

Лаборатория «Цифровой керн» как интегрированная платформа многоуровневого исследования горных пород: методы, оборудование и моделирование

ENG

К.Д. Чекан¹, k.chekan@technoinfo.ru
О.Е. Корнейчик¹, **Н.С. Комлач**¹,
А.В. Лавренюк², **Д.В. Корост**^{3,4}

¹ ООО «Техноинфо», г. Москва

² ООО «Проминт», г. Люберцы

³ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва;

⁴ ООО «Деко-Сервис», г. Москва

Представлена концепция создания и функционирования геологической лаборатории «Цифровой керн», ориентированной на комплексную оцифровку керна, количественную интерпретацию его структурно-текстурных и вещественных характеристик, а также физико-математическое моделирование фильтрационно-емкостных свойств пород. Рассматриваются методологические принципы построения лаборатории, архитектура приборного комплекса, особенности применения томографов медицинского класса для исследований полноразмерного керна, автоматизированные мультисенсорные системы сканирования для профильных исследований, микротомография и литохимический анализ для численного моделирования в масштабе пор. Особое внимание уделено вопросам обработки, хранения и интерпретации данных, а также интеграции

The Digital Core Laboratory as an Integrated Platform for Multi-level Rock Research: Methods, Equipment and Modelling

K.D. Chekan¹, O.E. Korneichik¹, N.S. Komlach¹,
A.V. Lavrenyuk², D.V. Korost³

¹ Technoinfo LLC, Moscow

² Promint LLC, Lyubertsy

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow;
Deco-Service LLC, Moscow

The article presents the concept of creating and operating a Digital Core Laboratory which is focused on the comprehensive digitisation of core material, quantitative interpretation of its structural, textural, and material characteristics, as well as physical and mathematical modelling of the filtration and storage properties of rocks. It examines the methodological principles of laboratory construction, the architecture of the instrument complex, the features of using medical-grade computed tomography for studying full-size cores, automated multi-sensor scanning systems, microtomography, and lithochemical analysis. Particular attention is paid to the processing, storage and interpretation of data, as well

получаемых результатов в задачи геологоразведки и разработки месторождений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровой керн, геология, нефтегазовая геология, геологическая лаборатория, томограф, томография, томография полноразмерного керна, микротомография, сканирование керна, автоматизированный анализ керна

as the integration of the results obtained into geological exploration and field development tasks.

KEY WORDS: digital core, geology, petroleum geology, geological laboratory, tomograph, tomography, full-size core tomography, microtomography, core scanning, automated core analysis

