

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ КЕРНА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С.В. Галкин, А.А. Ефимов, С.Н. Кривошеков, Я.В. Савицкий, С.С. Черепанов\*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Пермь, Комсомольский просп., 29, Россия*

*\* ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ, 614990, Пермь, ул. Ленина, 62, Россия*

Изложен опыт исследования емкостно-фильтрационных свойств горных пород на керне с помощью метода рентгеновской томографии. Данный вид исследований является перспективным направлением изучения петрофизических свойств горных пород, позволяя помимо общей количественной оценки объема пустотного пространства, визуализировать структуру горной породы, выделяя в ее объеме поры, каверны, трещины, а также участки матрицы с различной плотностью. С помощью метода рентгеновской томографии возможно детально изучить неоднородность горных пород, что необходимо для построения достоверных фильтрационно-емкостных моделей залежей углеводородов.

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете выполнены исследования, показавшие широкий спектр возможностей применения метода рентгеновской томографии керна для задач нефтегазовой геологии. Система рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии Nikon Metrology XT H 225 позволяет проводить исследования образцов стандартного диаметра (30 мм) и полноразмерного керна (100 мм). В ходе выполненных работ проведено изучение структуры порового пространства карбонатных и терригенных пород на образцах стандартного и полноразмерного диаметра, визуализация результатов соляно-кислотной обработки образцов карбонатных коллекторов, исследование механических свойств каменных солей. Применение программного комплекса Avizo Fire позволило построить 3D-модели структуры порового пространства и минерального скелета образцов керна.

*Рентгеновская томография, керн, петрофизические исследования, коллектор, пористость, неоднородность.*

### X-RAY TOMOGRAPHY IN PETROPHYSICAL STUDIES OF CORE SAMPLES FROM OIL AND GAS FIELDS

S.V. Galkin, A.A. Efimov, S.N. Krivoshchekov, Ya.V. Savitskii, and S.S. Cherepanov

The porosity and permeability of core rocks were studied by X-ray tomography. This method has a high potential for studying petrophysical properties of rocks, because it permits not only a general quantitative estimation of the void volume but also visualization of the rock texture, including pores, cavities, cracks, and zones of different densities in the matrix. X-ray tomography permits detailed studies of rock inhomogeneity, which are necessary for the elaboration of reliable porosity–permeability models for hydrocarbon pools.

The investigations at Perm' State National Research Polytechnic University have shown that X-ray tomography of core samples has a wide spectrum of applications in petroleum geology. Nikon Metrology XT H 225 X-ray computed tomography makes it possible to examine samples with a standard diameter (30 mm) and whole core samples (100 mm). The structure of voids in carbonate and terrigenous rocks was studied on samples with standard and full diameters; the results of hydrochloric acid treatment of carbonate reservoir rocks were visualized; and the mechanical properties of rock salts were studied. Three-dimensional models for the structure of voids and mineral matrix of the core samples have been constructed with the use of the Avizo Fire software.

*X-ray tomography, core samples, petrophysical studies, reservoir, porosity, inhomogeneity*

### ВВЕДЕНИЕ

Задача подбора оптимальных систем разработки для залежей углеводородов определяется научной проработкой вопросов, связанных с фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) коллекторов, прежде всего, с учетом оценки неоднородности ФЕС в объеме залежи. Особенно это актуально для коллекторов, представляющих собой сложнопостроенные и неоднородные геологические тела, часто с высокой фациальной изменчивостью. Между тем при моделировании разработки месторождений углеводородов не всегда в полной мере учтены факторы изменчивости структуры порового пространства геоло-

гических объектов. В частности при геолого-гидродинамическом моделировании строение месторождений во многом упрощается, недоучет влияния неоднородности в строении эксплуатационных объектов, нарушает последовательность освоения месторождения и снижает конечную выработку запасов.

Весьма перспективным и относительно новым направлением исследований фильтрационно-емкостных свойств коллекторов является использование метода рентгеновской томографии. Исследования кернa рентгеновским методом основано на различии в плотности горной породы, минеральных включений, пустот и трещин, и заполняющих их пластовых флюидов. Рентгеновское излучение, проходя сквозь горную породу, ослабляется. При этом величина ослабления рентгеновского излучения экспоненциально зависит от толщины «просвечиваемой» горной породы, а коэффициенты «экспоненты затухания» зависят от физических свойств породы. Следует отметить, что с увеличением плотности горной породы коэффициенты затухания возрастают после прохождения горной породы, формируя пиксельное изображение.

Из полученных снимков, представляющих собой полутоновые изображения, яркость которых характеризует степень поглощения рентгеновского излучения, реконструируется объемная трехмерная модель образца. Таким образом, результатом рентгеновской томографии является трехмерное распределение «рентгеновской плотности» в объеме, что позволяет судить о структуре матрицы горной породы и распределении поровых каналов.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ КЕРНА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Рентгенотомографические методы используются в нефтегазовой геологии с конца 80-х годов [Wellington, Vinegar, 1987]. Первоначально исследования проводились исключительно за рубежом (Австралия, США, Великобритания, Германия, Норвегия, Польша), в России рентгеновская томография кернa проводится с 2000-х годов [Якушина и др., 2003]. Основными центрами проведения рентгенотомографических исследований кернa в России являются: МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва), ВНИГРИ (г. Санкт-Петербург), СИБКОР (г. Тюмень), ТомскНИПИнефть ВНК (г. Томск), ПНИПУ (г. Пермь).

Размеры исследуемых образцов обусловлены техническими характеристиками томографов (мощность рентгеновской пушки, расстоянием до приемника, габариты детектора). При использовании оборудования с возрастанием проникающей способности рентгеновских лучей увеличивается размер фокусного пятна, что негативно сказывается на результате сканирования объектов. Соответственно под конкретный размер образцов кернa должен использоваться томограф с определенным диапазоном основных характеристик рентгеновского излучения (рабочая разность потенциалов, максимальная мощность).

Исходя из опыта применения метода, можно выделить перспективные направления исследований рентгеновской томографии:

- для полноразмерного кернa (диаметр 100 мм);
- для стандартных образцов кернa (диаметром 26 мм и 40 мм);
- для образцов кернa диаметром до 30 мм (5—15 мм).

Изучение полноразмерного кернa ( $d = 100$  мм,  $h = 1000$  мм) проводится с целью выявления литологических неоднородностей, зон трещиноватости и участков локализации каверн. Результаты томографии полноразмерного кернa могут быть использованы как экспресс-анализ для определения типа коллектора, расчета объемов трещин и каверн, корреляции данных, полученных при геофизических исследованиях скважин и лабораторных петрофизических исследованиях. Томография полноразмерных образцов также используется как метод исследования трещиноватых горных пород, изготовление из которых стандартных образцов ( $d = 30$  мм) не представляется возможным [Жуковская, Лопушняк, 2006, 2008]. Опыт исследований полноразмерного кернa обобщен в докладе «Опыт практического применения рентгеновской томографии полноразмерного кернa» Д.А. Беженцева и И.В. Федорцова на конференции International Conference and Exhibition (Тюмень, 2009). На взгляд авторов, большие перспективы практического использования томографии на полноразмерном керне связаны с задачами методического выявления промышленных запасов трещинных коллекторов.

