

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.362

РЕГИСТРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ
ПОРОД НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

Е.Ю. ПОПОВ¹, Е.Г. САВЕЛЬЕВ²

*¹Сколковский институт науки и технологий,
143026, Россия, г. Москва, территория инновационного центра "Сколково", ул. Нобеля, д. 3;
e-mail: E.Popov@skoltech.ru*

*²Российский государственный геологоразведочный университет,
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; e-mail: 99sav@mail.ru*

Описана методика регистрации 2D вариаций тепловых свойств образцов горных пород при помощи метода оптического сканирования. Приведены результаты регистрации пространственных вариаций теплопроводности для образцов нескольких типов осадочных горных пород. В случае наличия тепловой анизотропии пород показано пространственное распределение коэффициента тепловой анизотропии. Установлено, что при наличии установленной связи теплопроводности с пористостью результаты оптического сканирования позволяют регистрировать 2D распределение пористости. Показано, что исследования пространственных вариаций теплопроводности обеспечивают более обоснованный отбор проб для последующих специальных петрофизических исследований.

Ключевые слова: теплопроводность; пространственное распределение; пористость; горные породы; оптическое сканирование.

REGISTRATION OF ROCK SAMPLES PROPERTIES SPATIAL VARIATIONS
WITH OPTICAL SCANNING METHOD

E.YU. POPOV¹, E.G. SAVELEV²

*¹Skolkovo Institute of Science and Technology
143026, Russia, Moscow, Skolkovo Innovation Center, Nobel street, 34; e-mail: E.Popov@skoltech.ru,*

*²Russian State Geological Prospecting University
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklay' street, 23, e-mail: 99sav@mail.ru.*

Technique of registration of 2D variations of the thermal properties of rock samples with the optical scanning method is described. Results of registration of spatial variations of the thermal conductivity for samples of several types of rocks are given. Spatial distribution of rock thermal anisotropy coefficient is shown for an anisotropic rock sample. It was established that 2D distribution of rock porosity can be obtained through correlation between thermal conductivity and porosity. It is shown that registration of spatial variations in thermal properties of full size core sample provides for more reasonable selection of an area of the core sample for following special petrophysical investigations.

Key words: thermal conductivity; spatial distribution; porosity; rocks; optical scanning.

Введение

Исследования неоднородности месторождений углеводородов занимают важное место в геолого-разведочных работах. Неоднородность пород изучается в различных масштабах: в достаточно крупном (несколько десятков сантиметров) при геофизических исследованиях скважин с применением разных видов каротажа, на уровне образцов полноразмерного и стандартного керна в лабораторных условиях, в масштабе микрон на малых пробах пород, размером в несколько миллиметров, с применением рентгеновской томографии. Все большее место в таких исследованиях занимают методы, позволяющие обеспечить непрерывную регистрацию пространственных вариаций свойств пород. К таким методам можно отнести скретч-тестирование [6], рентгеновский метод исследований полноразмерного керна, непрерывное профилирование электрического сопротивления и упругих свойств и др.

Для лабораторных теплофизических исследований горных пород разработан метод оптического сканирования (рис. 1), который обеспечивает непрерывное неразрушающее бесконтактное линейное профилирование тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности, объёмной теплоёмкости) на полноразмерном и стандартном кернах и других видах образцов пород [2, 4]. Доста-

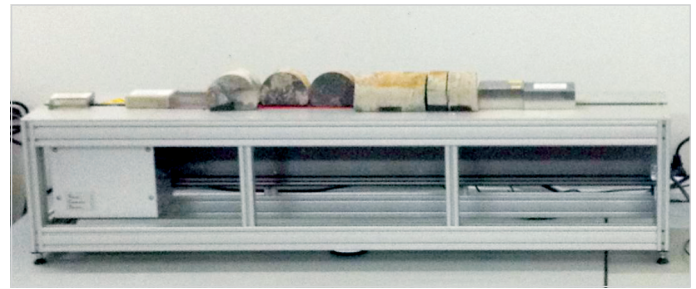


Рис. 1. Установка оптического сканирования для измерений комплекса тепловых свойств на полноразмерном кернах

точно высокое быстродействие этого метода позволяет перейти к регистрации $2D$ распределений тепловых свойств, включая коэффициент тепловой анизотропии. При наличии установленных тепловых свойств с другими физическими свойствами такая регистрация пространственных распределений тепловых свойств в пределах образца может быть использована для прогноза $2D$ вариаций других физических свойств.

