешающие

кривые, регистрируемые дисковыми электродами, как правило, нормализуются показания бокового каротажа малой глубинности для получения кривой удельного сопротивления. На сравнительно малых глубинах исследования такая масштабированная кривая дает высокоразрешающую диаграмму удельного сопротивления.

Номинальное разрешение прибора FMI соответствует диаметру его электрода, равному 5 мм. Теоретически, это предполагает возможность определения истинного размера объектов более 5 мм. Объекты менее 5 мм могут быть видимыми в зависимости от степени контраста удельного сопротивления самого объекта с вмещающей породой. Если объект видим, то его размер может отображаться на имиджах не меньшим, чем 5 мм. В соответствии с теорией дискретизации имиджи FMI регистрируются с разрешением 2,5 мм (0.1 дюйма) по вертикали и по горизонтали, что составляет половину шага квантования, т.е. в соответствии с номинальным разрешением. Для получения горизонтального разрешения 0.1 дюйма группы дисковых электродов на основном и откидном башмаках расположены двумя рядами, смещенными по горизонтали друг относительно друга.

Направление распространения электрического тока FMI



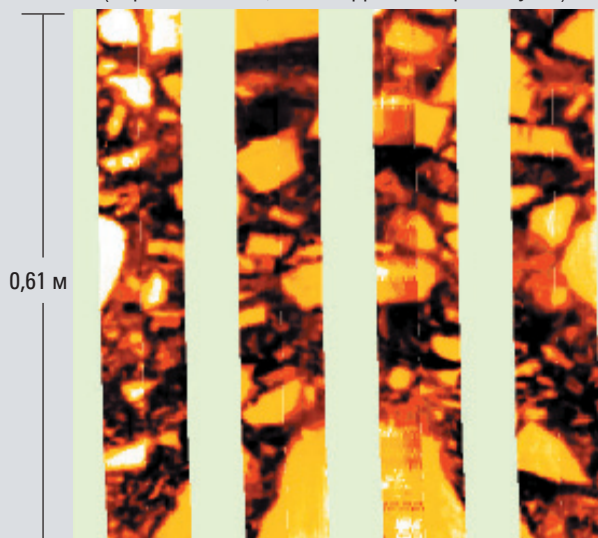
Характеристика текстурных особенностей породы

Имиджи прибора FMI позволяют получить важнейшую информацию в случаях, когда свойства продуктивности коллектора определяются текстурой горной породы и особенностями режима осадконакопления. На приведен-

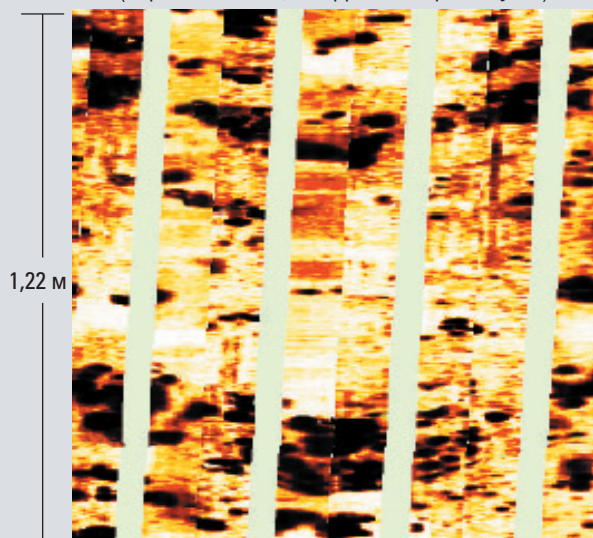
ном ниже рисунке показаны попарно карбонаты (два верхних примера) и песчаники (два нижних примера) с одинаковой пористостью, рассчитанной по другим методам ГИС, но с абсолютно различной проницаемостью и, следовательно, с различной продуктивностью.

Имиджи FMI, позволяют охарактеризовать текстурные особенности породы, являющиеся определяющими в отношении потенциальной продуктивности пластов с одинаковыми значениями пористости.

