

# Геофизика

УДК 553.98:552.578.2

## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ КЕРНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА

**Коровин Михаил Олегович,**

инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: korovinmo@hw.tpu.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью достижения максимальной выработки запасов по существующим месторождениям при увеличивающемся истощении запасов путём выбора наиболее оптимальной стратегии разработки.*

**Цель работы:** рассмотреть вопросы изучения пространственной анизотропии петрофизических свойств коллекторов лабораторными методами.

**Методы исследования:** Образцы подвергались температурному размагничиванию, и затем проводились измерения остаточной намагниченности с определением направления пространственной ориентировки керна. По ориентированным образцам были проведены пространственные измерения акустических и магнитных свойств. Дополнительные исследования по фотографическому сканированию отражают визуальное распределение изменения свойств и обстановок осадконакопления.

**Результаты:** Полученные результаты исследования показывают существующую корреляцию магнитных, акустических свойств и проницаемости образцов керна и позволяют предсказать направление улучшенной фильтрации. Выявлена зависимость между характеристиками строения породы и фильтрационно-ёмкостными свойствами пород-коллекторов.

**Ключевые слова:**

Анизотропия, проницаемость, магнитные свойства, акустические свойства, фотографическое сканирование, фактор Кёнигсбергера, лабораторные исследования керна.

Обломочные горные породы являются самыми распространёнными породами-коллекторами нефти и газа в Западной Сибири. Условия формирования таких пород определяют неоднородность строения коллектора, которая оказывает непосредственное влияние на величину, извлекаемость запасов и технологическую разработку месторождений [1, 2].

Наличие неравномерно ориентированных по азимуту неоднородностей в структуре пород обуславливают образование направлений, по которым отмечаются повышенные внутрислоевые и межслоевые перетоки углеводородов. Это подтверждается фактическими дебитами на разных месторождениях. Колебания значений дебитов, изменения режимов работы нагнетательных скважин, различия в фильтрационных свойствах пород – всё это также свидетельствует о существовании и непосредственном влиянии анизотропии свойств геологического разреза на величину проницаемости в зависимости от направления [3].

Анизотропия предопределяется ходом осадконакопления, последующими тектоническими воздействиями, процессами выщелачивания и карбонатизации [4].

В комплексе все эти факторы формируют неоднородность коллектора, и каждый из них в своей мере обуславливает упорядоченность текстурных и структурных особенностей пород-коллекторов, тем самым оказывая непосредственное влияние на физические свойства, и, естественно, на нефтеотдачу. Таким образом, для выбора наиболее эффективной системы разработки необходимо произвести учёт и оценку влияния анизотропии пород на технологию эксплуатации месторождений [3]. Для анализа неоднородностей необходимо проводить исследования на пространственно ориентированном керне. В этом случае возможно непосредственное определение фильтрационных свойств путём измерения проницаемости на специально выпиленных образцах. При подготовке экспериментальных образцов желательно заранее определить

направление петрофизической анизотропии. В настоящей работе рассматривается методология комплексной оценки петрофизических параметров, позволяющих решать эту задачу. Работы по изучению анизотропии проводились автором с последующей обработкой полученной информации и дополнительными расчётами в период с 2006 по 2013 гг. [5, 6].

Последовательность решения проблемы представляется следующей:

1. Восстановление ориентировки зерна является первым этапом при оценке анизотропии и представляет собой азимутальное распределение улучшенных коллекторских свойств образца зерна, извлечённого из продуктивного пласта.
2. Анализ петрофизических параметров, отражающих общую анизотропию коллектора.
3. Сопоставление полученных данных с геологическими особенностями пород коллекторов и фильтрационными свойствами [7].

Количественную оценку величины и направления анизотропии проницаемости представляется возможным определить с помощью исследований зерна, геофизических исследований скважин, а также гидродинамических исследований. В дополнение необходимо использовать петрофизические параметры, которые позволяют выделить векторные изменения свойств пород [3, 8].

Таких дополнительных характеристик три: магнитные, акустические, электрические. Из них активно используются только две: магнитные (остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость) и акустические, как наиболее легко реализуемые [3].