Томография стандартных петрофизических образцов ( $d = 30$  мм) позволяет изучать структурно-морфологические признаки, геометрию пустотного пространства (поры, каверны, трещины), а также проводить контроль качества изготовления образцов, т.е. проверять соответствие их ориентировки напластования параллельной или перпендикулярной [Peters, Afzal, 1992; Arnus и др., 2005; Saadat и др., 2011]. Кроме этого, исследования стандартных петрофизических образцов методом рентгеновской томографии позволяют оценить влияние микрон неоднородностей и слоистости кернa на характер распределения жидкости, электрических и акустических свойств в породах-коллекторах [Алеми и др., 2012].

Томография образцов кернa диаметром менее 30 мм (обычно 15 или 9 мм) позволяет исследовать состав минеральных компонентов и их взаимоотношение в пространстве, объемные и поверхностные

**Рис. 1. Камера сканирования рентгеновской системы Nikon Metrology XT H 225.**

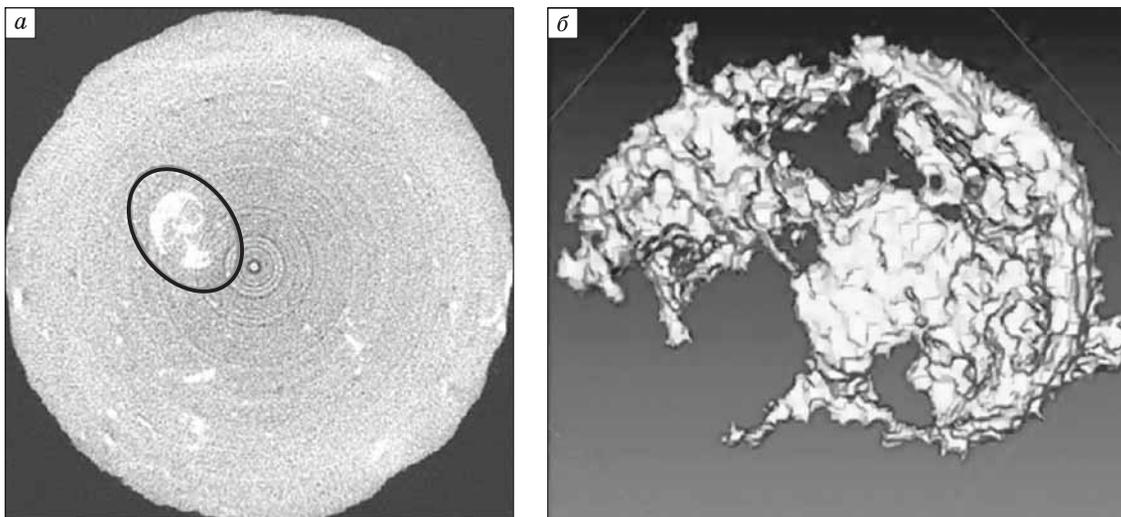


характеристики выделяемых компонент, тип цемента, структуру порового пространства. Высокое разрешение, получаемое за счет малых размеров исследуемых образцов, позволяет проводить оценку флюидонасыщенности и распределения фронта движения флюида при определении фазовых проницаемостей, а также распределения остаточной воды в образцах при снятии кривой капиллярного давления [Корост и др., 2010]. Рентгеновская томография керн малых размеров может проводиться в условиях, когда невозможно изготовить стандартные образцы (шлам, сколы и т.д.) [Ketcham, Carlson, 2001; Еременко, Муравьева, 2012; Журавлев, Вевель, 2012].

Следует отметить, что в России, как правило, техническое оснащение центров томографическим оборудованием позволяет проводить исследования лишь по одному из указанных направлений. Так, в Западной Сибири («ТомскНИПИнефть ВНК», «СИБКОР») используются томографы отечественного производства, конструкция которых, в связи с фиксированным расстоянием от источника излучения до приемника, позволяет детально изучать образцы керн диаметром 100 мм и высотой 1000 мм. Напротив, наиболее распространенные в России томографические системы SkyScan, имеющие ограничение в диапазоне напряжения 100 кВ, не позволяют эффективно исследовать образцы более 30 мм в диаметре. Соответственно технические характеристики томографов SkyScan исключают возможность изучения полноразмерных образцов керн.

Анализ как отечественного, так и зарубежного опыта рентгеномтомографических исследований керн показывает, что наиболее оптимальным должен быть томограф, имеющий рабочую разность потенциалов в диапазоне с верхним порогом не менее 210 кВ и конструкцией, позволяющей менять расстояние от рентгеновской трубки до приемника. Томографы с вышеуказанными характеристиками позволяют качественно исследовать образцы от нескольких миллиметров в поперечнике до полноразмерных, включая стандартные образцы диаметром 30 мм.

С 2011 г. в Пермском национальном исследовательском политехническом университете проводятся исследования керн на базе системы рентгеновского контроля с функцией компьютерной томо-



**Рис. 2. Фоссилии в полноразмерном керне.**

*a* — поперечный томографический срез, *б* — 3D модель фоссилии.

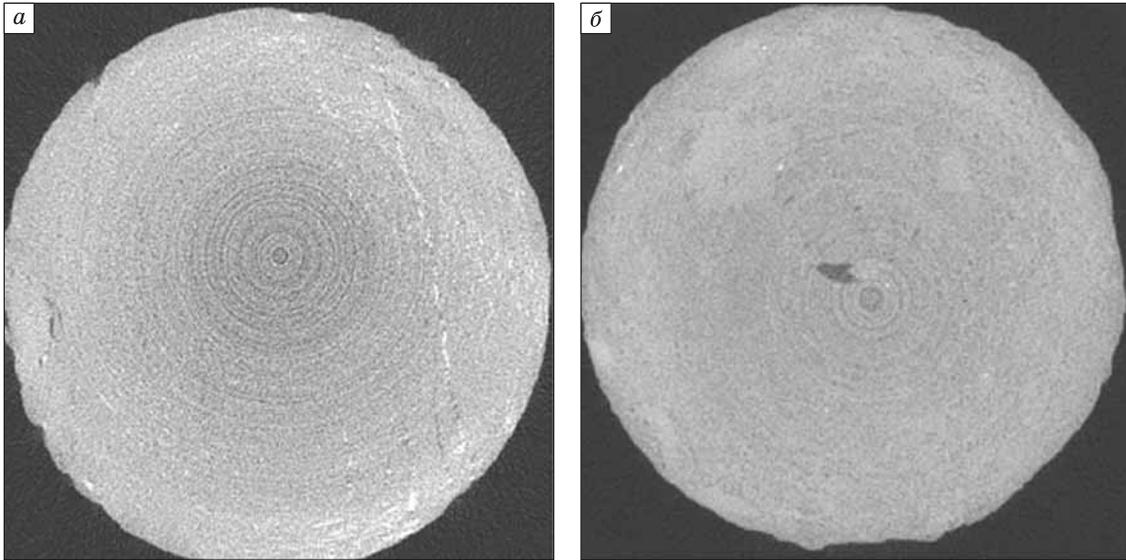


Рис. 3. Полноразмерный образец с залеченными трещинами (а) и образец с каверной (б).

