

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ КЕРНА

Михайлюк М. В., Кононов Д.А., Логинов Д.М.

*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН), 117218, г Москва, Нахимовский проспект д. 36, корп. 1, mix@niisi.ras.ru*

---

**В геологоразведочных работах поиска и анализа нефтеносных пластов важное значение имеет изучение керна. КERN представляет собой цилиндрический объем извлеченной породы. Для изучения керна используется микротомография, позволяющая для любой внутренней точки получить значение коэффициента отражения рентгеновского излучения, по которому можно однозначно определить тип породы или пустоты (порового пространства). Визуализация результатов томографии обеспечивает исследователя наглядным способом анализа. В данной работе предлагается метод визуализации порового пространства в выделенной области керна с помощью технологии вершинных и индексных буферов графической библиотеки OpenGL.**

---

Ключевые слова: керна, поровое пространство, визуализация, OpenGL, вершинный буфер

## VISUALIZATION OF PORE SPACE IN A DIGITAL CORE MODEL

Mikhaylyuk, M.V., Kononov D.A., Loginov D.M.

*Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences (SRISA), 117218, Russia, Moscow, 36/1 Nakhimovsky Avenue, mix@niisi.ras.ru*

---

**In exploring and analysis of oil-bearing layers, core study is important. The core is a cylindrical volume of extracted rock. Core study is performed by means of the microtomography, which allows to obtain X-ray reflection coefficient for any internal point. This coefficient can be used for unambiguous identification of rock or emptiness (pore space) type. Tomography result rendering provides visual analysis methods for a researcher. This paper proposes the method for pore space visualization in selected core area by using of vertex and index buffer technology, which is a part of OpenGL graphic library.**

---

Keywords: core, pore space, visualization, OpenGL, vertex buffer

### Введение

При поисках и разведке нефти и газа одной из главных задач геологических служб является получение керна – основного фактического материала для выявления, изучения и оценки промышленного потенциала нефтегазового месторождения. Керна позволяет наиболее точно получить информацию о геологическом разрезе, определить условия залегания пластов, рассчитать петрофизические зависимости и запасы полезных ископаемых. Точность расчетов будет зависеть от качества и полноты поднятого керна. Керна представляет собой столбик извлеченной породы, получаемый в результате бурения скважины, диаметром около 20 см. и длиной до нескольких километров. Для хранения и изучения керна нарезается на части длиной 1 метр или меньше. С помощью лабораторных исследований керна можно определить такие основные петрофизические характеристики нефтяных пластов, как коэффициенты нефтенасыщенности и водонасыщенности, пористости, проницаемости, глинистости, песчаности и др. В дальнейшем строится цифровая модель (электронный образ) керна, обычно с помощью метода рентгеновской микротомографии [1-3]. В этой модели керна разбивается на слои толщиной в несколько микрон и каждый слой представляется в виде двумерного цифрового массива. Числа в этом массиве кодируют значения какого-либо параметра (материала, плотности, нефтенасыщенности и т.д.) в элементарном объеме керна. Весь керна, таким образом, описывается с помощью трехмерного массива чисел. Изучение этого массива удобно осуществлять с использованием виртуального моделирования. В настоящей работе предлагается метод 3D визуализации модели керна на персональном компьютере.

### Формат представления данных керна.

В рамках идеи цифрового месторождения [4, 5] важное значение имеет представление информации в числовом виде. Поэтому к форматам представления научных данных предъявляются серьезные требования. Они должны быть ориентированы на огромные объемы данных различных типов, обеспечивать быстрый доступ к данным, иметь возможность использования на различных платформах, позволять легко расширять формат хранения для включения новых типов данных, а также обладать свойством «самоописания», т.е.

включать в информационный файл описание метаданных. Одним из таких форматов является формат NC, разработанный объединением университетов в области исследований атмосферы (University Corporation for Atmospheric Research) и являющийся частным случаем Единой сетевой формы представления данных (netCDF — Network Common Data Form). С файлами NC можно работать при помощи бесплатных инструментов netCDF от Unidata - набором библиотек, предоставляющим интерфейсы на языках программирования Java, C, C++ и др.