Исследуемые образцы пород

Для экспериментальных исследований пространственных вариаций теплопроводности были отобраны три полноразмерных образца керна после

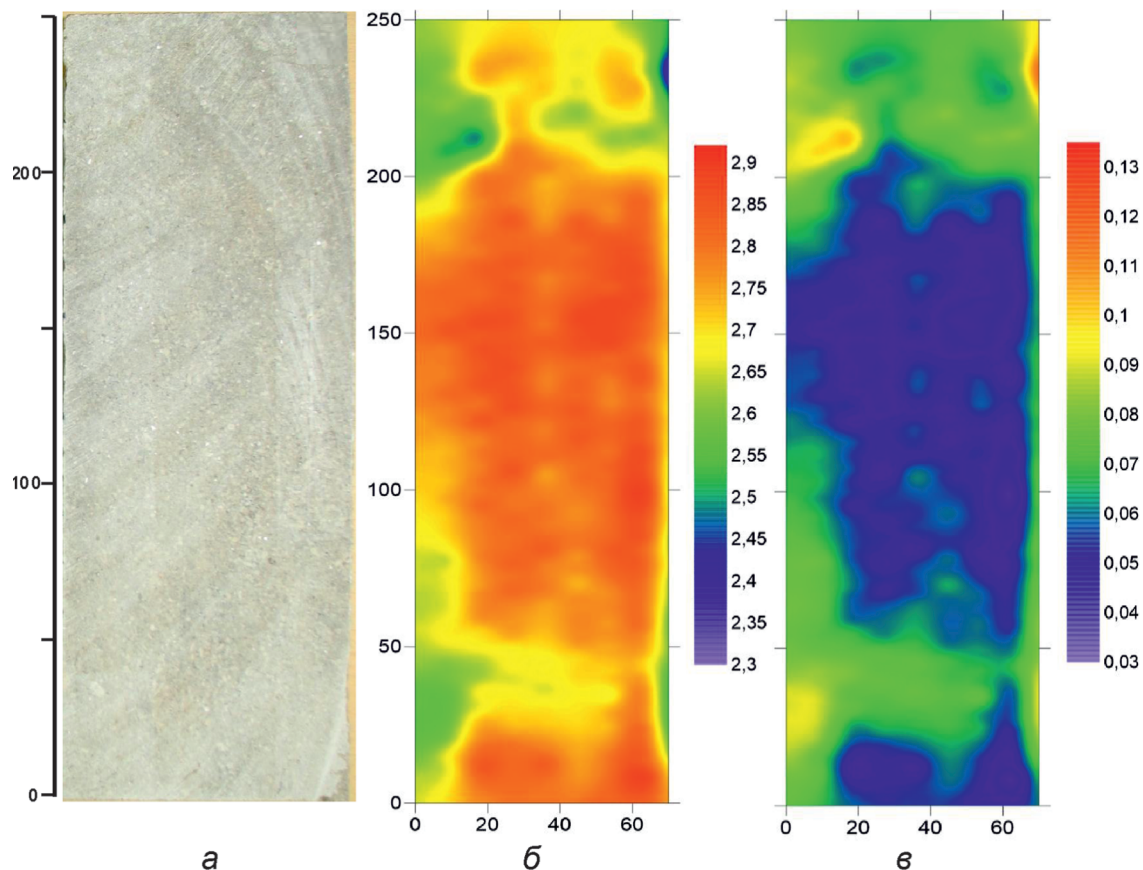


Рис. 2. Образец 1, известняк органогенно-детритовый: a – фотография образца; $б$ – распределение теплопроводности по образцу, Вт $\text{м}^{-1} \text{K}^{-1}$; $в$ – распределение по образцу коэффициента пористости