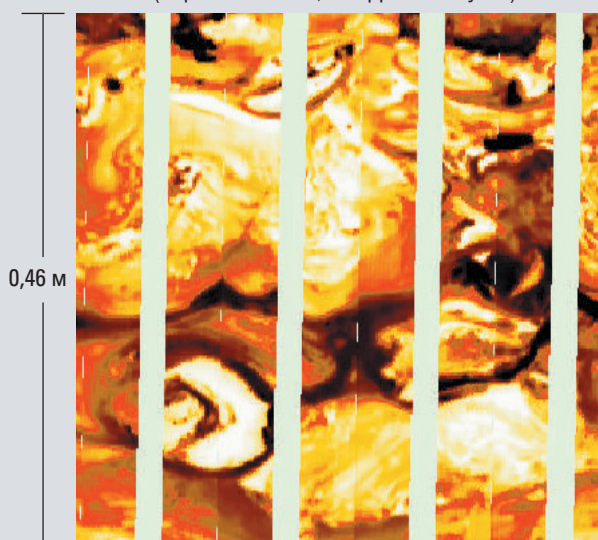
брекчия обрушения
(пористость 14%, 6000 баррелей нефти в сутки)



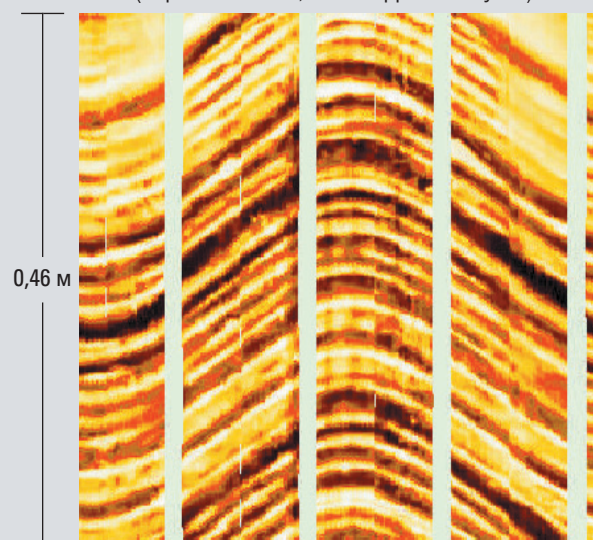
трещиноватый известняк
(пористость 14%, 0 баррелей нефти в сутки)



песчаник оползневого типа
(пористость 18%, 0 баррелей в сутки)



турбидитные береговые отложения
(пористость 18%, 5000 баррелей в сутки)



