

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Верхушин Игорь Александрович

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы
(диссертации)

«Метод исследования прочностных свойств горных пород с помощью
профилирования полноразмерного керна»

Направление подготовки:

01.06.01 – Математика и механика

Направленность подготовки: 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

Научный руководитель
д.ф.-м.н., академик РАН,
Фомин Василий Михайлович

Новосибирск 2019

Актуальность исследований. В нефтегазовой сфере промышленности в последнее время всё большую актуальность приобретают создание и использование цифровых геолого-геомеханических моделей месторождения, основанных на построении пространственного распределения физических (механических) свойств и напряженного состояния горных пород. Внедрение подобных моделей решает большой спектр прикладных задач в течение всего жизненного цикла скважины от планирования до запуска, включая проектирование бурения, крепления и освоения.

Значения механических свойств (предел прочности, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) могут быть достоверно получены только из результатов лабораторных исследований экспериментальных образцов керна, отобранного при бурении поисково-разведочных скважин. Сложность заключается в высокой стоимости таких исследований, а также в том, что объём извлекаемого из недр ядерного материала ограничен и чаще всего охватывает только нефтенасыщенные пласты. Помимо этого, существуют породы (аргиллиты, каменные соли), отбор экспериментальных образцов из которых или их анализ значительно затруднены (образование трещин, текучесть солей в статических экспериментах).

По этим причина в отрасли принято восстанавливать физико-механические свойства с помощью построения многомерных регрессионных моделей. Для этого используются несколько источников информации: результаты интерпретации комплекса геофизических исследований скважин (ГИС), данные лабораторных исследований образцов керна, результаты геолого-технологические исследования (ГТИ) в процессе бурения, скважинных и наземных методов сейсмо-, и электроразведки и т.д.

Однако недавнюю популярность с научно-технологической точки зрения получил метод скретч-теста, дающий информацию о механических свойствах пород на протяжении всей длины скважины. Его главным отличием является именно способность дать квази-непрерывную характеристику механических свойств, в отличие от остальных методов, дающих представление

характеристиках пород только в точках изъятия образцов. Как следствие, скретч-тест может быть использован для предварительного разделения полноразмерного керна на механические фации. Скретч-тест заключается в измерении усилия сопротивления при царапании образцов полноразмерного керна, что может в зависимости от режимов характеризовать UCS или трещиностойкость материала.

Цель работы – обоснование применения методики скретч-теста для задач экспресс расчленения полноразмерного керна на механические фации, а также профилирования упруго-прочностных свойств.

Были поставлены следующие **задачи**:

- Разработать установку для измерения усилия сопротивления царапания полноразмерного керна при равных скоростях в направлении оси образцов;
- Отработать и обосновать методику скретч-теста на искусственных моделях керна;
- Исследовать разрушение поверхности образцов полноразмерного с помощью методики скретч-теста
- Обосновать внедрение методики в цикл разработки нефтегазовых месторождений на этапе лабораторных испытаний.

Степень разработанности темы исследования. Выполнены все поставленные задачи. Данные, полученные в разных сериях экспериментов, дополняют друг друга и дают целостную картину изучаемого явления.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является разрушение тонкого слоя поверхности образца керна материала. Предмет исследования – соответствие, подтверждение и дополнение механических испытаний на стандартных образцах керна.

Научная новизна. В работе экспериментальным путем впервые:

- Получены подробные данные по скретч-испытаниям модельных кернов из гипса, глины, цемента, произведена их дифференциация.
- Определены пределы прочности каменных солей посредством скретч-теста.

- Показано соответствие твёрдости по Бринеллю, скретчеграммы и предела прочности при одноосном сжатии.

Методология и методы исследования. Испытания выполнялись на экспериментальной установке, на базе горизонтально-фрезерного станка 6Т83Г. Испытания проводились в горизонтали на скорости 100 мм/мин.

Измерения усилия сопротивления царапанию проводились посредством тензочувствительной системы собственного производства, основанной на популярной схеме моста Уитстона с применением тензорезисторов.

Измерения твёрдости производились с помощью твердомера методом Шора по отскоку закалённого стального шара, после чего переводились в привычные в отрасли значения твёрдости по Бринеллю.

Стандартные механические испытания калибровочных стандартных образцов керна проводились по ГОСТ 21153.2-84 на 50-тонном прессе производства «Армавирский завод испытательных машин».