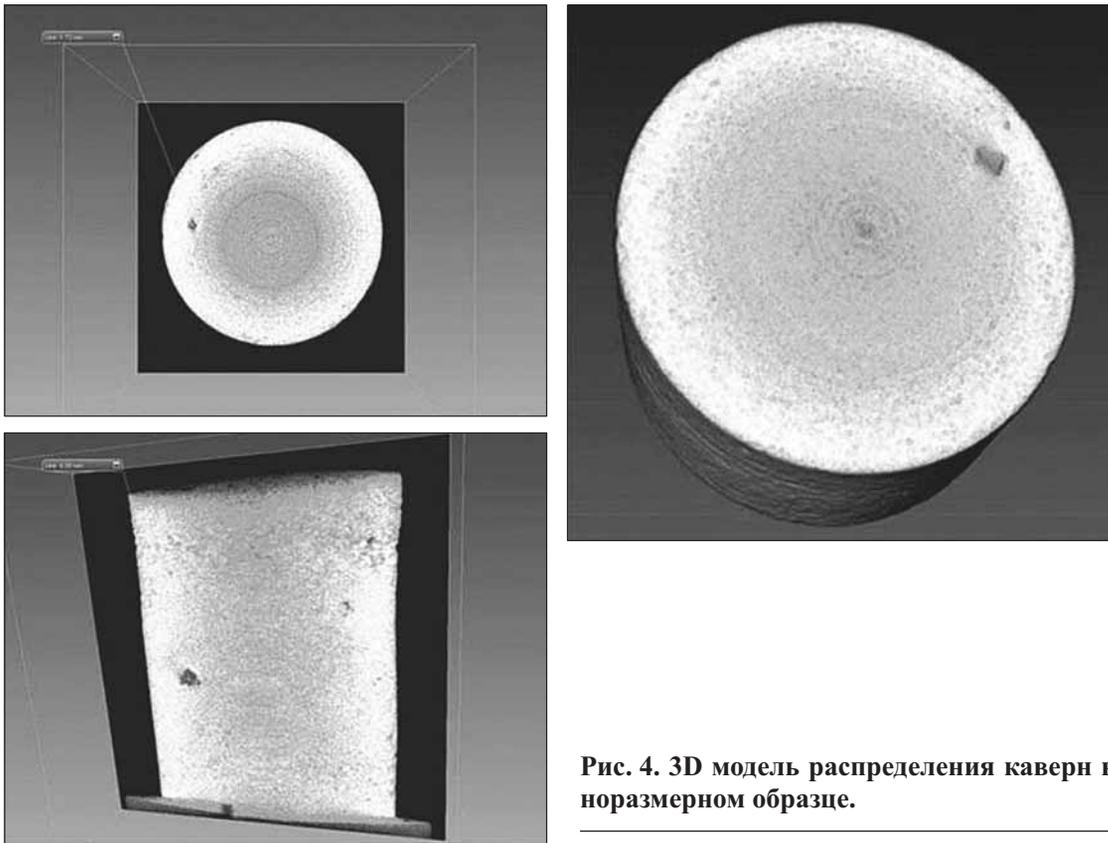
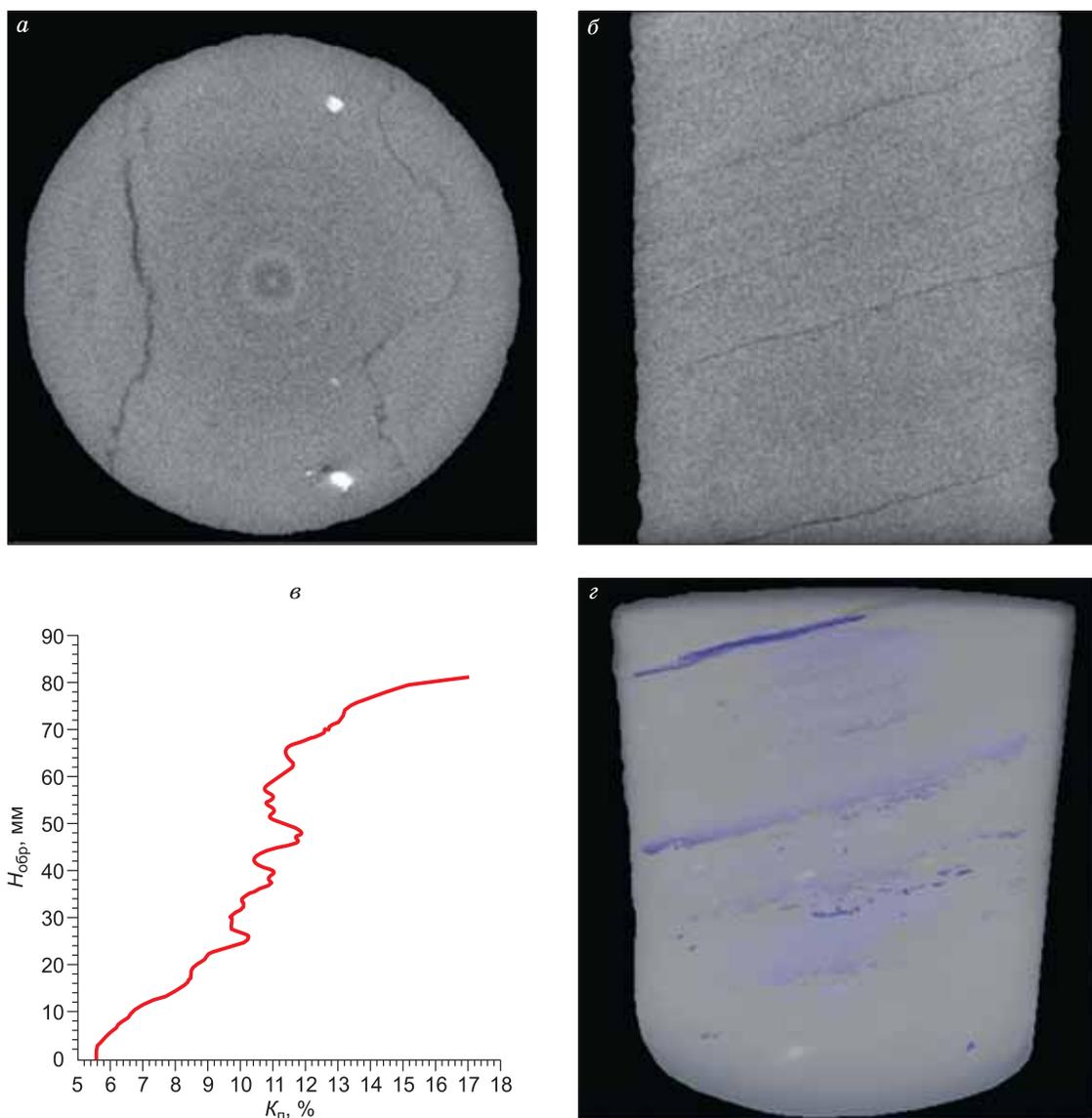


Рис. 4. 3D модель распределения каверн в полноразмерном образце.

графии Nikon Metrology XT H 225, которая хорошо зарекомендовала себя при исследованиях керна за рубежом (рис. 1).