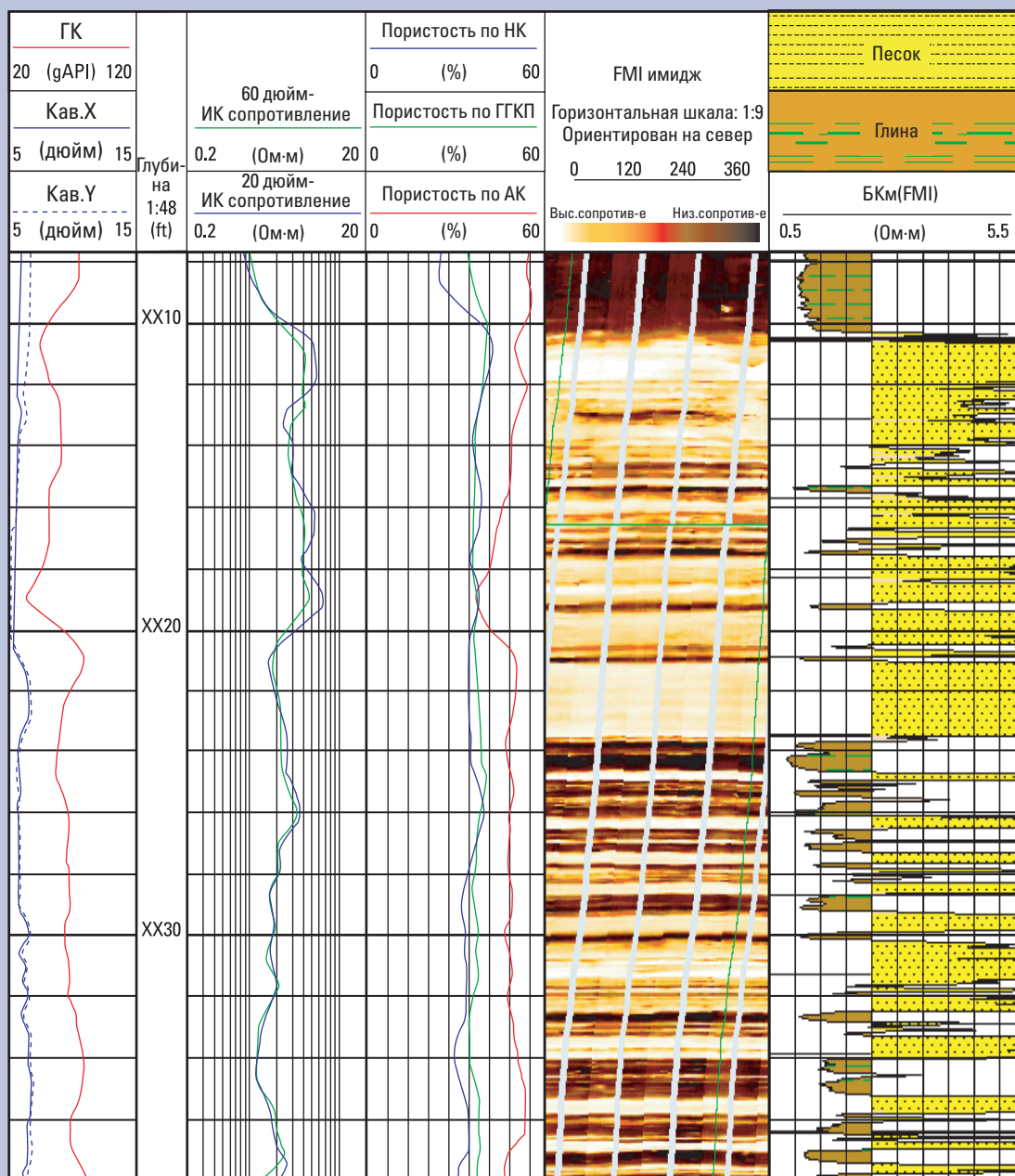
Определение эффективной мощности в тонкослоистых осадочных породах

Прибор FMI является оптимальным методом для определения эффективной мощности коллектора в тонкослоистых разрезах, типичных для флювиального и турбидитного режимов осадконакопления. Точное определение эффективной мощности песча-

ника производится методом расчета кривой высокоразрешающего удельного сопротивления по данным измерений FMI и расчленением разреза на глинистые и песчаные прослои, применяя граничное значение по сопротивлению. Этот метод дает возможность выделить маломощные слои с толщиной до 5 мм (0.2 дюйма). Участки с прослоями более тонкими, чем номинальное разрешение

прибора, расчленяются путем сопоставления результатов литофациального анализа по имиджам FMI и результатами оценки коэффициента песчаности по керну. Полученные непрерывные кривые распределения песчаник - глина используются для анализа мощности отдельных горизонтов и расчета параметров для картирования.

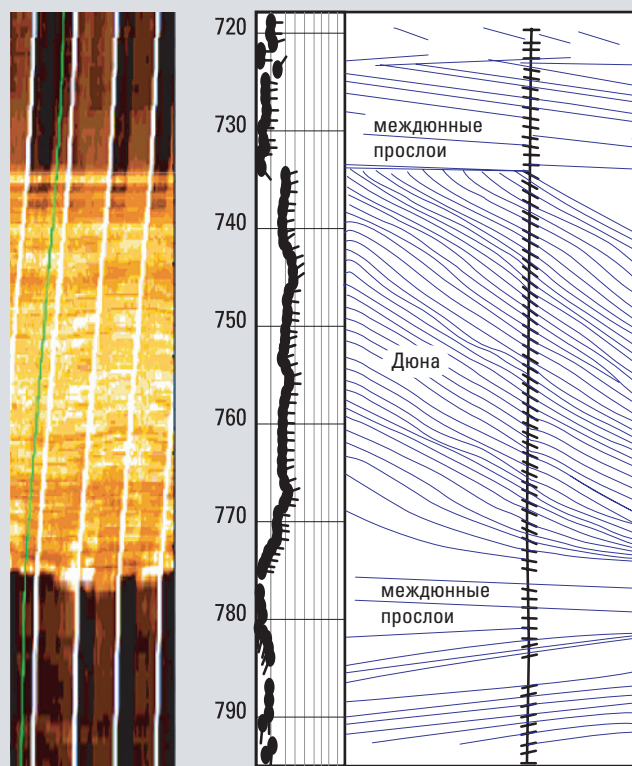
Диаграмма, снятая с помощью прибора FMI в сложных тонкослоистых осадочных структурах, позволяет точно определить потенциально продуктивные зоны.