В качестве моделей керна были использованы образцы из гипса, строительной глины, портландцемента и пескобетона. В натуральных тестах использовались образцы полноразмерного керна с Ковыктинского газоконденсатного месторождения с глубин до 3100 м.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая ценность настоящей работы заключается в подтверждении обоснованности и анализе методики скретч-теста в применении к полноразмерному керну.

Практическая ценность результатов исследований заключается во внедрении метода скретч-теста в цикл лабораторных исследований в нефтегазовой отрасли.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена калибровкой на результаты лабораторных испытаний по ГОСТ 21153.2-84. Используемые подходы основаны на технологиях, применяемых во всём мире для всех месторождений в обязательном порядке. Свидетельством достоверности также является представление

результатов диссертации на научных конференциях по теме работы, публикации в рецензируемых научных журналах и многочисленные семинары кафедры.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

- Методика скретч-теста в применении к определению прочностных свойств горных пород на основе контролируемого царапания полноразмерного керна
- Результаты экспериментального исследования прочностных свойств моделей керна из гипса, строительной глины, портландцемента и пескобетона.
- Результаты экспериментального исследования прочностных свойств керна материала с поисково-разведочной скважины Ковыктинского газоконденсатного месторождения методов скретч-теста в атмосферных условиях.

Содержание работы:

Во введении приводится обзор существующих исследований в области лабораторных механических испытаний горных пород. В него вошли материалы экспериментальных работ, исследований по теории прочности и результаты компьютерного моделирования разрушения образцов керна. Так же в обзоре описаны современные подходы экспериментальных исследований физико-механических свойств керна. На основе представленных в обзоре результатов формулируются цели и задачи исследований, делается вывод о месте данной работы.

В первой главе описывается экспериментальная установка, методика исследований, модели керна материала и методика обработки данных.

В п. 1.1. приведено описание экспериментальной установки на базе горизонтально-фрезерного станка 6Т83Г, на которой выполнялись экспериментальные исследования, представленные в этой работе. Представлены данные по допустимым пределам измерений и общим характеристикам установки, приведено сравнение с существующими технологическими и экспериментальными установками, существующими в других государственных и

коммерческих лабораториях. На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки.

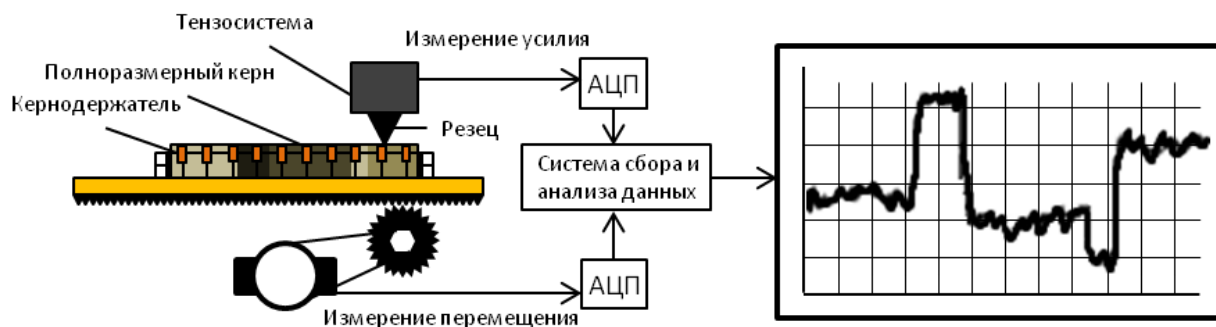


Рис. 1. Схема работы экспериментальной установки

В п. 1.2. описывается методика исследования прочностных свойств керна материала применительно к созданной установке. Обосновывается необходимость калибровки получаемых результатов на результаты стандартных механических испытаний. Для определения предела прочности вводится переводной коэффициент:

$$UCS = \alpha * F_{\text{сопротивления}}$$

где UCS – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; α – калибровочный коэффициент, МПа/Н; $F_{\text{сопротивления}}$ – усилие сопротивления царапанию, Н.

Для достоверности получаемых результатов были использованы резцы из карбонитрида титана с корундовым покрытием, твёрдость которых значительно превышает твёрдость исследуемых пород.