Рабочая разность потенциалов установки от 30 до 225 кВ, мощность рентгеновской трубки 225 Вт, размер фокального пятна 0.003 мм, габариты детектора 200 на 250 мм, расстояние от источника до приемника 1000 мм. Данная система в силу технических характеристик позволяет проводить исследования на образцах керна диаметром от нескольких миллиметров до полноразмерного керна. Так, минимально разрешимые элементы для образцов размером 100 мм составляют 0.07 мм, образцов размером 30 мм — 0.02 мм, а для образцов размером 10 мм — 0.007 мм.



**Рис. 5. Полноразмерный образец песчаника.**

*a* — поперечный срез, *б* — продольный срез, *в* — распределение пористости по высоте образца, *г* — 3D-модель образца с выделенными поверхностями напластования.

В период 2012—2013 гг. методом рентгеновской томографии авторами проведены исследования на керне месторождений Пермского края, Красноярского края, Республики Ирак, Республики Узбекистан. При этом для анализа проекций с последующей визуализацией 3D-модели использовался программный продукт Avizo Fire. Томографические исследования во всех случаях контролировались стандартными петрофизическими исследованиями керна. Петрофизические исследования позволяют получить усредненную по объему образца количественную оценку основных коллекторских свойств, томографические — оценить литологическую неоднородность на микроуровне, получить трехмерную модель структуры пустотного пространства.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛНОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ КЕРНА

Исследования полноразмерного керна проведены авторами как для карбонатных, так и терригенных коллекторов. Для карбонатных полноразмерных образцов методом томографии уверенно выделены рентгеноконтрастные включения кальцита, представляющие собой (рис. 2), например, ископаемые органические остатки. В полноразмерных образцах удалось обнаружить трещины, как правило, сомкнутые, иногда раскрытые с шириной до 1 мм. Раскрытые трещины частично заполнены кальцитом. В ис-

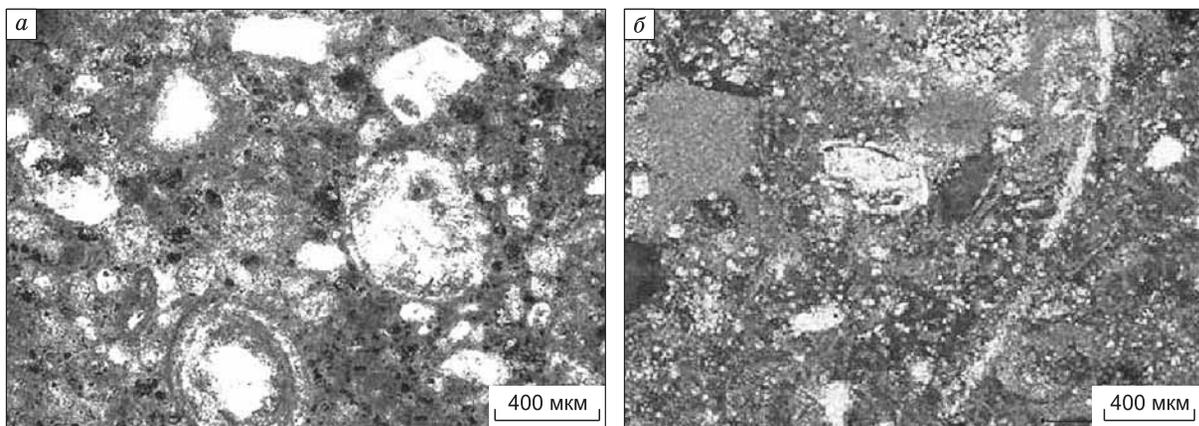


Рис. 6. Шлиф оолитово-онколитового известняка (а), известняка с гирванеллами, остракодами (б).

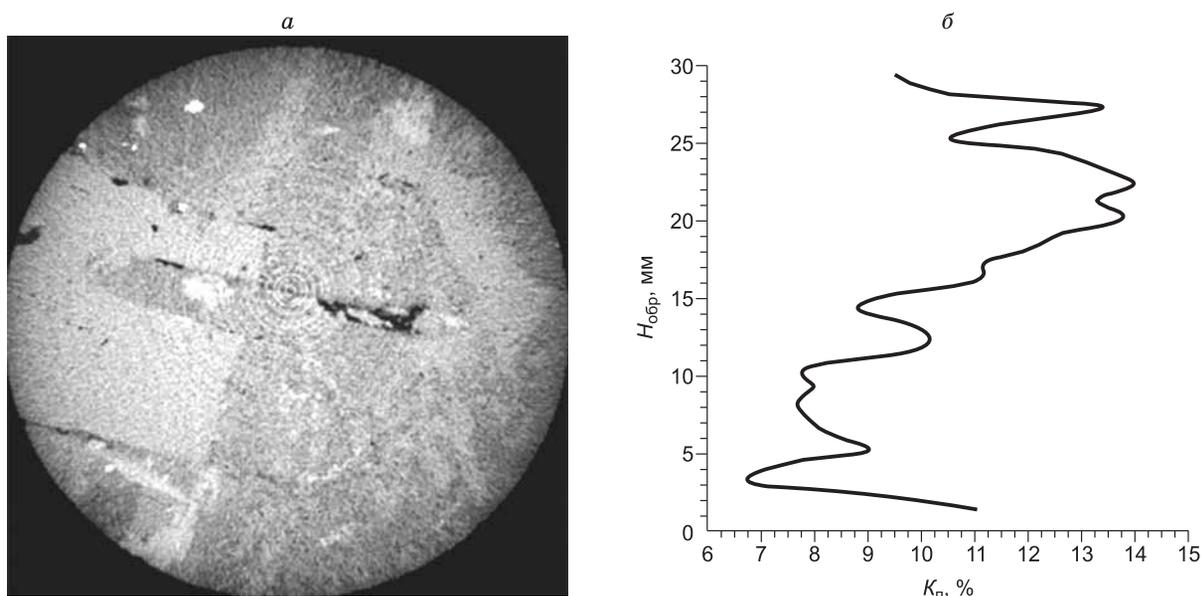


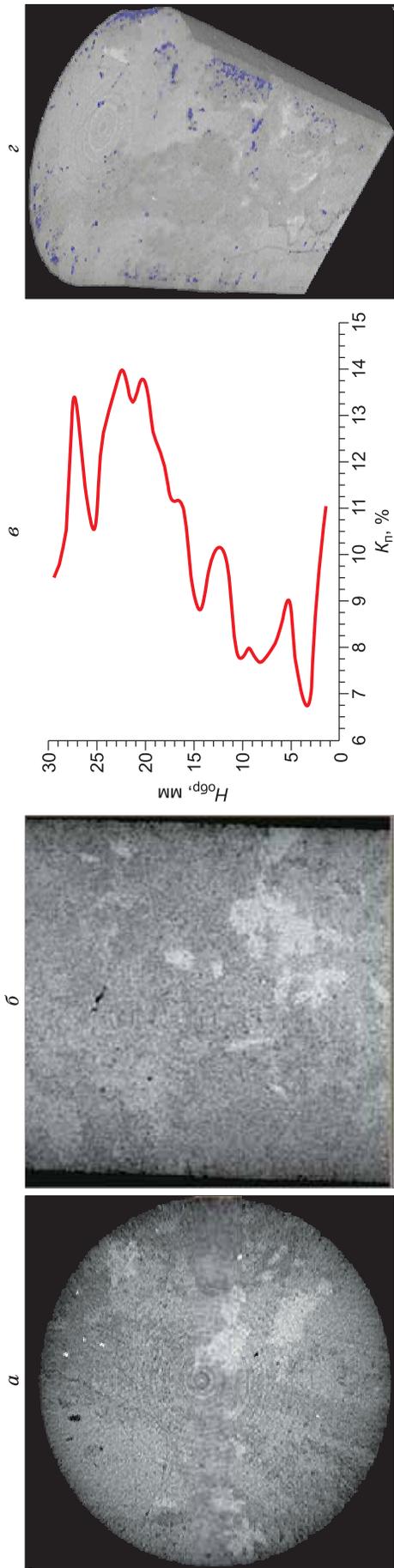
Рис. 7. Образец диаметром 30 мм с каверной по трещине (а); распределение пористости по высоте образца (б).