Визуализация седиментологических особенностей разреза

Интерпретация седиментологических особенностей разреза и расчет углов и азимутов падения отдельных элементов, полученных на основе регистрируемых прибором имиджей, позволяет моделировать форму и простираание осадочных тел и рассчитывать основные петрофизические параметры коллекторов. На рисунке справа представлены эоловые отложения (дюны), разделенные глинистыми интервалами.

Имиджи FMI и рассчитанные по ним падения пластов позволяют четко дифференцировать дюны и разделяющие их глинистые прослои. Данные регистрировались в скважине с диаметром ствола 8 1/2 дюйма [216 мм].

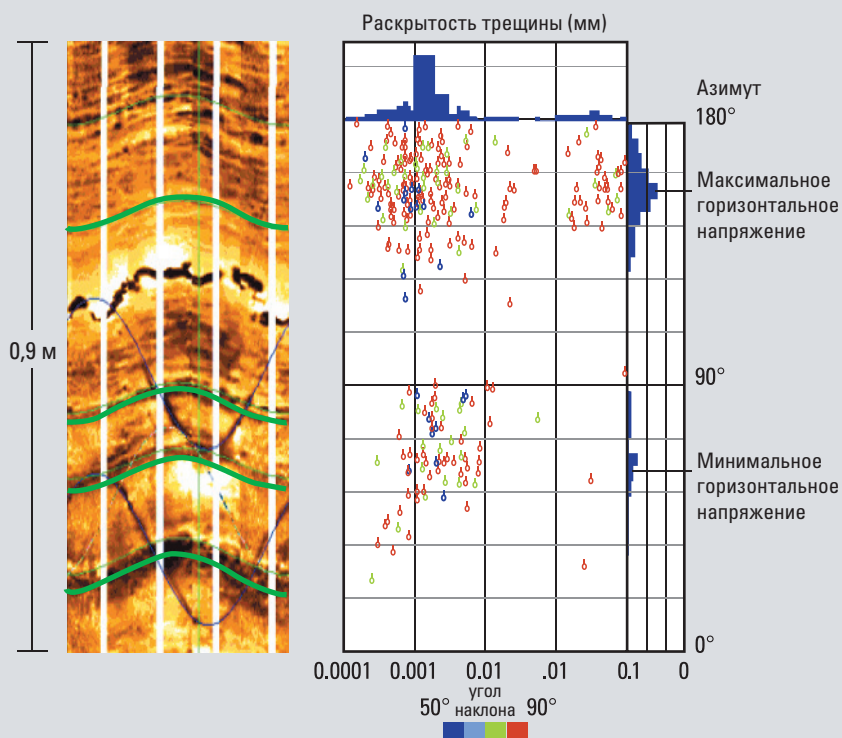


Оценка анизотропии проницаемости в трещинных интервалах

Информация о преобладающем направлении максимального горизонтального стресса, полученная по данным имиджей FMI, позволяет определить направление максимальной проницаемости в трещиноватых коллекторах. Система трещин, ориентированная по направлению максимального горизонтального напряжения, имеет наибольшую раскрытость каналов и определяет преобладающее направление проницаемости.

Стилолиты, отображаемые на имиджах в виде темной волнообразной синусоиды, могут являться вертикальным барьером проницаемости.

Анализ данных, зарегистрированных FMI, позволяет определить направление максимальной проницаемости в трещиноватом коллекторе, что представляет собой весьма важную информацию для планирования оптимальной системы заканчивания скважины.