В п. 1.3. рассматриваются используемые в работе модели керна. Эксперименты проводились на моделях керна из гипса, строительной глины, портландцемента и пескобетона. Модели имеют цилиндрическую форму с диаметром 100 мм и длиной 200 мм. Модели закреплялись в кернодержателе (рис. 2) с помощью коромыслового упора и полиуретановых уплотнителей параллельно горизонтальной поверхности рабочего стола установки



Рис. 2. Закреплённая в кернодержателе модель керна

В п. 1.4. описана методика обработки данных. Ввиду разрушаемости экспериментального материала используется единственное измерение на каждом интервале отбора керна, которое затем калибруется на результаты стандартных прочностных испытаний.

Во второй главе представляются результаты экспериментальных исследований моделей керна методом скретч-теста. Профили горизонтального усилия на резце сопоставляются с фото экспериментальных образцов. Резец внедряется в породу на глубину 300 и 200 мкм, что подтвердило пропорциональную зависимость усилия сопротивления от глубины внедрения резца. При построении графиков выполнена предобработка методом усреднения по 150 точкам для достижения разрешения 1.75 мм.

Были исследованы образцы моделей керна из разных искусственных материалов. На рис. 3 приведена скретчеграмма, полученная на составной колонке из гипса, смесях гипса с глиной и гипса с цементом. По правой вертикальной оси отображено псевдо-UCS, которое является прямым пересчётом усилия сопротивления в предел прочности, исходя из площади резца и создаваемого усилия. Можно отчётливо выделить 3 области, различающиеся средним усилием при разрушении породы. Как видно, наименьшее сопротивление при разрушении оказывает модель из смеси гипса с глиной, затем в порядке повышения усилия идут гипс и смесь гипса с цементом.

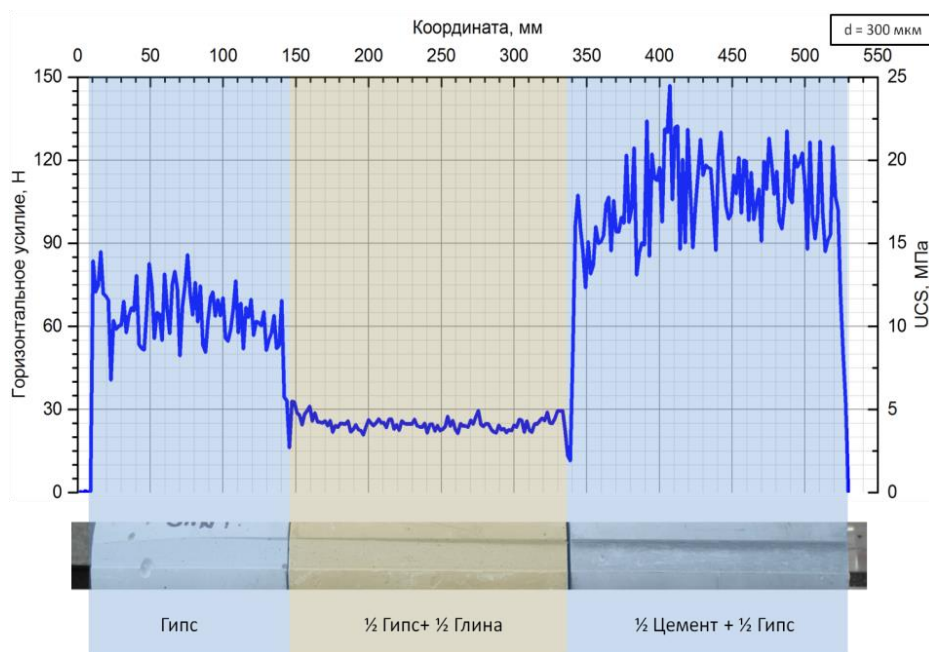


Рис. 3. Скретчеграмма моделей керна из гипса, смеси гипса с глиной и смеси гипса с цементом

На рис. 4 представлена более комплексный набор материалов, включающий пескобетон, пескобетон с керамзитом, смеси цемента с гипсом и цемента с глиной, а также чистый цементный камень. По среднему уровню усилия можно выделить области цемента, смесей цемента с глиной и гипса. Стоит отметить, что области пескобетона и пескобетона с включениями керамзита практически не различимы между собой. Керамзит составил 10% от массы образца, что не составило заметного вклада в профиль усилия, вероятно, из-за крупнозернистости и редкости включения. Хотя средние усилия при царапании пескобетона и смеси цемента с гипсом эквивалентны, эти секторы отчетливо различимы амплитудой дисперсии сигнала. Эта характеристика является вторым признаком выделения разных пород (после среднего усилия), который можно использовать для сопоставления результатов скретч-теста и ГИС, а также других исследований. Степень дисперсности усилий можно использовать для оценки хрупкости материала, так как более хрупкий материал обладает более высокой степенью дисперсности сигнала скретчеграммы.