Данные в NC файле включают три основные компоненты: размерности (dimensions), переменные (variables) и атрибуты (attributes), каждая из которых имеет имя и идентификационный номер. Размерности задают размерности матриц данных, переменные – имена этих данных, а атрибуты – их типы. Для описания данных используется специальный язык — CDL (единый язык описания представления данных), синтаксически близкий к описанию структур в языке программирования C.

В данной работе использовались данные о керне, предоставленные ООО «Системы для микроскопии и анализа» в виде множества из 184 файлов формата NC, каждый из которых содержит значения коэффициента поглощения рентгеновского излучения в ячейках сетки размером 2600x2600x40. Размер ячейки равен 0,0029895601 миллиметра по каждому измерению.

Для доступа к информации файлов NC формата в работе использовалась свободная библиотека утилит от Unidata. С ее помощью данные записываются во внутренние структуры системы визуализации.

### Визуализация порового пространства керна

Моделированию течения жидкости в керне уделяется серьезное внимание [6, 7]. Одной из важных задач является изучение структуры порового пространства керна. Для этого предлагается использовать 3D визуализацию произвольно выбранного параллелепипеда из объема моделирования керна. Выбор параллелепипеда осуществляется заданием отрезков по каждому измерению. Отрезок определяется указанием минимального и максимального номеров ячеек по каждой оси. Задается также непрерывный отрезок  $D = [\min, \max]$  значений коэффициентов поглощения образцом рентгеновского излучения. Для порового пространства этот отрезок приближенно определяется как  $[0, 10000]$ . Ячейки со значениями из этого отрезка будут визуализироваться как трехмерные кубики, остальные ячейки будут отбрасываться при визуализации.

Для визуализации предлагается использовать технологию вершинных буферов (VBO – vertex buffer object, см. [8]). Для этого нам понадобятся следующие массивы:

- Трехмерный массив  $S[L, M, K]$ , в который будут считаны данные (коэффициенты поглощения рентгеновского излучения в ячейках сетки размером  $L \times M \times K$ ) для рассматриваемого параллелепипеда из файлов формата NC.

- Массив  $V$  из 8 вершин одной ячейки – кубика с координатами от 0 до  $\Delta$  по каждой оси, где  $\Delta$  - размер ячейки.

- Массив  $I$  индексов вершин, представляющих ячейку в виде множества треугольников, необходимых для визуализации; каждый индекс – это индекс вершины в массиве  $V$ . Порядок записи индексов вершин соответствует представлению поверхности куба в виде треугольного стрипа (Triangle strip). Данный стрип позволяет задать куб в виде последовательности из 14 вершин, где любые 3 подряд идущие вершины будут задавать один треугольник из общей поверхности куба. Так, все полигоны (треугольники) кубика на рис. 1 можно записать в виде следующего стрипа: 0, 1, 3, 2, 6, 1, 5, 0, 4, 3, 7, 6, 4, 5. Полученные треугольники показаны на рисунке пунктирными линиями.

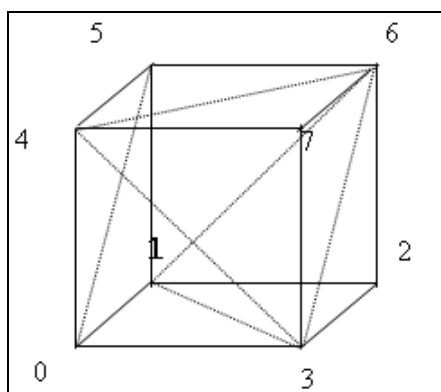


Рис. 1. Представление куба в виде стрипа.

Особенностью технологии VBO является то, что данные находятся непосредственно в видеопамяти (а не в оперативной памяти) и визуализируются непосредственно видеоустройством, что позволяет существенно повысить скорость визуализации. Для реализации этой технологии используются следующие операторы OpenGL.