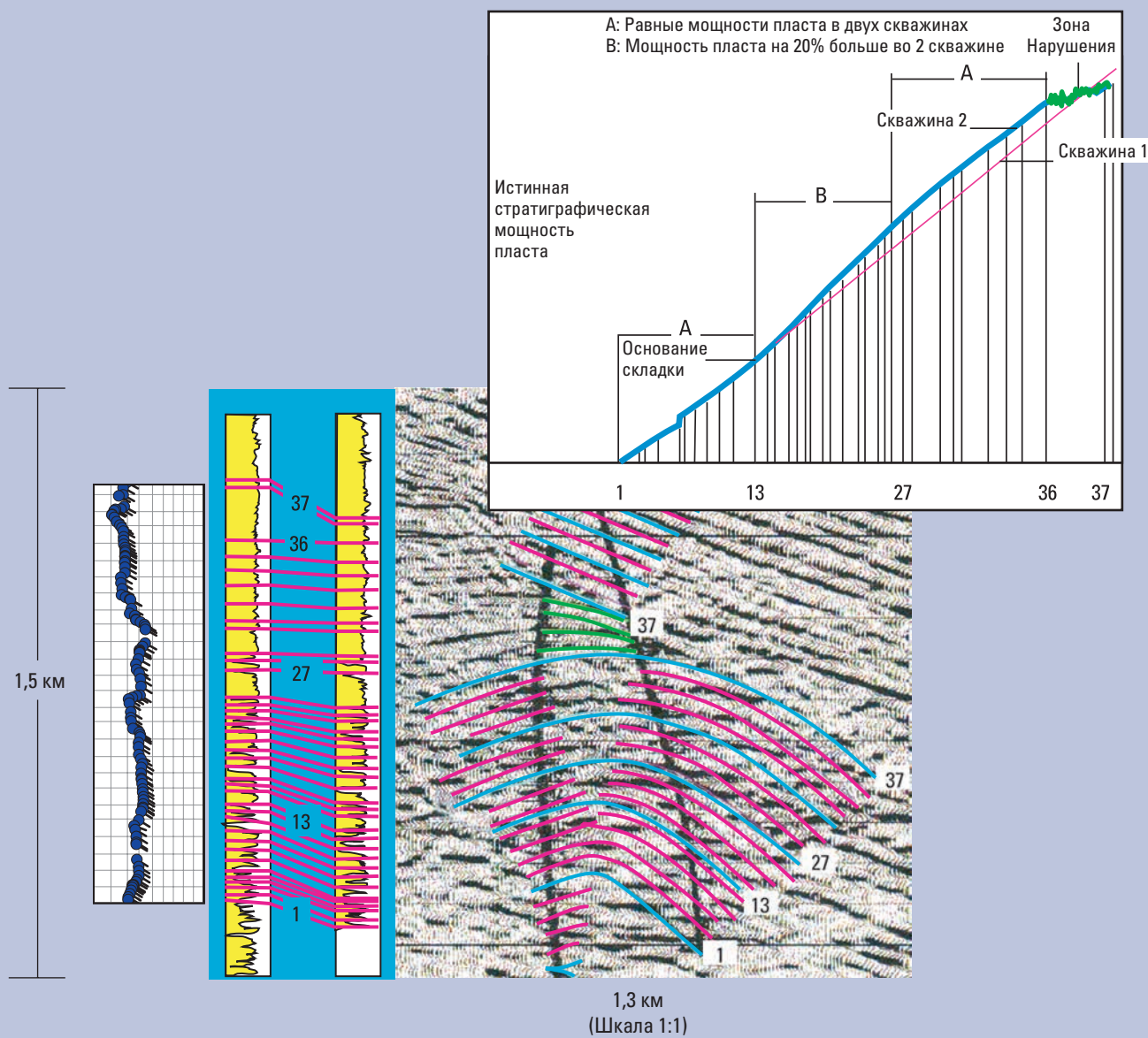
Структурная интерпретация

Проведение межскважинной корреляции затруднительно для наклонных скважин, особенно при высоких или меняющихся значениях структурных углов. Надежность результатов структурной интерпретации сейсмических данных и определения истинной стратиграфической мощности пласта значительно повышается при использовании высокоточных данных элементов

залегания пластов (каротажные диаграммы по двум скважинам — в левой части рисунка). Траектории двух скважин, использованных в корреляции, нанесены на сейсмический профиль с количественной информацией о структурных углах (голубые линии) и стратиграфических маркерах (розовые линии). Антиклинальная структура четко прослеживается на основе сопоставления данных по скважинам с сейсмической ин-

терпретацией. На диаграмме справа показано сравнение стратиграфических мощностей интервалов с 1 по 37 в обеих скважинах. Если в интервале А толщины одинаковы, то от стратиграфического маркера 13 до маркера 27 горизонты в Скважине 2 отличаются увеличенной мощностью по сравнению с теми же горизонтами в Скважине 1, что служит показателем синтетектонических различий условий осадконакопления.