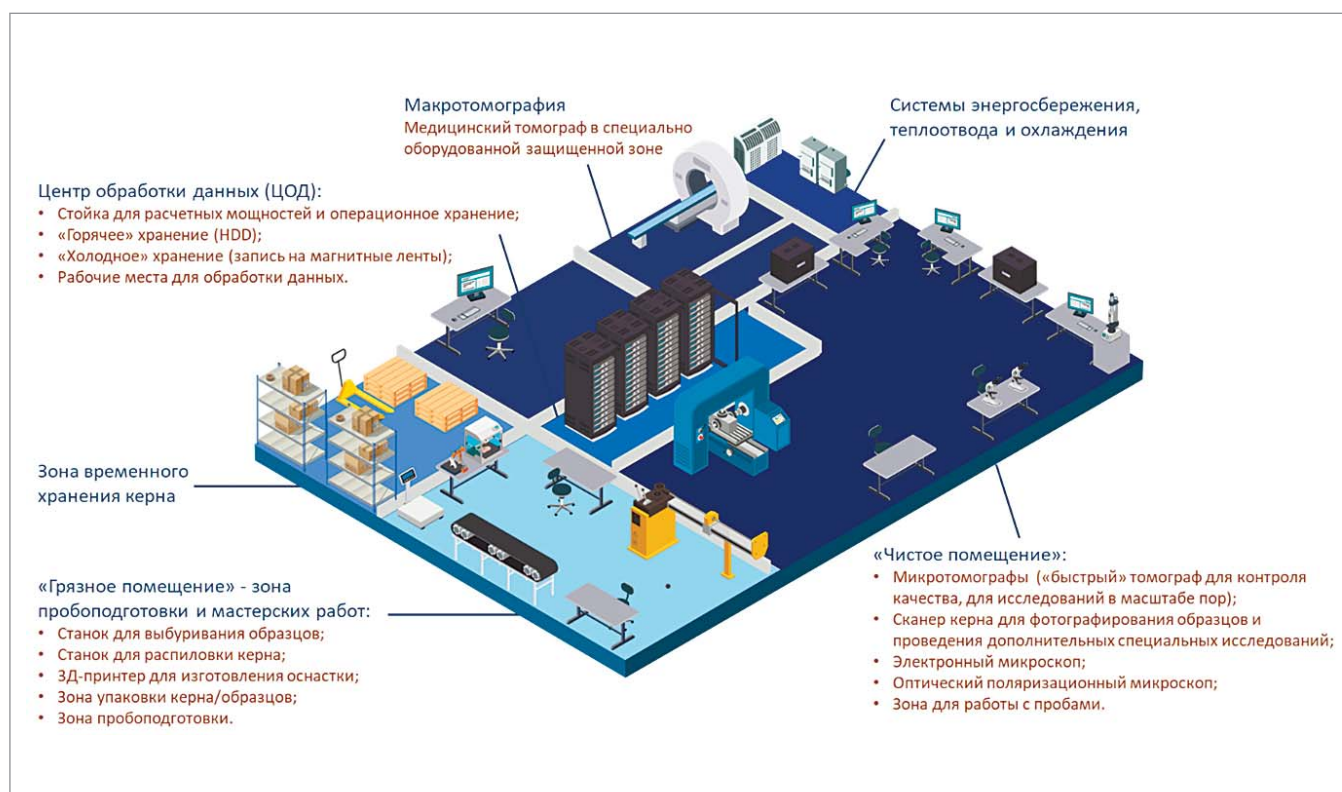
Современные требования к качеству геологоразведочных работ и моделированию месторождений углеводородов предполагают переход от преимущественно описательных методов анализа керна к количественным, воспроизводимым и изначально цифровым технологиям. В условиях вовлечения объектов разработки со сложным геологическим строением, увеличения доли трудноизвлекаемых запасов и ужесточения требований к точности прогноза фильтрационно-емкостных свойств коллекторов особую актуальность приобретает создание лабораторной инфраструктуры, способной обеспечивать сквозную цифровизацию исследований керна в широком диапазоне масштабов – от изучения метровых колонок до субмикронных исследований в масштабе пор.

Лаборатория «Цифровой керн» (см. рисунок) рассматривается как интегрированная научно-техническая

платформа, предназначенная для решения указанных задач. Ее ключевой особенностью является комплексирование методов рентгеновской томографии, рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов, микроскопии и численного моделирования в рамках единой технологической цепочки, обеспечивающей непрерывность данных и их сопоставимость на разномасштабных уровнях.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ЛАБОРАТОРИИ

Проектирование лаборатории начинается с комплексного аудита текущего состояния приборной базы и производственных процессов заказчика. На данном этапе проводится анализ существующих методик исследований керна, используемого программного обеспечения, уровня автоматизации, скорости получения и обработки данных, а также квалификации



Схематическое представление лаборатории «Цифровой керн»

персонала. Особое внимание уделяется выявлению так называемых «болевых точек» – этапов, на которых происходят потеря информации, снижение точности или значительное увеличение времени исследований.

В результате аудита формируется частное техническое задание, включающее перечень необходимого оборудования с обоснованием технических характеристик, описание необходимых инженерных систем (электроснабжение, вентиляция, радиационная защита, климат-контроль), а также рекомендации по пространственной организации лаборатории. Проект предусматривает интеграцию нового оборудования с существующим лабораторным комплексом и кернахранилищем, что обеспечит непрерывность логистической цепочки движения образцов.