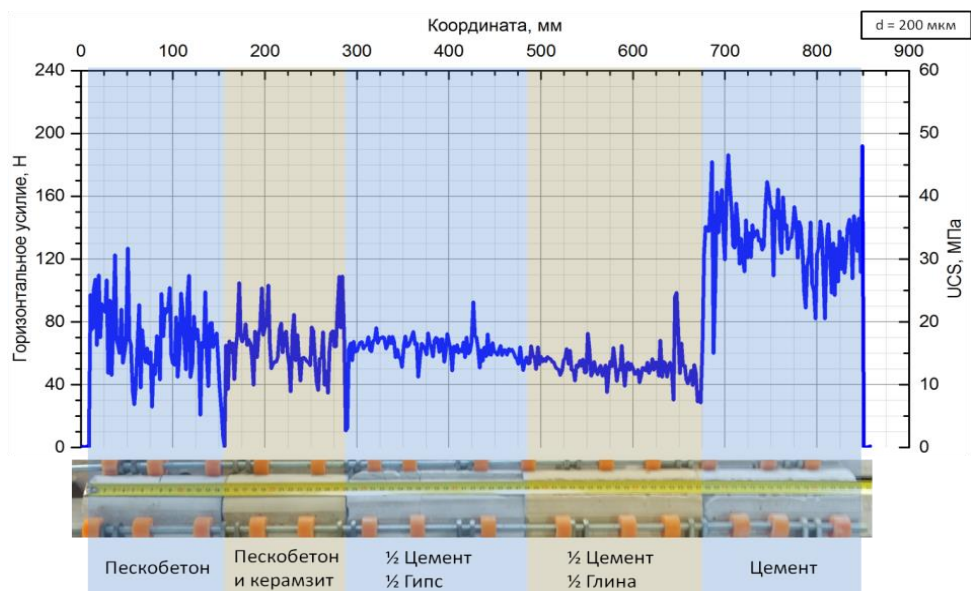


Рис. 4. Скретчеграмма моделей ядра из пескобетона, пескобетона с керамзитом, смесей цемента с гипсом и цемента с глиной, а также чистого цементного камня

При изменении глубины царапания по смеси цемента и гипса наглядно видно (см. рис. 3 и рис. 4) пропорциональное изменение усилия, причём отношение усилий равно отношению глубин.

Скретчеграмма бетона марки В25 (рис. 5) демонстрирует вхождение альбитофира и диабаз в виде повышения усилия. Минимумы графика отображают прочность цемента как связующего, которым, как самым слабым звеном, и определяется прочность бетонного камня.

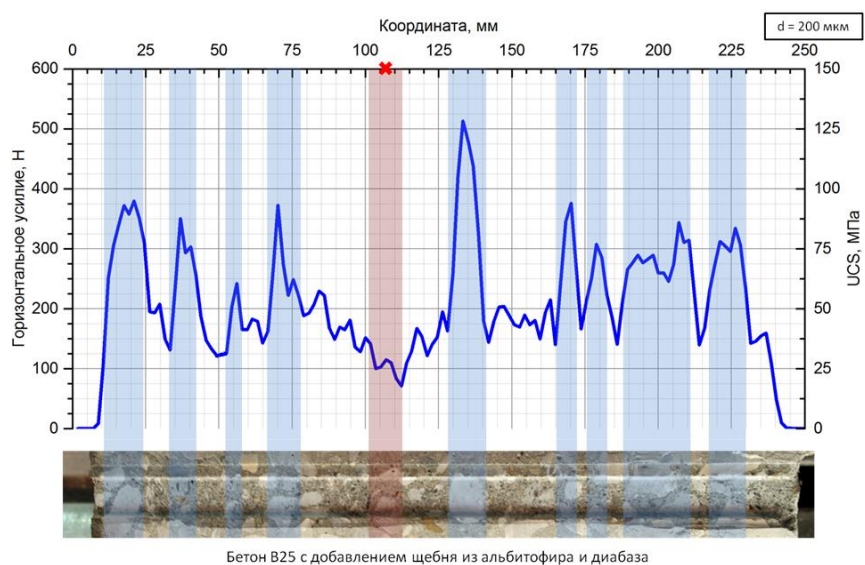


Рис. 5. Скретчеграмма промышленного бетона марки В25 (М300). Крестом обозначена область с отколотым камнем (выемка)

Были также проведены механические испытания прочности 30 моделей из пескобетона (рис. 6). Полученные данные UCS были усреднены для получения калибровочного коэффициента α , среднее значение UCS составило 17 МПа.