Для активации буферов:

glGenBuffers – создание новых VBO или IBO (вершинных или индексных буферов);

glBindBuffer – активация VBO или IBO;

glBufferData – загрузка массива вершин или индексов в видеоустройство (в нашем случае это массивы V или I);

Для визуализации:

glEnableClientState – переключение состояния OpenGL на использование вершинных буферов;

glDrawElements – визуализация примитивов (в нашем случае треугольного стрипа) с использованием индексного буфера;

glDisableClientState – восстановление состояния OpenGL;

Для освобождения ресурсов:

glBindBuffer – деактивация VBO или IBO;

glDeleteBuffers – удаление буфера;

Подробное описание этих операторов можно найти в [8].

Идея визуализации порового пространства с помощью технологии вершинных буферов состоит в том, что мы в цикле визуализируем один и тот же кубик, определяемый вершинным и индексным буферами, но каждый раз задаем для него соответствующий цвет и сдвигаем его в нужное место с помощью модельно-видовой матрицы и оператора переноса. Таким образом, мы получаем следующий алгоритм:

```
1. Считываем в массив S[L, M, K] данные рассматриваемого параллелепипеда визуализации из файлов формата NC.
2. Цикл по всем  $0 \leq \ell < L, 0 \leq m < M, 0 \leq k < K$  (по всем элементам E массива S[L, M, K])
   Если  $S[\ell, m, k] \in D$  (т.е. если  $E \in D$ ), то
     // Устанавливаем единичную модельно-видовую матрицу
     glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
     glLoadIdentity();
     // Сдвигаем кубик в соответствующую точку
     glTranslatef( $\ell \cdot \Delta, m \cdot \Delta, k \cdot \Delta$ );
     // Вычисляем и задаем цвет кубика
      $c = \left\lfloor \frac{S[\ell, m, k]}{\max - \min} 127 \right\rfloor + 128$ ;
     glColor3ub(0, 0, c);
     Визуализация стрипа с помощью технологий VBO и IBO.
   Конец если.
Конец цикла.
```

Вычисление цвета по формуле, приведенной в алгоритме, дает значение  $c \in [128, 256]$ , которое записывается в один байт и используется в качестве синей компоненты цвета (красная и зеленая компоненты равны нулю).

На рис. 2 показан пример синтеза изображения выбранного параллелепипеда с учетом заданного диапазона значений.

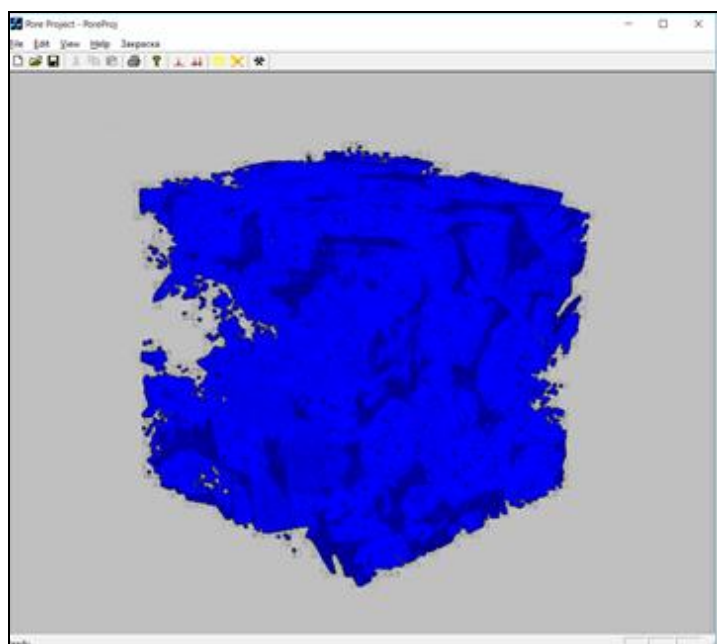


Рис. 2. Визуализация порового пространства.

Интерфейс в разработанном программном модуле визуализации включает возможности перемещения параллелепипеда визуализации вдоль осей координат и вращения его вокруг этих осей с помощью клавиатуры.