СЕКТОР ПОЛНОРАЗМЕРНОГО КЕРНА: КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТОМОГРАФЫ МЕДИЦИНСКОГО КЛАССА

Базовым элементом лаборатории является сектор исследований полноразмерного керна, где осуществляется первичная цифровизация материала. В качестве основного инструмента используется компьютерный томограф медицинского класса, адаптированный для геологических задач, – например, мы предлагаем Quantum CT 750 производства Китайской Народной Республики. Применение медицинских систем обусловлено их высокой надежностью и производительностью, стабильной работой источника рентгеновского излучения и развитым программным обеспечением для реконструкции.

Томография полноразмерного керна рассматривается как этап «нулевого цикла», который должен предшествовать любым механическим воздействиям на образец. Это позволит зафиксировать исходное состояние керна, включая естественную трещиноватость и распределение плотностных неоднородностей, выявить зоны нарушения целостности и/или проникновения буровых растворов. Возможность проводить сканирование керна непосредственно в алюминиевых или иных рентгенопрозрачных тубусах минимизирует риск дополнительных повреждений и позволит сохранить информацию о первичном состоянии материала.

Съемка осуществляется в режиме двойной энергии (Dual Energy), в результате которой получают данные, чувствительные к разнице в значениях эффективного атомного номера и плотности вещества. Пространственное разрешение порядка 200–250 мкм и высокая скорость сканирования (около одной минуты на погонный метр керна) позволят достичь производительности до 50–100 м керна в день при штатной работе сектора. Полученные томографические данные формируют трехмерные цифровые копии образцов объемом до одного гигабайта на метр, пригодные для последующей количественной обработки.

Обработка данных выполняется в специализированном программном обеспечении Arscan (разработчик ООО «Деко-Сервис»), где реализованы алгоритмы геометрической коррекции, обработки двухэнергетических данных, построения стеков и формирования цифровых логов объемной плотности (RHOV) и фотоэффекта (Pe) с шагом от 2 мм. На основе томографических данных рассчитываются синтетические каротажные кривые (АК, НК, ЯМК каверн и др.), формируется график техногенной трещиноватости, а также определяется каверновая пористость, измерение которой на сегодняшний день практически реализуемо исключительно методом компьютерной томографии.

Дополнительным направлением обработки данных является автоматизированный текстурный анализ, позволяющий проводить оперативное расчленение разреза, которое может стать основой для литологов при седиментологическом описании. Томографические данные используются для уточнения строения разреза, «вертикализации» данных ГИС при наклонном бурении и формирования рекомендаций по распиловке керна и отбору образцов для последующих исследований.

Кроме того, оборудование данного сектора может быть использовано для быстрого скрининга лабораторных образцов с целью оценки их качества, а также формирования коллекций для специальных исследований.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ МУЛЬТИСЕНСОРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ КЕРНА

Комплексование томографических данных с результатами геохимических и спектральных исследований реализуется посредством автоматизированного мультисенсорного сканера керна. Как один из вариантов технического решения в нашем портфолио имеется отечественный анализатор керна UniCore производства ООО «Технокерн». Данная система объединяет рентгенофлуоресцентный анализ в широком диапазоне элементов (Na–Сm), точечную ИК-спектрометрию в требуемом диапазоне длин волн и высокоразрешающую линейную камеру с ультрафиолетовой подсветкой. Сканер также может быть оснащен другими датчиками и системами, которые необходимы для изучения дополнительных характеристик керна (магнитной восприимчивости, электросопротивления, истинного цвета, акустических свойств).

Автоматизация процесса измерений обеспечивает строгую привязку данных к глубине отбора керна и исключает влияние человеческого фактора. Рентгенофлуоресцентный модуль позволяет получать количественные оценки химического состава, ИК-спектрометрия – интерпретировать минеральный состав

и насыщенность, а оптическая система – документировать текстурные и структурные особенности с решением до десятков микрометров.