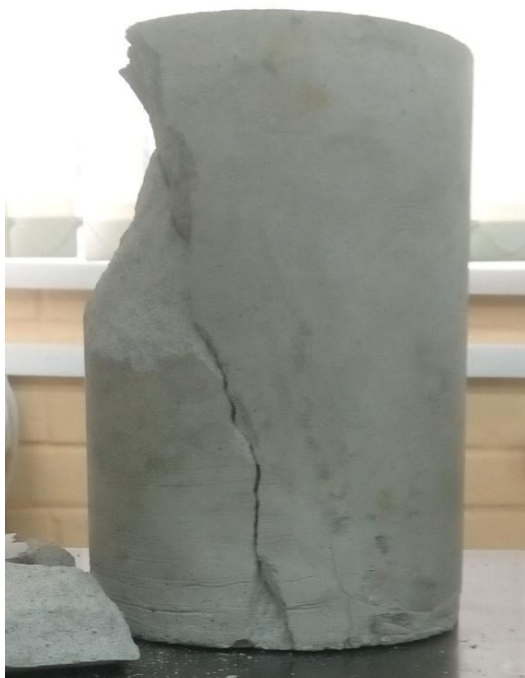


Рис. 6. Образец модели пескобетона после испытания на прочность

Коэффициент α составил 0,05 МПа/Н. Были получены средние значения UCS для разных материалов (табл. 1). Согласно паспорту испытаний промышленного бетона В25 предел прочности составил 30.2 МПа, что на 5% отличается от экспериментальной оценки

Табл. 1. – UCS моделей полноразмерного керна

Материал	UCS, МПа
Пескобетон	17.0
Пескобетон с керамзитом	16.2
Гипс	10.9
Гипс + Глина	4.0
Гипс + Цемент	16.2
Цемент	30.7
Цемент + Глина	12.2
Бетон марки В25	31.7

В третьей главе показаны результаты исследования полноразмерных образцов (диаметр 100 мм) керна с поисково-разведочной скважины Ковыктинского месторождения, находящегося в Восточной Сибири. Образцы

представлены отложениями литвинцевской свиты, сложенной доломитами и известковистыми доломитами. Приведены результаты SRS (Scratch resistance strength) контролируемого царапания 1.5 метров керна (рис. 7). После скретч-теста измерялся коэффициент твердости методом Шора (отскока) с последующим переводом в шкалу Бринелля с шагом 10 мм. Для калибровки скретчеграммы на фактический UCS были отобраны девять коллекций по 3 стандартных образца керна (диаметр 30 и длина 60 мм), которые были отобраны вдоль образующей полноразмерного керна.