следованных методом томографии керн образцах установлены каверны с размерами до 3 мм (рис. 3), часто каверны развиты по трещинам.

На рис. 4 приведены результаты томографии полноразмерного керна карбонатного коллектора с оцененной стандартным методом пористостью 20 %. Диапазон пористости, обусловленной в основном кавернами, по данным томографии составил по длине образца от 0.5 до 2.5 %. На рис. 5 приведены результаты томографии керна терригенного коллектора, где прослеживаются системы трещин. Во всех случаях поровая составляющая не может быть оценена, так как при габаритах полноразмерного керна томограф «не видит» поры. Тем не менее можно оценить поровую составляющую интегральным способом, оценивающим среднее изменение яркости керна с поровой составляющей и без нее.

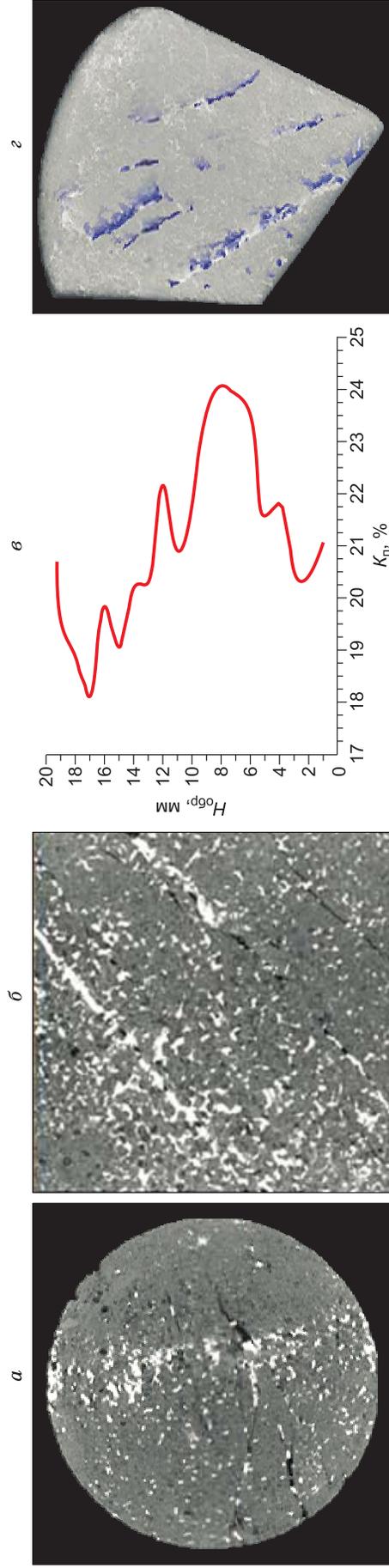
#### ИССЛЕДОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

На рис. 6 приведены шлифы, изготовленные из керового материала горизонтов верхнего отдела юрской системы одного из месторождений Чарджоуской тектонической ступени. Исследуемые отложения характеризуются сложной структурой пустотного пространства, они представлены известняками с большим разнообразием структурно-текстурных признаков, в том числе оолитово-онколитовыми известняками (см. рис. 6, а), известняками, основным породообразующим материалом которых являются водоросли (см. рис. 6, б).



**Рис. 8. Образец диаметром 30 мм трещинно-каверновый.**

*a* — поперечный срез, *б* — продольный срез, *в* — распределение пористости по высоте образца, *г* — 3D-модель образца диаметром 30 мм с трещинно-каверновой пористостью.



**Рис. 9. Образец диаметром 30 мм порово-трещинный.**

*a*, *б*, *в* — распределение пористости по высоте образца, *г* — 3D-модель образца с порово-трещинной пористостью.

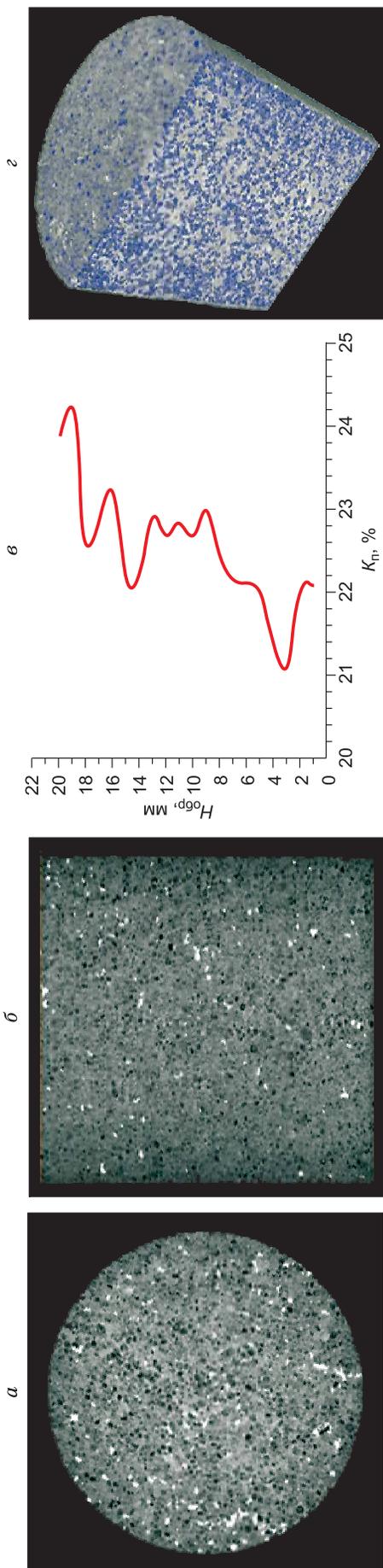


Рис. 10. Образец диаметром 30 мм поровый.

*a* — поперечный срез, *б* — продольный срез, *в* — распределение пористости по высоте образца, *г* — 3D-модель образца с поровым типом пористости.

Исследование стандартных петрофизических образцов рентгеномографическим методом позволило обнаружить каверны, определенные ранее при томографии полноразмерного зерна. На рис. 7 приведена та же каверна, что и на рисунке 3, *б*, но полученная на стандартном образце. Пористость по срезам образца изменяется в диапазоне от 7 до 14 %, неоднородность пористости тесно связана с кавернозностью образца. Исследования стандартных петрофизических образцов позволили в исследованных породах выделить три типа пустотного пространства.