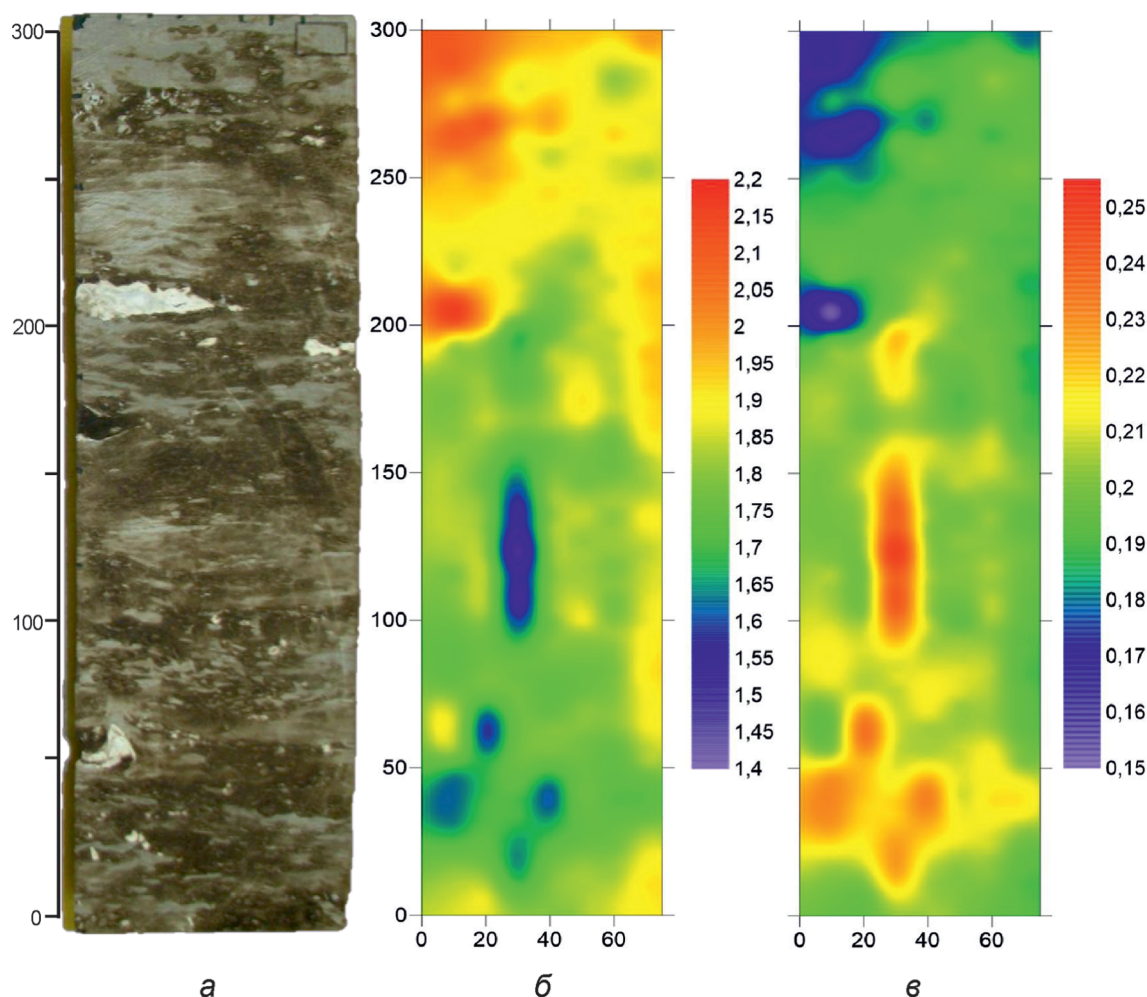


Рис. 3. Образец 2, известняк органогенно-детритовый, окремненный, серо-коричневого цвета: а — фотография образца; б — распределение теплопроводности по образцу, $\text{Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$; в — распределение по образцу коэффициента пористости

отделения от них малогабаритных дубликатов (так называемых горбушек или щёчек).

Ниже приводится описание изученных образцов пород.

Образец 1 (рис. 2, а). Известняк органогенно-детритовый светло-серого цвета. Текстура пятнистая, пористо-кавернозная, трещиноватая. Видимый органический детрит представлен обломками раковин (до 60 мм) и члениками криноидей (до 12 мм), редко обломками мшанок размером до 10 мм. Пористо-кавернозные участки немногочисленные, располагаются хаотично. Часть каверн залечена вторичным кальцитом.