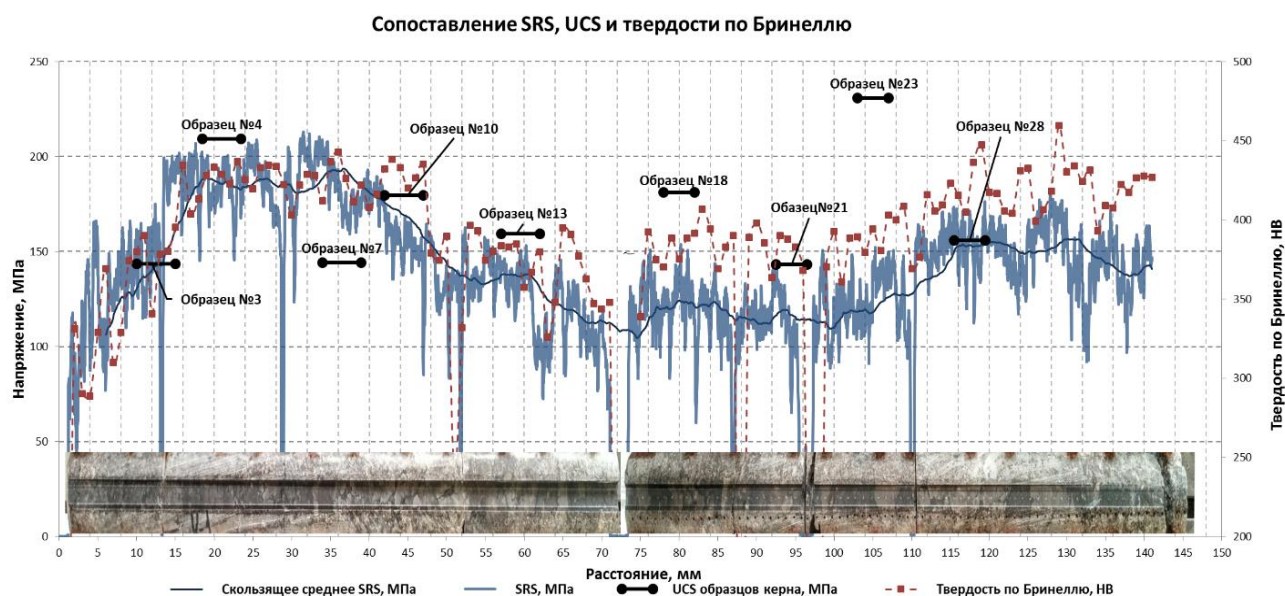


Рис. 6. Скретчеграмма, сопоставленная фотографии образца, точечными замерами твердости по Бринеллю и UCS на стандартных образцах керна

Также был получен сводный графический планшет (рис. 7) 18 метров разреза породы, включающий литостратиграфическое описание, фотоколонку кернового материала, результаты скретч-теста и комплекс геофизических исследований (каверномер, гамма-, гамма-гамма-плотностной, нейтрон-нейтронный, акустический и электромагнитный каротажи). Можно отметить, что параметр SRS значительно более детально разделяет разрез породы по физико-механическим свойствам в отличие от комплекса ГИС. Также SRS показывает особенности, не описываемые геофизическими характеристиками, и, как следствие, не поддающиеся точному восстановлению с помощью комплекса ГИС.