Первый тип, трещинно-каверновый, где скелет породы сложен двумя минералами с близкой плотностью: серый и светло-серый цвета распределяются в равных долях в виде крупных скоплений. Рентгеноконтрастные включения кальцита незначительны (0.1 % объема). Пористость преимущественно каверновая и трещинная, межгранулярные поры очень мелкие. Трещины плохо прослеживаемые, чаще сомкнутые, связанные. Пористость по срезам образца изменяется в диапазоне от 2 до 34 %, в среднем составляет 10—14 %. Интервалы повышенной пористости связаны с кавернами и слабооткрытыми трещинами (рис. 8).

Второй тип определен как порово-трещинный. Минеральный скелет породы однороден по плотности. Рентгеноконтрастные включения кальцита составляют около 4 % объема образца, распределены повсеместно, замещают часть пустотного пространства. Включения по форме изометричные, мелкие и крупные, изолированные. Пустотное пространство представлено внутриформенными порами и трещинами. Поры по срезам круглые, мелкие и средние по размеру. Трещины как продольные, так и поперечные, сомкнутые и раскрытые (ширина трещин до 1.1 мм). Пористость в основном трещинная. В целом пористость изменяется от 18 до 24 % (рис. 9).

Третий тип коллектора — поровый. Пористость представлена внутриформенными и межформенными пустотами. Поры в основном крупные, в разрезе круглые, открытые. Коллектор этого типа высокопористый — от 22 до 31 % (рис. 10). Неоднородность в распределении пористости для данного типа коллектора связана прежде всего с кальцитизацией пор.

Помимо томографических исследований на петрофизических образцах зерна диаметром 30 мм проведен стандартный комплекс исследований коллекторских свойств. Определение физических свойств пород-коллекторов проводилось на автоматизированной установке для измерения пористости и проницаемости AP-608 (Coretest Systems, США). Проведено сопоставление коэффициентов пористости по стандартному методу и рентгеновской томографии на 35 образцах зерна. Величины пористости имеют следующие статистические распределения:  $K_{п} = 21.8 \pm 5.2 \%$  — для стандартного

**Рис. 11. Сопоставление значений определенной стандартным методом открытой пористости (ОП) и пористости, оцененной методом рентгеновской томографии (П-том).**

метода;  $K_{\text{П}} = 21.3 \pm 5.1 \%$  — для метода рентгеновской томографии. Значения статистических критериев  $t = 0.613$  при  $p = 0.541$  и  $\chi^2 = 0.828$  при  $p = 0.661$  показывают хорошую сходимость определений пористости рассмотренными методами.

На рис. 11 по данным 35 определений приведено сопоставление значений  $K_{\text{ОП}}$  и  $K_{\text{П-том}}$ . Для данных показателей отмечена тесная линейная корреляционная связь ( $r = 0.94$ ). Необходимо отметить, что использование метода рентгеновской томографии, помимо количественной оценки объема порового пространства, также дает информацию о структуре и неоднородности порового пространства.

Для территории Пермского края авторами на стандартных образцах керна проведены исследования методом рентгеновской томографии как для карбонатных (доломиты, известняки), так и для терригенных (песчаники, алевролиты и алевролитистые песчаники) коллекторов. Результаты томографического сканирования представлены на рис. 12 и 13.

Как известно, для карбонатных пород характерен широкий спектр структурных видов и меньшая по сравнению с алюмосиликатным веществом терригенных пород устойчивость породообразующих карбонатных минералов к растворению в условиях недр. Карбонатные породы наиболее часто представляют собой коллекторы сложного типа, емкостное пространство которых представлено сочетанием пор, каверн и трещин. Результаты томографии образца известняка (см. рис. 12) показывают отсутствие для него первичной пористости, пористость вторичная обусловлена кавернами выщелачивания. Пористость каверн составляет, по результатам исследований методом рентгеновской томографии, 4 %.

Пористость терригенных пород, как правило, первичная и обусловлена межгранулярным пространством. На рис. 13 представлены результаты томографии песчаника. Поры в образце распределены равномерно, значение пористости по его длине варьирует в достаточно узком интервале от 19 до 21 %. Размеры пор во всем объеме образца близки и составляют 0.4 мм.

Исследования керна методом рентгеновской томографии могут быть использованы не только при решении петрофизических задач, но и для контроля лабораторного моделирования методов повышения нефтеотдачи пласта. Так, проводимые в ПНИПУ работы по разработке оптимальных технологий проведения соляно-кислотной обработки (СКО) сопровождались томографическими исследованиями образцов керна до и после СКО. Результаты исследований показали, что соляная кислота создала сквозной сложноизогнутый канал диаметром около 5 мм, в связи с чем при увеличении пористости на 2 % проницаемость возросла на три порядка (рис. 14).

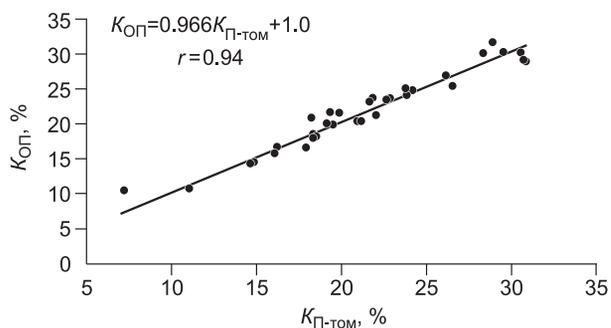
### ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ СИЛЬВИНИТА КУБИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

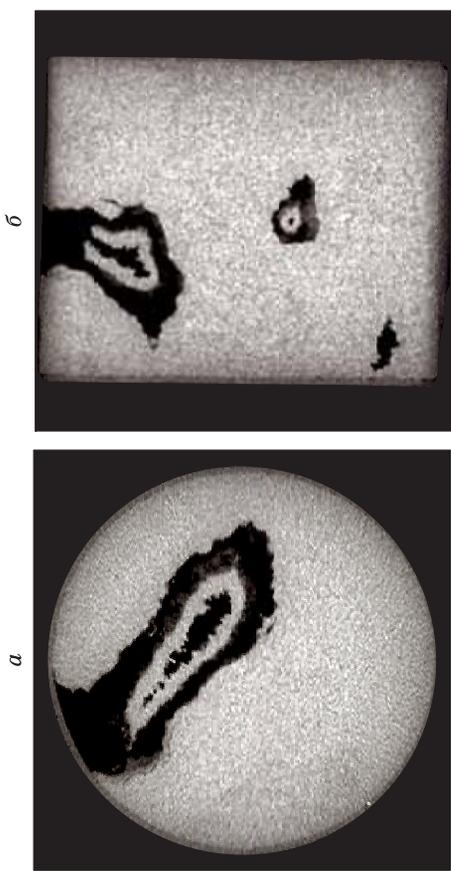
Кроме решения задач нефтяной геологии, метод рентгеновской томографии может использоваться при изучении механических свойств горных пород. На рис. 15 приведены результаты томографических исследований образцов сильвинитов кубической формы с длиной стороны 50 мм до и после проведения на них испытаний прочностных свойств. Полученные трехмерные модели дают представление не только о пространственном расположении образовавшихся трещин в объеме образца, но и количественную оценку пустотного пространства, соответствующего объемам этих трещин.