Для решения первой задачи целесообразно применить палеомагнитный метод. В основу ориентации изучаемых образцов зерна относительно сторон света положена их остаточная намагниченность. Известно, что породы земной коры обладают намагниченностью, обусловленной направлением магнитного поля Земли, которое существовало во времена образования породы. Она связана с географическим положением древнего магнитного полюса. Остаточная намагниченность (естественная) позволяет выполнить ориентирование зерна в пространстве с применением палеомагнитной технологии, а магнитная восприимчивость, в свою очередь, характеризуется свойством анизотропии, которая также зависит от порядка строения магнитных частиц при осадконакоплении и формировании скелета породы. Соответствующие подходы позволяют избежать многочисленного выбуривания уменьшенных образцов зерна для проведения лабораторных исследований, снижая тем самым стоимость определения направления анизотропии [3, 9].

При применении *палеомагнитной* ориентации зерна используются два способа:

1. Определение направления компонента естественной остаточной намагниченности, который характеризует первоначальную намагниченность образца.

Для её определения необходимо с помощью временного магнитного поля и температуры разрушить накопленную намагниченность образца за время его существования [2, 4]. При сопоставлении направления древнего магнитного поля и направления стабильного компонента можно определить первоначальную ориентировку образца (рис. 1). В соответствии с этим способом для образца зерна необходимо знать ориентировку зерна «верх-низ» относительно оси скважины и возраст пород. Способ находит применение при проверке сходимости полученных результатов [9].

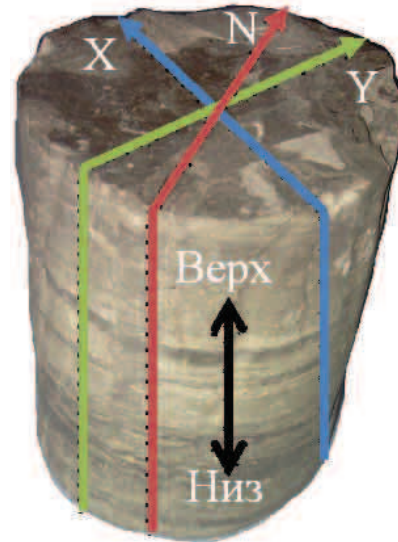


Рис. 1. Применение метода палеомагнитного ориентирования: X, Y, Z – система координат образца зерна, N – вязкая намагниченность расчётной плоскости магнитного меридиана

2. При проведении второго способа используется направление не первичной, а вторичной (вязкой) намагниченности, которая была накоплена породой во время воздействия геомагнитного поля после последней инверсии (в течение последних 780 тысяч лет). Направление этого компонента должно отражать направление современного поля в точке проведения измерений.

Так как этот компонент менее стабилен, то его можно отделить в результате постепенного размагничивания переменным магнитным полем или температурой. При сопоставлении направлений современного геомагнитного поля и вязкой составляющей намагниченности представляется возможным определить ориентировку образца во время его формирования. В этом случае не обязательно знать, как образец располагался в вертикальном разрезе (достоверность расположения кровли и подошвы), так как современная полярность магнитного поля известна. Способ находит применение при ориентации образцов зерна [2].

Компонентный состав намагниченности изучаемых образцов определялся в процессе ступенчатого терморазмагничивания в экранированной печи

системы В.П. Апарина. Измерения производились на астатическом магнитометре МАЛ-036. Интерпретация результатов проводилась с помощью пакета стандартных программ.

В результате в большинстве случаев выделяют следующие температурные диапазоны, при которых разрушается намагниченность:

- 1) малых температур (до 80...120 °С);
- 2) средних температур (от 80 до 160...200 °С);
- 3) высоких температур (выше 200 °С).

Наибольший интерес для магнитного ориентирования керна представляет среднетемпературный компонент, потому что современное геомагнитное поле по направлению совпадает с измеряемым компонентом, называемым вязкой намагниченностью [2].

Проверка точности используемой методики ориентирования, проведенная на образце керна Оренбургского месторождения, отобранного с помощью специального керноотборного снаряда и имеющего механическую отметку «север-юг», показала весьма близкое совпадение результатов (различие не превысило 2 %) [2].

Лабораторное определение остаточной намагниченности и является инструментом для пространственного ориентирования образцов керна, причем не только по отношению положения древнего магнитного полюса, но и по отношению к его современному местонахождению. Для непосредственного измерения используются как полноразмерные, так и выпиленные из керна (перпендикулярно напластованию) образцы цилиндрической формы высотой 22 мм и диаметром 25,4 мм. Упомянутые образцы являются смежными с теми, что служат для изучения упруго-деформационных свойств: нанесенная на них условная линия со стрелкой является общей. Упомянутая линия служит условно выбранным направлением оси «х», к которой привязываются при исследовании оси главных напряжений и их азимут [2, 10].