Образец 2 (рис. 3, а). Известняк органогенно-детритовый окремненный серо-коричневого цвета, трещиноватый, слабо кавернозно-пористый, слабо неравномерно нефтенасыщенный. Текстура пятнистая, неясно слоистая, слабопористая, трещиноватая. Видимый органический детрит представлен члениками криноидей диаметром до

11 мм, цепочками мшанок, раковинами брахиопод (до 0,35 мм), гастропод и фораминифер (локально), кораллами. Немногочисленные поры и каверны, изометричной и удлинённой форм, диаметром до 14,0 мм, расположены неравномерно, развиваются вдоль трещин, а также связаны с органическим детритом. Часть пустот инкрустирована кристаллами кальцита. Нефтенасыщение слабое, неравномерное, по трещинам и порам.

Образец 3 (рис. 4, а). Песчаник тонкозернистый, слоистый. Слоистость обусловлена ориентированным расположением растительного детрита. Пористость неравномерная. В наиболее пористых участках порода пропитана нефтью.

Образцы керна 1 и 2 отобраны из коллекции полноразмерного керна, полученного из скважины Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Образец 3 отобран из коллекции полноразмерного керна скважины, пробуренной на территории Западной Сибири.

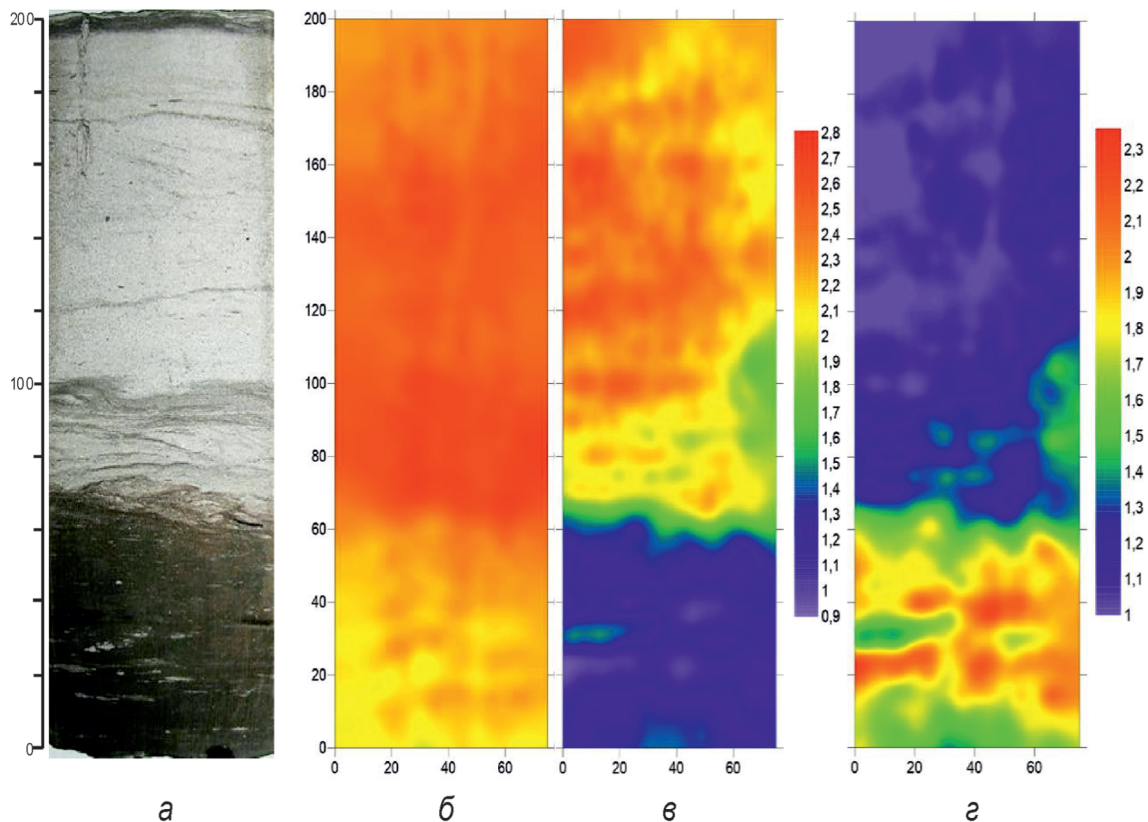


Рис. 4. Образец 3, песчаник тонкозернистый, слоистый: *а* — фотография образца; *б* — распределение параллельной компоненты тензора теплопроводности по образцу, Вт м^{-1} K^{-1} ; *в* — распределение перпендикулярной компоненты тензора теплопроводности по образцу, Вт м^{-1} K^{-1} ; *з* — распределение по образцу коэффициента анизотропии

Метод исследований

Для исследований пространственных вариаций теплопроводности образцов пород применялся метод оптического сканирования.