На рис. 15 представлены 3D-модели одного и того же образца до испытаний (отсутствие пустот) и после двухступенчатой нагрузки (широкое развитие субвертикальных трещин). Данные результаты использованы при создании модели устойчивости элементов подземных конструкций Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

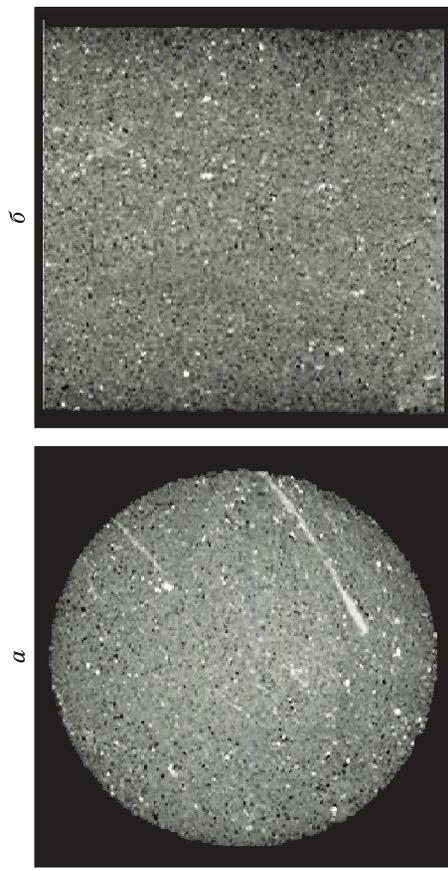
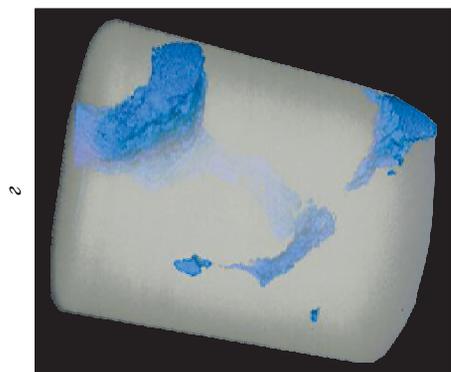
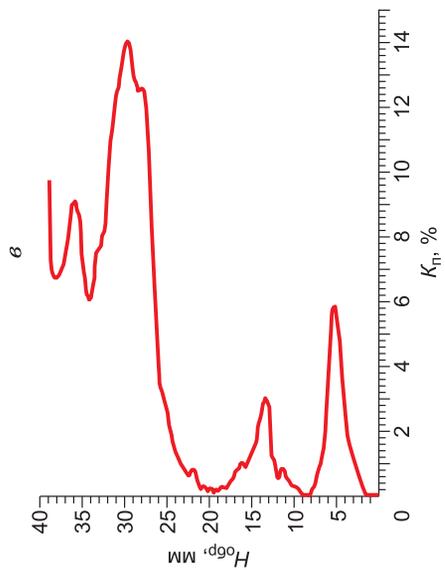
Анализ опыта применения рентгеновской томографии керна показывает широкие возможности использования метода для решения фундаментальных и прикладных задач в нефтегазовой отрасли. Метод является перспективным для оценки структуры минерального скелета и пустотного пространства горных пород, контроля емкостно-фильтрационных характеристик коллекторов. Рентгенотомографические исследования могут использоваться для контроля стандартных петрофизических исследований





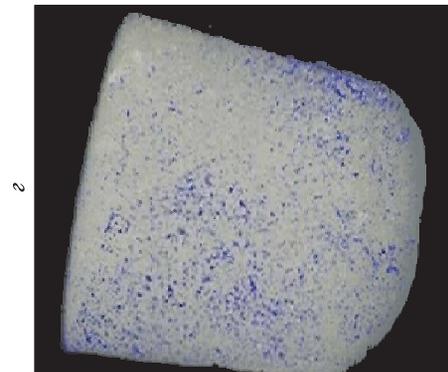
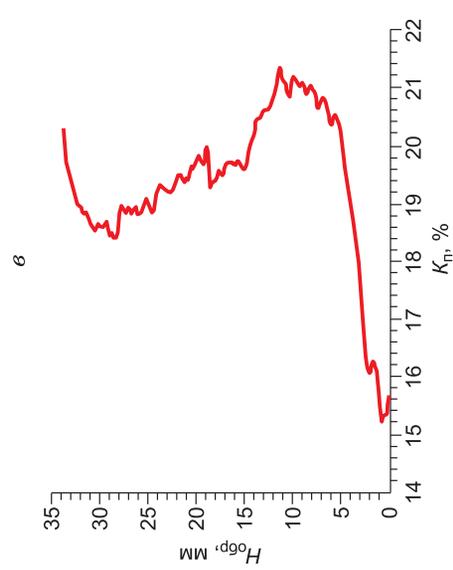
**Рис. 12. Образец диаметром 30 мм, известняк кавернозный.**

*a* — продольный срез, *б* — поперечный срез, *в* — распределение пористости по высоте, *г* — 3D-модель образца с кавернами.



**Рис. 13. Образец диаметром 30 мм, песчаник.**

*a* — продольный срез, *б* — поперечный срез, *в* — распределение пористости по высоте образца, *г* — 3D-модель образца диаметром, вид с порами.



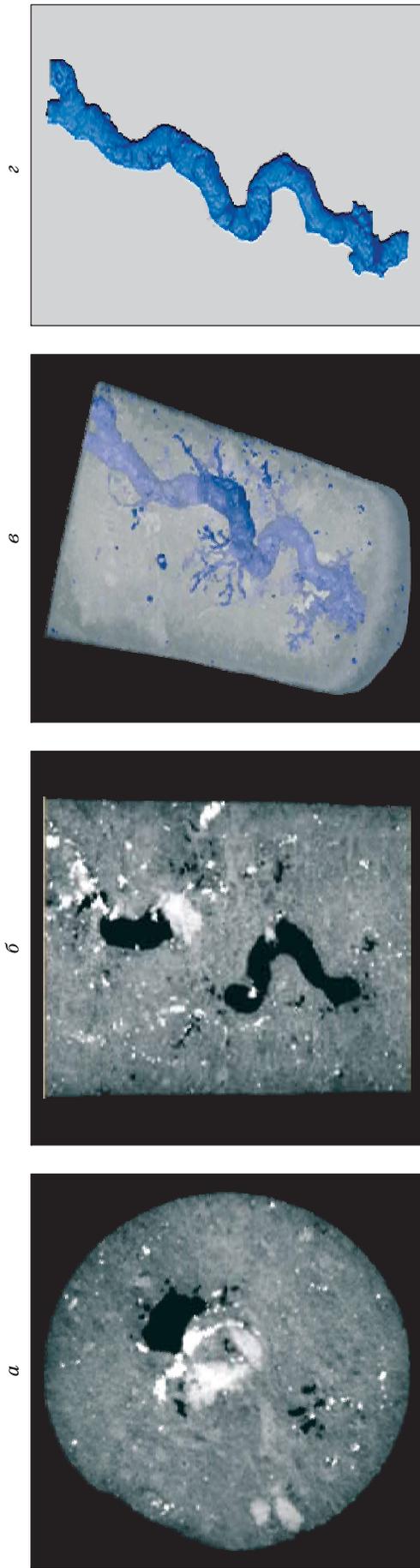


Рис. 14. Образец диаметром 30 мм после солянокислотной обработки.