#### **Заключение**

Предложенный в работе алгоритм визуализации позволяет получать и изучать изображения произвольного выделенного параллелепипеда цифровой модели ядра в масштабе реального времени. Это дает исследователям важный инструмент для анализа петрофизических характеристик нефтяных пластов. Алгоритм также применим для визуализации поровых пространств, полученных в результате гидроразрыва породы.

#### **Список литературы**

---

1. Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании ядра нефтяных и газовых месторождений. Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. № 15, стр. 28-37.
2. В.Б.Бетелин, В.Ф. Никитин, Н.Н.Смирнов, Е.В.Михальченко, Е.И.Скрылева, Л.И.Стамов, В.В.Тюренкова. Компьютерный ядромодулятор – подходы и методы. Вестник кибернетики, 2015, №4, 33-44.
3. Мизгулин В.В., Штуркин Н.А., Нурканов Е.Ю., Кадушников Р.М., С.С. Сафонов. Метод трехмерного статистического анализа микроструктуры и порового пространства ядра по теневым изображениям с рентгеновского томографа / Сборник тезисов III научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в разработке месторождений», Уфа, 2010.
4. Бетелин В.Б. Проблемы создания отечественной технологии «цифровое месторождение». Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе». Сургут, 2014, с. 15-17.
5. Бетелин В.Б. О проблеме импортнезависимости в нефтегазовой отрасли и машиностроении России // Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе, 2016, с. 18.
6. Никитин В.Ф., Скрылева Е.И., Козлов И.В. Вытеснение моделирующих нефть жидкостей водой из образцов ядра. Влияние параметра смачиваемости на процесс вытеснения. Всероссийская конференция «Цифровая модель ядра», г. Москва, 13-15 марта 2017.
7. Никитин В. Ф., Стамов Л. И. Трехмерное вычислительное моделирование течения вязких жидкостей в канальной модели ядромодулятора // Вестник кибернетики. 2016, № 4, С. 7–17.
8. Основы VBO в OpenGL. <http://vbomesh.blogspot.ru/2012/02/vbo-opengl.html>

#### **References**

---

1. Ya.V.Savitsky Modern possibilities of the X-ray tomography method in the study of cores of oil and gas fields. Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering 2015, № 15, p. 28-37.
2. V.B.Betelin, V.F.Nikitin, N.N.Smirnov, E.V.Mikhalchenko. E.I.Skryleva, L.I.Stamov, V.V.Tyurenkova. Methods and Approaches to Core Sample Simulation. Proceedings in Cybernetics. 2015, №4, p. 33-44.
3. Mizgulin V.V., Sturkin N.A., Nurkaniv E.Yu. Kadushnikov P.M., Safonov S.S. The method of 3D statistical analysis of the microstructure and pore space of the core from shadow images from an X-ray tomograph. Abstracts of the III scientific-practical conference «Mathematical modeling and computer technologies in development of deposits». Ufa, 2010.
4. V.B.Betelin. Problems of Creation of Domestic Technology «Digital Deposit» // International conference «Mathematics and Informational Technologies for Oil and Gas Industry». Surgut, 2014, p. 15-17.
5. V.B.Betelin. On the problem of import-independence in the oil and gas industry and Russian Engineering // International conference «Mathematics and Informational Technologies for Oil and Gas Industry». Surgut, 2016, p. 18.
6. Nikitin V.F., E.I.Skryleva, Kozlov I.V. The Displacement of Oil-Modeling Fluids with Water from Core Samples. Effect of the Wettability Parameter on the Displacement Process. The Russian Conference «Digital Core Model», Moscow, March 13-15, 2017.
7. V.F.Nikitin, L.I.Stamov. 3D Simulation of Viscous Fluid Flows with a Channel-based Core Simulator Model. Proceedings in Cybernetics. 2016, № 4, p. 7–17.
8. The basic of VBO in OpenGL. <http://vbomesh.blogspot.ru/2012/02/vbo-opengl.html>