Он основан на сканировании двумя или более инфракрасными датчиками температуры плоской или цилиндрической поверхности образца твердого тела, нагреваемого концентрированным источником тепловой энергии (лазер инфракрасного диапазона или специальная электролампа), при этом датчики температуры и источник тепла жестко зафиксированы один относительно другого и перемещаются относительно изучаемого образца с постоянной скоростью [2, 4]. При сканировании обеспечиваются одновременные измерения теплопроводности и температуропроводности, что даёт возможность для определения объёмной теплоёмкости расчётным путём. Для специальных версий приборов оптического сканирования пространственная разрешающая способность при регистрации неоднородности пород составляет от 0,2 мм [5] и не превышает 0,5 мм даже для полевого варианта аппаратуры, предназначенного для теплового петрокаротажа с непрерывным профилированием теплопроводности и объёмной теплоёмкости по-

род на полноразмерном керне [3]. Случайная и систематическая погрешности измерений (при доверительной вероятности 0,95) составляют: 1,5 и 2 % для теплопроводности, 2 и 5 % для температуропроводности, 4 и 6 % для объёмной теплоёмкости. Скорость сканирования может быть выбрана в диапазоне 2—10 мм/с и обычно составляет 3—5 мм/с. Установка оптического сканирования для измерений комплекса тепловых свойств на полноразмерном керне приведена на рис. 1.

При изучении анизотропных пород с одноосной анизотропией, характерной для осадочных пород, осуществляют последовательное сканирование плоской поверхности образца породы в двух или трёх взаимно-перпендикулярных направлениях, в результате определяют главные значения тензора теплопроводности вдоль и поперёк напластования [1]. Измерения могут проводиться на сухих, водонасыщенных и нефтенасыщенных образцах полноразмерного и стандартного керна, а также на штуфных образцах с плоской поверхностью.

В процессе регистрации пространственных вариаций теплопроводности образцов 1—3 плоскую поверхность каждого из образцов сканировали вдоль параллельных линий, отстоящих одна от другой на расстояние 5 мм. После завершения ска-

нирования в одном направлении повторяли сканирование той же плоской поверхности образца в перпендикулярном направлении вдоль линий, также отстоящих одна от другой на 5 мм. Каждое сканирование обеспечивало регистрацию профиля теплопроводности и температуропроводности. Между сканированиями выдерживали паузу для выравнивания температуры образца после предыдущего измерения. Глубина слоя, характеризующего результаты измерений теплопроводности, составляла около 1,5 см.

Образцы керна 1 и 2 отбирались из коллекции полноразмерного керна скважины, для которой проводилось непрерывное профилирование теплопроводности для всех образцов полноразмерного керна методом оптического сканирования (тепловой петрокартаж). Для каждого образца керна по регистрируемому при тепловом петрокартаже профилю теплопроводности определяли среднюю теплопроводность. Для этой же скважины по результатам стандартного каротажа было получено распределение коэффициента пористости вдоль скважины. Для каждой из двух групп пород, которые представлены образцами 1 и 2, проводили анализ корреляционной связи между теплопроводностью образцов, усреднённой вдоль регистрировавшегося при тепловом картаже профиля теплопроводности для каждого образца керна, и коэффициентом пористостью. Данные теплового петрокартажа для теплопроводности усредняли в окне, равному интервалу глубин, соответствующему разрешающей способности метода определения коэффициента пористости (0,5 м). Результаты анализа

корреляционной связи между теплопроводностью и коэффициентом пористости использовали для интерпретации результатов регистрации вариаций теплопроводности для образцов 1 и 2.

Результаты измерений

На рис. 2, б приведены результаты регистрации распределения теплопроводности для образца 1. Хотя внешне образец представляется достаточно однородным (рис. 2, а), теплопроводность варьирует в достаточно широком диапазоне — от 2,3 до 2,9 Вт/(м К).