Результаты структурной интерпретации имиджей FMI служат в качестве независимой дополнительной информации к интерпретации сейсмических разрезов. Надвиговая антиклиналь более четко прослеживается при использовании количественных значений элементов залегания пластов в комплексе с данными наземной сейсмоки.



Трехмерное моделирование пласта

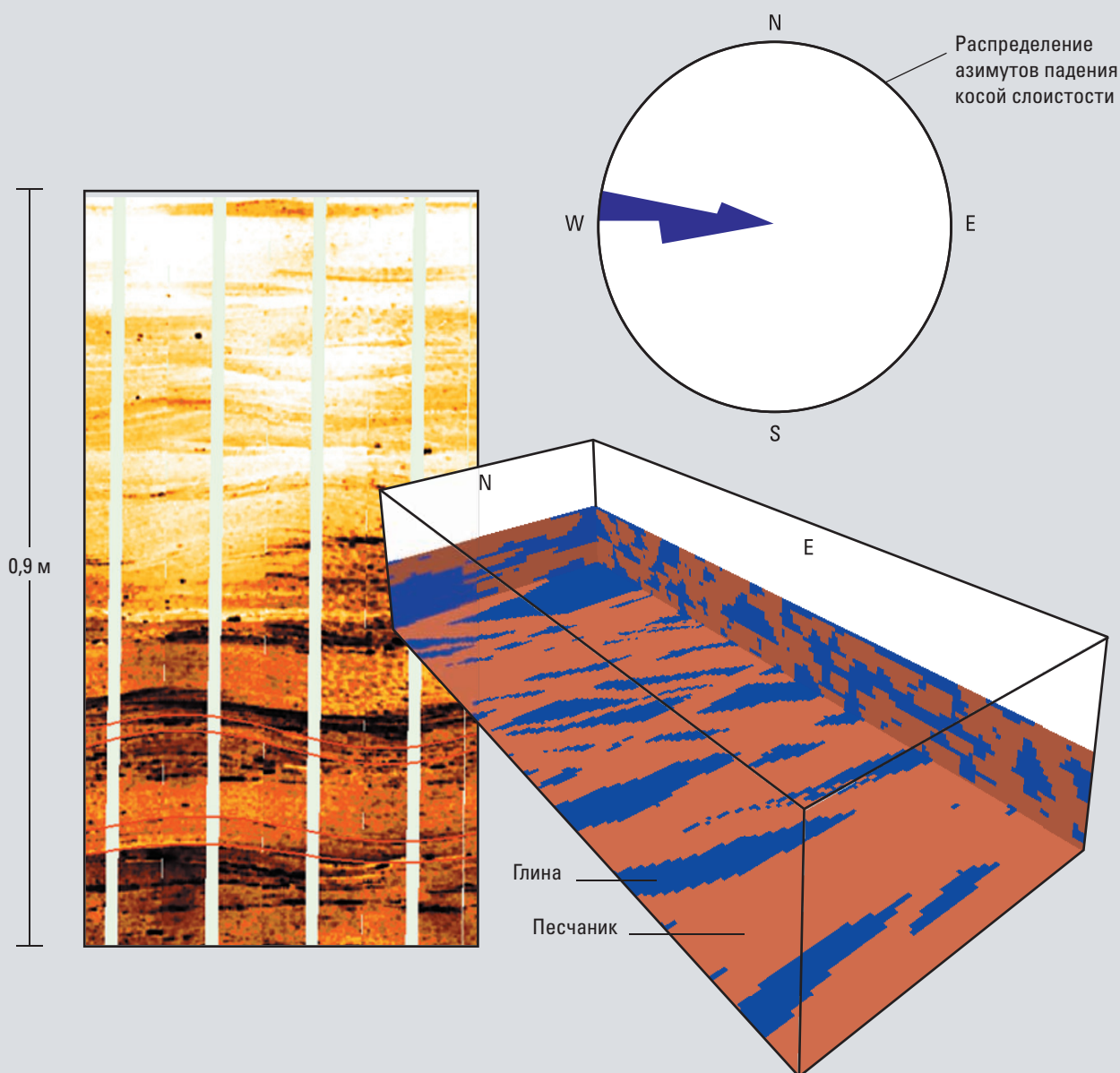
После построения структурного каркаса залежи по данным скважинной геологии и сейсмоки проводится детальное расчленение разреза на литотипы для дальнейшего расчета их фильтрационно-емкостных параметров таких как пористость, проницаемость и водонасыщенность, которые в дальнейшем используются при трехмерном моделировании свойств пласта. Выделение данных литологических объектов производится как на основе детерминистического подхода, так и стохастического анализа. Результаты сто-