*a* — продольный срез, *б* — поперечный срез, *в* — объемный вид образца с «червоточинной», *г* — объемный вид канала.

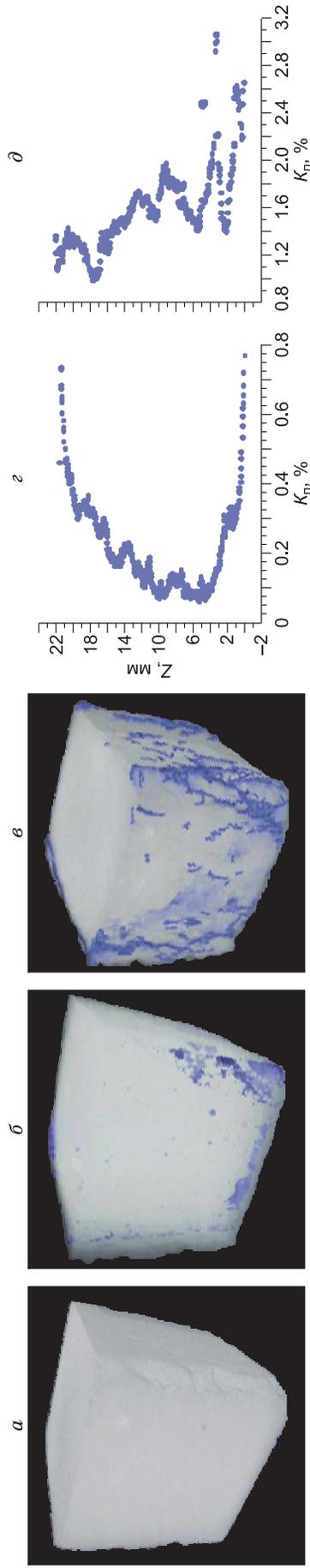


Рис. 15. Трехмерная модель образца каменной соли.

*a* — вид до проведения испытаний, *б* — вид после проведения испытаний 1-й ступени нагрузки, *в* — вид после проведения испытаний 2-й ступени нагрузки, *г* — кривая изменения пористости по высоте после испытаний 1-й ступени нагрузки, *д* — кривая изменения пористости по высоте после испытаний 2-й ступени нагрузки.

керна, позволяя, помимо общего объема пустотного пространства породы, детально оценивать неоднородность его структуры.

Использование рентгеновской томографии возможно как для образцов стандартного размера, так и полноразмерного керна. При этом оптимальным, на взгляд авторов, является научное оборудование с рабочей разностью потенциалов не менее 210 кВ и конструкцией, позволяющей менять расстояние от рентгеновской трубки до приемника. Томографы с указанными характеристиками могут детально исследовать образцы от нескольких миллиметров в поперечнике до полноразмерных. Применение программного комплекса Avizo Fire позволяет построить 3D-модели структуры порового пространства и минерального скелета образцов керна.

Изучение полноразмерного керна методом рентгеновской томографии проводится с целью выявления литологических неоднородностей, зон трещиноватости и участков локализации каверн. Результаты томографии полноразмерного керна могут быть использованы для определения типа коллектора, расчета объемов трещин и каверн. Перспективным направлением томографии полноразмерного керна видится ее внедрение в комплекс подсчета промышленных запасов трещинных коллекторов.

Томография стандартных петрофизических образцов позволяет детально изучать структурно-морфологические признаки, геометрию пустотного пространства (поры, каверны, трещины). Перспективным и в настоящее время еще недостаточно разработанным научным направлением является оценка распределения нефтенасыщенности в коллекторах различных типов.

Использование метода рентгеновской томографии эффективно при анализе результатов моделирования на кернах технологий повышения нефтеизвлечения. Метод также нашел практическое применение при исследовании прочностных характеристик горных пород. Сравнение результатов томографии до и после воздействия различных технологий позволяет количественно оценить геометрию и характер образовавшихся изменений на образцах кернов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-96003 p\_урал\_a.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Еременко Н.М., Муравьева Ю.А.** Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2012, т. 7, № 3. [http://www.ngtp.ru/rub/2/35\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/2/35_2012.pdf)

**Жуковская Е.А., Лопушняк Ю.М.** Применение результатов рентгеновской томографии при типизации негранулярных коллекторов на примере Урманского месторождения // Нефтяное хозяйство, 2006, № 8, с. 24—27.

**Жуковская Е.А., Лопушняк Ю.М.** Использование рентгеновской томографии при исследовании терригенных и карбонатных коллекторов // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть», 2008, № 1, с. 1—25.

**Журавлев А.В., Вевель Я.А.** Возможности использования вычислительной микротомографии в микропалеонтологических и литологических исследованиях // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2012, т. 7, № 2, [http://www.ngtp.ru/rub/2/21\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf)

**Корост Д.В., Калмыков Г.А., Япаскурт В.О., Иванов М.К.** Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов // Геология нефти и газа, 2010, № 2, с. 36—42.

**Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозяинов М.С.** Рентгеновская вычислительная микротомография — неразрушающий метод структурного и фазового анализа // Мир измерений, 2003, № 10, с. 12—17.

**Alemu B.L., Aker E., Soldal M., Johnsen O., Aagard P.** Effect of sub-core scale heterogeneities on acoustic and electrical properties of a reservoir rock: a CO<sub>2</sub> flooding experiment of brine saturated sandstone in a computed tomography scanner // European Association of Geoscientists & Engineers. Geophysical Prospecting, 2012, v. 61, p. 235—250.

**Arnus C.H., Bauguet F., Limaye A., Sakellariou A., Senden T.J., Sheppard A.P., Sok R.M., Pinczewski W.V., Bakke S., Berge L.I., Oren P.-E., Knackstedt M.A.** Pore-scale characterization of carbonates using X-ray microtomography // SPE J., v. 10, № 4, 2005, p. 475—484.

**Ketcham R.A., Carlson W.D.** Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences // Comput. Geosci. Spec. Issue on Three-Dimensional Reconstruction, Modelling and Visualization of Geologic Materials, 2001, v. 27, № 4, p. 381—400.

**Peters E.J., Afzal N.** Characterization of heterogeneities in permeable media with computed tomography imaging // J. Pet. Sci. Eng., 1992, v. 7, p. 283—296.

**Saadat K., Rahimpour-Bonab H., Esfahani M.R., Vali J.** Empirical correlation for porosity deduction from X-ray computed tomography (CT) / Geopersia, 1(2), 2011, p. 47—54.

**Wellington S.L., Vinegar H.J.** X-ray computerized tomography // J. Petrol. Tech., 1987, v. 39, p. 885—898.

*Рекомендована к печати 21 октября 2014 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 4 сентября 2013 г.,  
после доработки — 29 мая 2014 г.*