Полученные данные интегрируются в единый отчет и могут быть экспортированы в форматы, совместимые с геофизическими и геологическими программными пакетами, включая LAS-файлы. Для высокой точности измерений рекомендуется предварительная продольная распиловка керна с удалением верхней полусферы, что обеспечит равномерное прилегание датчиков и минимизацию оптических и геометрических артефактов при проведении анализа с помощью оптических площадных систем (камер).

СЕКТОР МИКРОТОМОГРАФИИ И МИКРОСКОПИИ

Для исследования порового пространства и микроструктуры пород в масштабе от единиц до десятков микрометров в лаборатории предусмотрен сектор микротомографии, оснащенный предлагаемыми нами системами «Продис.Компакт» (в различных конфигурациях) производства ООО «Продис.НДТ». Данные микротомографы предназначены для изучения лабораторных стандартных и мини-образцов, отобранных в результате анализа данных томографии полноразмерного керна.

Время съемки стандартного лабораторного образца диаметром 30–38 мм составляет порядка 30–45 минут при достижимом разрешении 20–40 мкм; на съемку мини-образцов диаметром 3–10 мм требуется несколько часов, разрешение при этом составит 1–3 мкм. Реконструкция и визуализация данных, а также расчет морфометрических характеристик выполняются в отечественном программном обеспечении VolAn (разработчик ООО «Проминт»).

Для вещественной интерпретации результатов микротомографии используется литохимический комплекс, включающий методы рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализов, оптическую и растровую электронную микроскопии. Последняя обеспечивает исследование субмикронных компонентов пород-коллекторов и уточнение морфологии цемента и глинистых минералов, что особенно важно при анализе низкопроницаемых и сложнопостроенных коллекторов.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основе сегментированных томографических данных формируются воксельные или поросетевые модели порового пространства. Эти модели используются для численного моделирования транспортных свойств, включая одно- и многофазную фильтрацию, расчет абсолютной и относительных проницаемостей, а также оценку эффективности различных методов увеличения нефтеотдачи.

Для реализации данных задач можно применять готовые коммерческие программные пакеты либо разработать специализированное решение с учетом требований заказчика. В условиях необходимости высокой прозрачности алгоритмов и доверия к результатам моделирования актуальным становится создание собственных программных продуктов, позволяющих контролировать используемые численные схемы и параметры решателей. Однако разработка такого ПО потребует существенных временных и кадровых ресурсов, поэтому на начальном этапе возможно использовать доступные коммерческие решения с последующей адаптацией или разработкой собственных модулей.

ЦЕНТР ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

Мозгом лаборатории является центр обработки и хранения информации (ЦОД), обеспечивающий вычислительные ресурсы для реконструкции томографических данных, их обработку и комплексирование с профильными литохимическими и микротомографическими исследованиями, численное моделирование строения и свойств продуктивных отложений, хранение всех верифицированных данных и формирование базы данных. Инфраструктура ЦОД включает рабочие станции операторов, серверы для высокопроизводительных вычислений и систему хранения данных с разделением на оперативный («горячий») контур и архивный («холодный») уровень на магнитных носителях.

Архивации подлежат все качественные исходные данные томографии, а также финальные отчеты и проекты. Такая стратегия обеспечит возможность повторной обработки и интерпретации данных по мере развития вычислительной техники и совершенствования алгоритмов моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лаборатория «Цифровой керн» представляет собой комплексную научно-техническую систему, обеспечивающую непрерывный цикл исследований горных пород в диапазоне масштабов от полноразмерного керна до субмикронных структур. Интеграция компьютерной томографии медицинского класса, автоматизированного мультисенсорного сканирования, микротомографии, литохимического анализа и физико-математического моделирования формирует основу для перехода к количественной, воспроизводимой и цифровой геологии.

Запуск подобной лаборатории позволит существенно повысить информативность керновых исследований, улучшить корреляцию с данными ГИС, повысить достоверность геологических и гидродинамических моделей и обеспечить накопление высококачественного цифрового архива данных, пригодного для долгосрочного хранения и повторной интерпретации.