хастического анализа с использованием методологии моделирования флювиального режима осадконакопления (FLUVSIM) показаны на рисунке ниже.

Кривые коэффициента песчаности могут быть рассчитаны по данным каротажа на кабеле или каротажа в процессе бурения, как для вертикальных, так и для горизонтальных скважин. Входящие параметры распределения песчаных и глинистых прослоев для стохастического моделирования определяются на основе геологической информации, полученной из имиджей FMI. На-

правление палеотечения определяется из углов и азимутов падения, кроме того достоверно определяется мощность отдельных песчаных тел. Другие параметры, такие как ширина и извилистость русел, определяются путем сопоставления результатов детального седиментологического анализа имиджей FMI и современных или хорошо изученных аналогов условия осадконакопления.

Трехмерное изображение песчаных (коричневый) и глинистых (синий) зон в модели осадочного коллектора, выполненной с использованием информации об обстановке осадконакопления, полученной на основе изображений FMI в скважине диаметром 8 1/2 дюйма [216 мм].



Ключевая информация для механической модели геологической среды

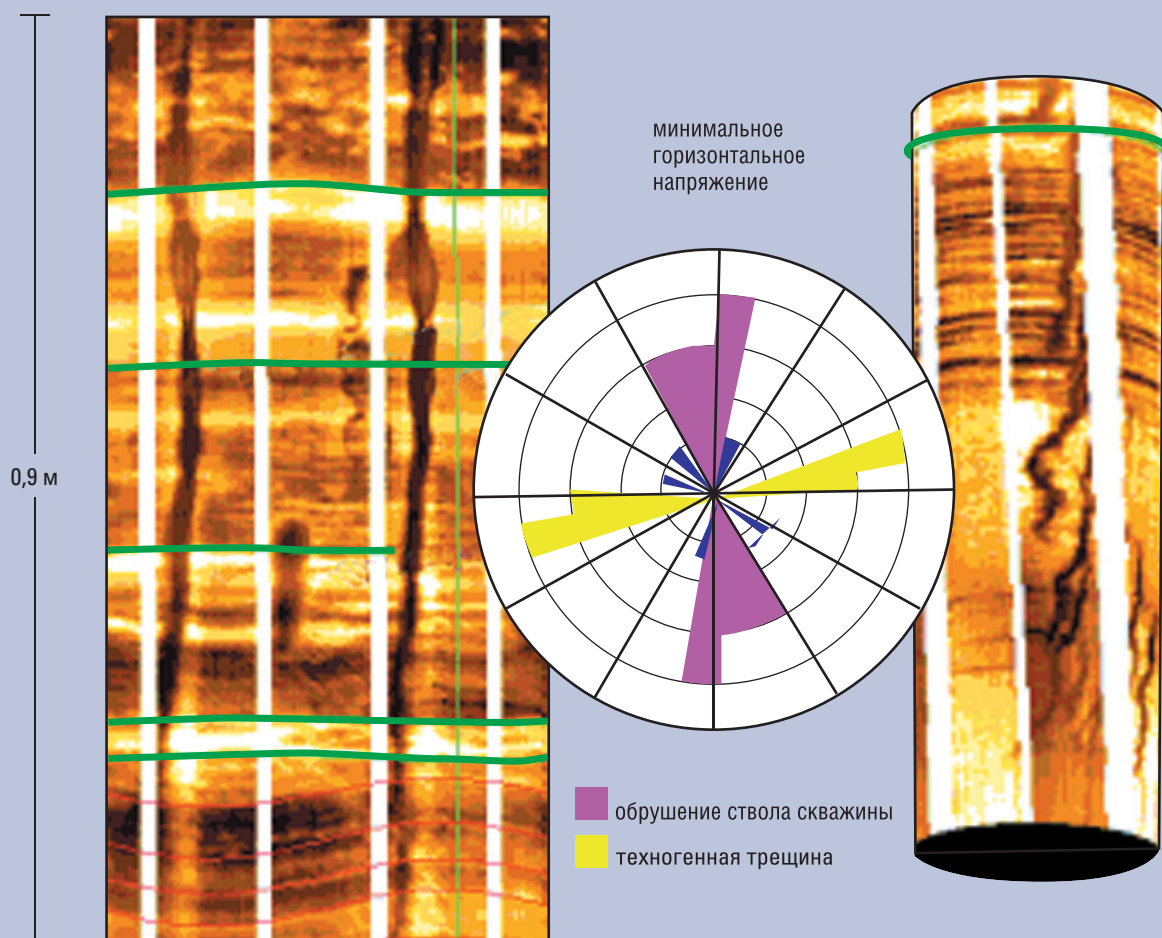
Еще одним важным применением имиджей FMI является интеграция результатов интерпретации в геомеханическую модель геологической среды (МЕМ), используемую для оптимизации конструкции и проводки скважин. Более полная информация об условиях, определяющих стабильность