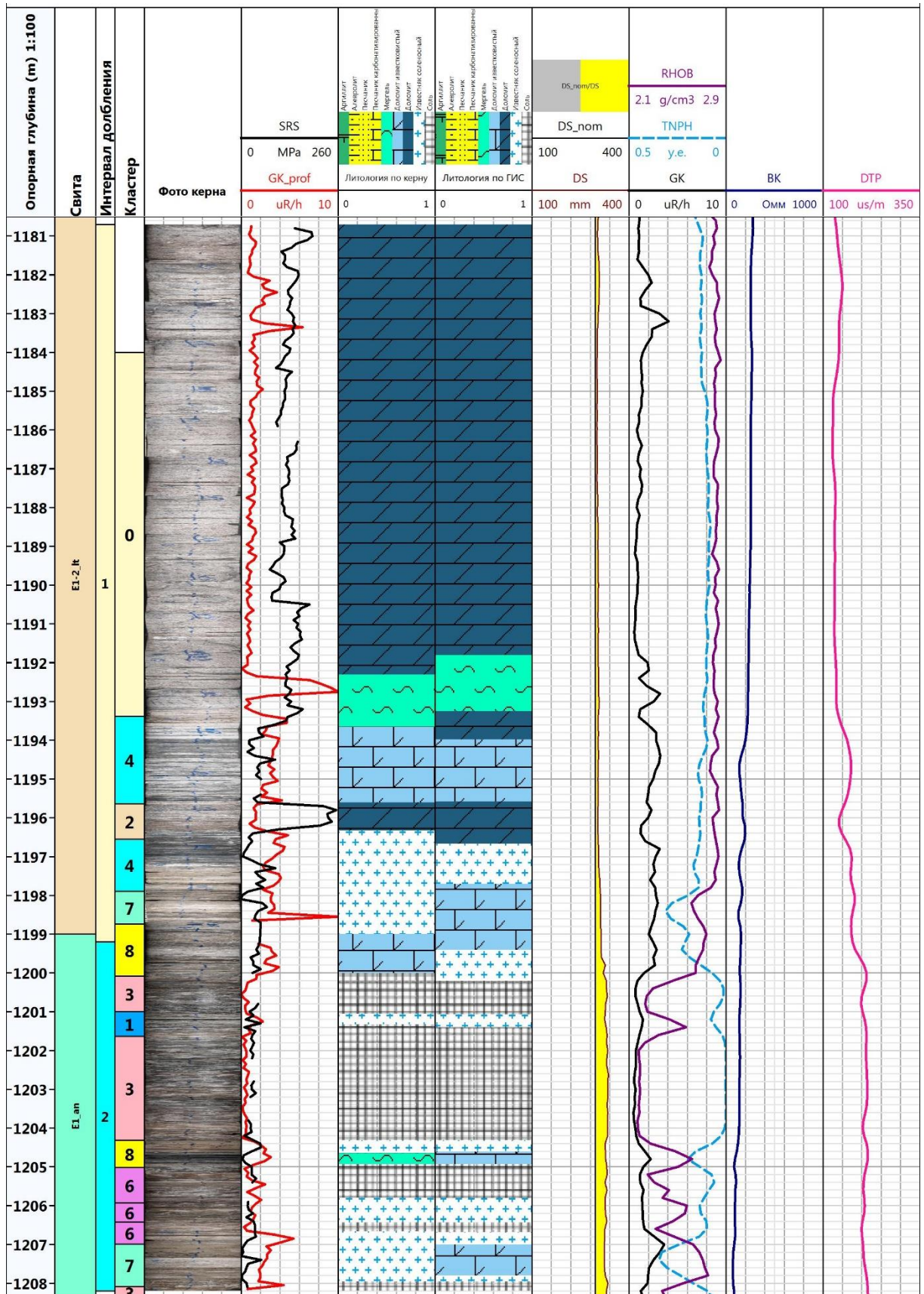


Рис. 7. Сводный планшет с нанесёнными литостратиграфией, фотоколонкой керна, результатами интерпретации скретч-теста и комплекса ГИС

Выводы и практические результаты:

1. Разработана методика скретч-теста для профилирования прочностных свойств образцов полноразмерного керна.
2. Методика скретч-теста полноразмерного керна позволяет увеличить детальность и точность изучения физико-механических свойств горных пород для построения одномерных геомеханических моделей. Сопоставление профилей механических характеристик с результатами ГИС позволяет установить достоверные корреляции при восстановлении синтетических профилей упруго-прочностных свойств горных пород по разрезу. Более того, результат профилирования физико-механических свойств по керну может служить характеристикой для уточнения привязки керна, особенно в наиболее проблемных интервалах отбора.
3. Помимо оценки физико-механических свойств методика может использоваться для разметки полноразмерного керна – определения мест выбуривания стандартных образцов с целью получения максимальной информации об объекте при минимальном числе исследований, а также поиска наиболее однородных по свойствам зон для выбуривания близких по характеристикам образцов.
4. Для кластерного расчленения и разметки полноразмерного керна можно использовать среднее значение UCS и дисперсию UCS. Полученный профиль предела прочности с высоким разрешением можно считать достоверным и далее использовать как для кластерного расчленения полноразмерного керна, так и для целей геомеханического моделирования.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах:

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в статьях в журналах «Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности» (2017), «Экспозиция Нефть Газ» (2018). Так же результаты

исследований представлялись на Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Шерегеш, 2018).

Всего по результатам работы опубликовано 3 работы. Из них 2 удовлетворяют требованиям **ВАК**.

Приложение.

Статьи в журналах, материалы международных и всероссийских конференций, публикации в сборниках научных трудов:

1. Верхушин И.А. Метод исследования прочностных свойств горных пород с помощью профилирования полноразмерного керна // XII Всероссийская конференция молодых учёных «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии». Шерегеш, 16-22 марта 2018.

Список публикаций по теме диссертации, удовлетворяющих требованиям **ВАК**:

1. Верхушин И.А., Торопецкий К.В., Ульянов В.Н., Борисов Г.А. Развитие методики профильных геомеханических испытаний для полноразмерного керна // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. - № 9. – с. 12-16.
2. Носиков А.В., Торопецкий К.В., Михайлов Б.О., Верхушин И.А., Черныш П.С., Ульянов В.Н., Борисов Г.А. Применение метода контролируемого царапания для профилирования механических свойств горных пород // Экспозиция Нефть Газ. – 2018. - № 6.