Измерения, проводившиеся при тепловом петрокартаже, показали, что образцы групп пород, представленных образцами 1 и 2, характеризуются отсутствием тепловой анизотропии.

На рис. 5 приведено поле корреляции между теплопроводностью и коэффициентом пористости для совокупности образцов данного типа пород. Высокий для данного объема выборки коэффициент корреляции (0,83) свидетельствует, что вариации теплопроводности для данной группы пород обусловлены главным образом изменениями пористости. Установленная тесная связь между теплопроводностью и пористостью позволяет использовать уравнение регрессии:

$$= -4,43 + 2,97 \text{ Вт/(м К)}, \quad (1)$$

где — теплопроводность, — коэффициент пористости, для преобразования результатов определения теплопроводности, представленных на рис. 2, б, в данные о коэффициенте пористости образца

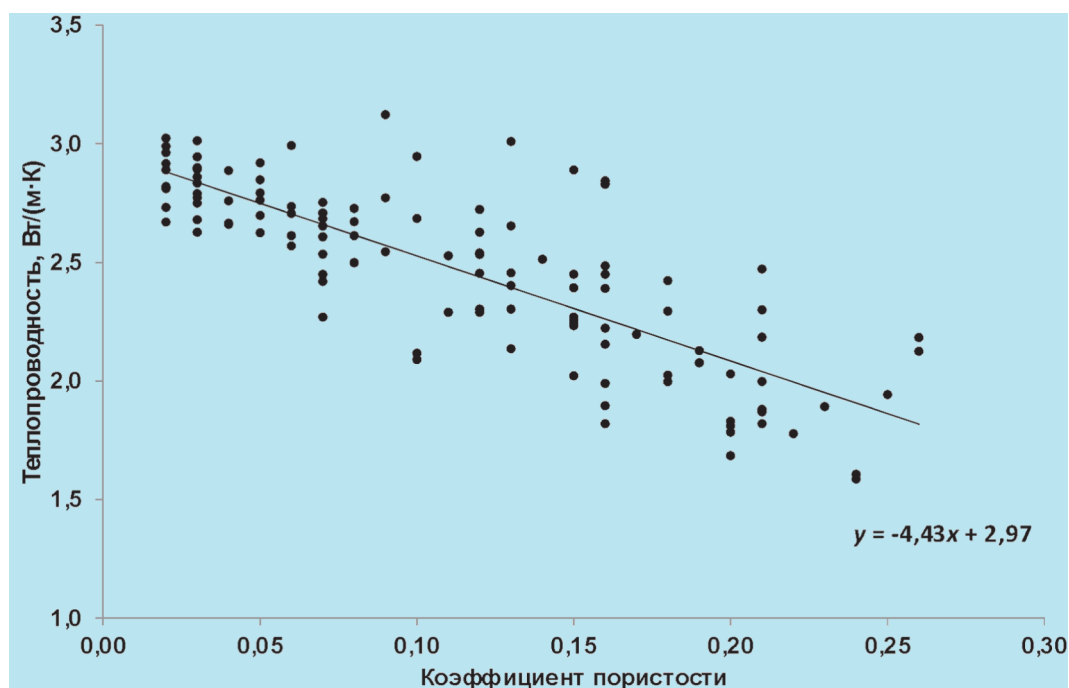


Рис. 5. Поле корреляции теплопроводности и пористости для органогенно-детритовых известняков, к которым принадлежит образец 1

(рис. 2, в). Полученные в результате такого преобразования данные о пространственных вариациях коэффициента пористости, приведённые на рис. 2, в, показывают, что пористость в пределах внешне однородного образца 1 изменяется в пределах от 0,03 до 0,13.

На рис. 3, б приведены результаты регистрации пространственных вариаций теплопроводности для образца 2. Как следует из рис. 3, б, теплопроводность образца изменяется от 1,4 до 2,2 Вт/(м К). Результаты корреляционного анализа для пород, представленных образцом 2, показали (рис. 6), что коэффициент корреляции между теплопроводностью и коэффициентом пористости составил 0,81. Это свидетельствует о том, что и для этой группы пород вариации теплопроводности обусловлены главным образом вариациями коэффициента пористости. При использовании уравнения регрессии

$$= -5,35 + 3,05 \text{ Вт/(м К)}, \quad (2)$$

связывающего изменения теплопроводности с коэффициентом пористости для пород, представленных образцом 2, получены данные о пространственных вариациях коэффициента пористости для образца 2 (рис. 3, в). В результате установлено, что коэффициент пористости изменяется в пределах образца от 0,15 до 0,25.