ствола скважины, позволяет сэкономить значительные средства за счет снижения временных затрат на изучение месторождения на начальной стадии разработки.

На приведенном ниже примере показаны вывалы на стенках скважины и техногенные трещины и их простирание относительно минимального и максимального горизонтальных стрессов. Расчет геомеханической модели

позволяет прогнозировать типы, глубину и простирание техногенных нарушений ствола скважины. Различия между прогнозируемыми данными и фактическими наблюдениями используются для настройки и уточнения геомеханической модели (МЕМ), например, для уточнения азимута простирания или относительной величины горизонтальных напряжений.

Геомеханическая модель (МЕМ) используется для прогнозирования типа, глубины и простирания эффектов механической нагрузки на призабойную зону в процессе бурения. Данные о направлении и относительной величине горизонтальных напряжений необходимы для оптимизации программы бурения.



Технические характеристики FMI

Применение	Структурная геология, стратиграфия, анализ коллектора, неоднородности, мелкомасштабные объекты, получение информации в режиме реального времени
Разрешение по вертикали	5 мм (0.2 дюйма) – видимость объектов до 50 мкм
Разрешение по азимуту	5 мм (0.2 дюйма) – видимость объектов до 50 мкм
Количество измерительных электродов	192
Количество башмаков и затворов	8
Охват	80% в скважине диаметром 215,9мм (8 дюймов) в режиме регистрации сигнала с 8 башмаков прибора
Максимальное давление	1360 атм. (20,000 psi)
Максимальная температура	177°C [350°F]
Диаметр ствола скважины	
Минимальный	149 мм [5 7/8 дюйма]
Максимальный	533,4 мм [21 дюйм]
Максимальное отклонение ствола	90°
Скорость сканирования	
Режим полного изображения	550 м/ч [1800 футов/ч] с первичной обработкой имиджей в режиме реального времени
С четырьмя башмаками	1100 м/ч [3600 футов/ч] с первичной обработкой имиджей в режиме реального времени
В режиме стратиграфического наклономера	1650 м/ч [5400 футов/ч]
В режиме инклинометра	3050 м/ч [10000 футов/ч]
Максимальное удельное сопротивление бурового раствора	50 ом·м
Прибор FMI	
Макс. диаметр	127 мм [5 дюймов]
Длина компоновки	7,44 м [24.4 фута]
Длина компоновки с шарнирной муфтой	8,046 м [26.4 фута]
Масса (в воздухе)	196,72 кг [433.7 фунта]
Прочность на сжатие (спуск на трубах)	5443,108 кг [12000 фунтов] (запас прочности – 2)
Максимальное давление башмака	20 кг [44 фунта]
Совместимость	Прибор является концевым и может комбинироваться с другими приборами ГИС на кабеле

Компоновка FMI.