Данные о неоднородности и распределении коэффициента пористости в пределах образца полноразмерного керна могут представлять существенную значимость при выборе области образца

полноразмерного керна для последующего изготовления малых образцов для специальных исследований (стандартные петрофизические исследования, томография, измерения при пластовых термобарических условиях, пиролиз и др.).

На рис. 4 представлены результаты регистрации пространственных вариаций теплопроводности для образца 3. Установлено, что значительная часть образца 3 характеризуется существенной тепловой анизотропией. На рис. 4, б показаны данные, характеризующие теплопроводность вдоль напластования, которая варьирует от 2,0 до 2,8 Вт/(м К). Результаты регистрации теплопроводности в направлении поперек напластования, представленные на рис. 4, в, свидетельствуют, что для нижней части образца 3 отмечаются значения теплопроводности поперек напластования в диапазоне от 0,9 до 1,9 Вт/(м К), что значительно меньше теплопроводности вдоль напластования. На рис. 4, г показано пространственное распределение коэффициента тепловой анизотропии, определявшегося как отношение теплопроводности вдоль напластования к теплопроводности поперек напластования. Как следует из рис. 4, г, для нижней части образца 3 характерна высокая анизотропия с коэффициентом анизотропии от 1,5 до 2,3. Средняя часть образца характеризуется коэффициентом анизотропии в диапазоне 1,3–1,5. Верхняя часть образца является практически изотропной.

Проблема исследования анизотропии физических свойств пород остается актуальной в современной петрофизике. В практике петрофизических исследований обычно разделяют образцы пород на

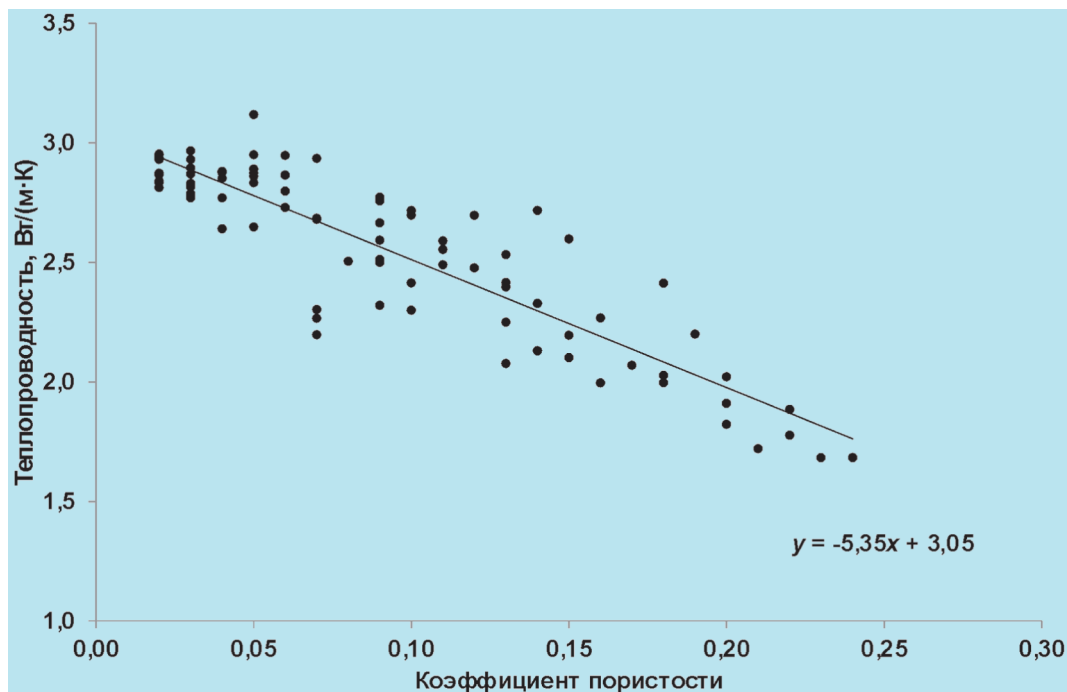


Рис. 6. Поле корреляции теплопроводности и пористости для органогенно-детритовых окремненных известняков, к которым принадлежит образец 2

изотропные и анизотропные. Вместе с тем полученные и приведённые на рис. 4, σ данные демонстрируют, что даже в масштабе нескольких сантиметров степень анизотропии может существенно изменяться.

Как и в случае с регистрацией распределения коэффициента пористости, информация о пространственных вариациях коэффициента анизотропии обеспечивает более обоснованный выбор области образцов полноразмерного керна для отбора малых образцов для последующих различных специальных петрофизических исследований.

Выводы

Применение метода оптического сканирования обеспечивает бесконтактные неразрушающие исследования пространственных вариаций тепловых свойств образцов полноразмерного керна, включая

регистрацию пространственных вариаций главных значений теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии.

При наличии установленных связей между теплопроводностью и коэффициентом пористостью данные о пространственных вариациях теплопроводности обеспечивают регистрацию $2D$ распределения пористости для изучаемых образцов.

Данные о неоднородности образцов пород и распределении коэффициента пористости и коэффициента анизотропии в пределах образца полноразмерного керна, получаемые в результате теплофизических исследований полноразмерного керна, позволяют осуществлять более обоснованный выбор области образца полноразмерного керна для последующего изготовления малых образцов для специальных исследований (стандартные петрофизические исследования, томография, измерения при пластовых термобарических условиях, пиролиз и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Ю.А., Мандель А.М. Геотермические исследования анизотропных горных массивов. Известия РАН // Физика Земли. 1998. № 34 (11). С. 30–43.
2. Попов Ю.А., Чехонин Е.М., Паршин А.В., Попов Е.Ю., Миклашевский Д.Е. Новая аппаратно-методическая база тепловой петрофизики как средство повышения эффективности добычи тяжелых нефтей // Нефть. Газ. Новации, 2013. №4. С.52–58.
3. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Сафонов С.С., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Герасимов И.В., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Результаты доизучения геологического строения пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения путем непрерывного теплофизического профилирования керна. [Электронный ресурс] // Сб. ст. конференции EAGE «Геомодель-2014», Геленджик, 2014, режим доступа: <http://earthdoc.eage.org>, дата обращения 30 августа 2015 г.
4. Chekhonin E., Parshin A., Pissarenko D., Popov Y., Romushkevich R., Safonov S., Spasennykh M., Chertentkov M., Stenin V. When rocks get hot: Thermal properties of reservoir rocks // Oilfield Review. 2012. N 24(3). P. 20–37.
5. Popov Yu., Parshin A., Chekhonin E.M., Popov E., Miklashevskiy D., Suarez-Rivera R., Green S. Continuous core thermal properties measurements and analysis. San Francisco, California, American Rock Mechanics Association, 2013, 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, V.4. P. 2991–2999, ARMA. 2013–391.
6. Suarez-Rivera R., Hakami A., Edelman E., Handwerker D., Gathogo P. Improving Geologic Core Descriptions and Heterogeneous Rock Characterization Via Continuous Profiles of Core Properties. Cartagena, Colombia, 2012. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 53rd Annual Logging Symposium, SPWLA-2012-236.

УДК 550.831+550.348

СИНХРОННЫЕ ПУЛЬСАЦИИ В НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ

Ю.В. АНТОНОВ, И.А. СИЗАСК

Воронежский государственный университет
394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1; e-mail: office@main.vsu.ru

Приведены результаты синхронных наблюдений вертикальной составляющей сейсмического поля в г. Воронеж (Россия) и неприливных вариаций силы тяжести в г. Бишкек (Кыргызстан). В гравитационном и сейсмическом полях наблюдаются пульсации. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести и сейсмического поля существуют синхронно в указанных пунктах. Частотные характеристики также синхронны и тождественны. Пульсации имеют периоды колебаний в пределах 0–20 мин. (преимущественно 8 мин.).

Ключевые слова: лунно-солнечные вариации силы тяжести; неприливные вариации силы тяжести; корональные выбросы масс; метеорные потоки; пульсации; вертикальная составляющая сейсмического поля.