Подготовленные образцы в течение 10–15 суток выдерживаются «по полю» (нанесенную на цилиндр стрелку направляли на север). Таким образом, снимается «лабораторная» намагниченность, полученная в результате транспортировки, хранения и обработки исходных кернов.

Для проведения исследований *акустическими* методами применялся ультразвуковой прибор УК-14П. Рассмотрим устройство и принцип работы прибора.

Прибор реализует ультразвуковой импульсный метод с отдельным вводом в материал и последующим приемом прошедших через него УЗК.

При двухстороннем доступе к изделию с помощью излучающего и приёмного преобразователей осуществляется сквозное прозвучивание, при одностороннем доступе прозвучивание осуществляется путем установки преобразователей на одной поверхности. В приборе предусмотрены два режима работы. В одном режиме работы прибор автоматически измеряет время, требуемое переднему

фронту ультразвукового импульса для прохождения через материал образца, в соответствии с которым происходит расчёт скорости акустических волн. В другом режиме работы прибор измеряет длительность фронта первой полуволны принятого ультразвукового импульса.

Этапы проведения работы заключались в определении пространственной анизотропии с поворотом цилиндрического образца через каждые 22,5°. Принципиальная схема измерения – на рис. 2.

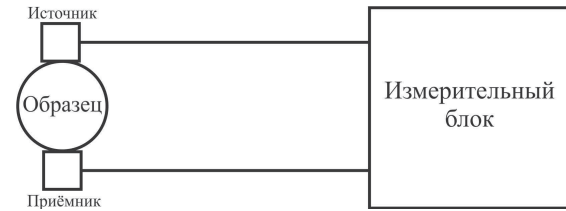


Рис. 2. Схема снятия показаний с помощью прибора УК-14П

С помощью прибора были получены следующие параметры (таблица).

Таблица. Параметры акустических измерений

Параметр	Расшифровка	Формула
$t$	Время прохождения ультразвуковой волны от источника до приёмника через образец	–
$\tau$	Длительность фронта ультразвуковой волны	–
$v$	Скорости прохождения ультразвуковых колебаний по формуле	$v=10^4/t$ , $l$ – ширина образца
$K$	Коэффициент анизотропии	$K=v_{\max}/v_{\min}$

Измерения анизотропии магнитной восприимчивости производилось на астатическом магнитометре МАЛ-036 путём последовательных поворотов и измерений образцов в равноудалённом положении.

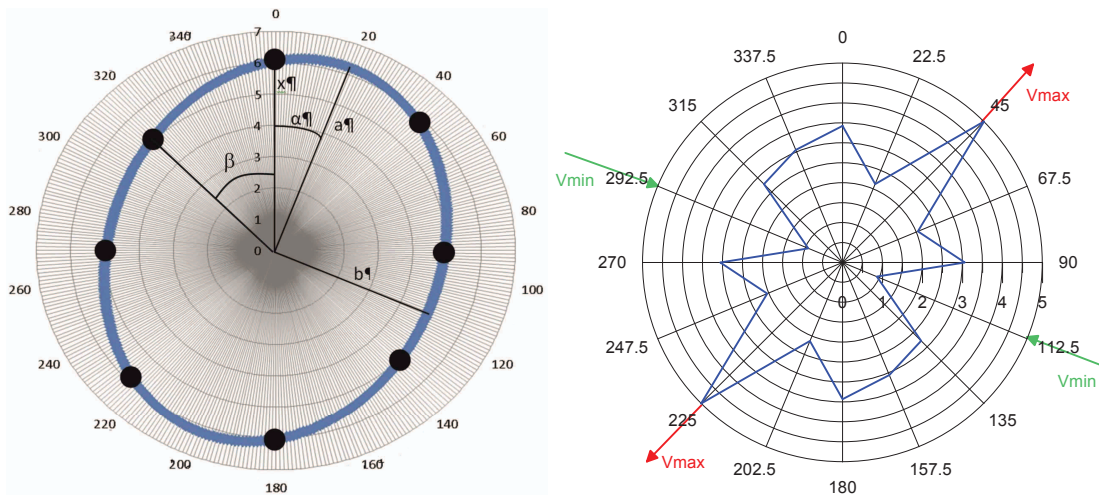
В качестве результатов по *магнитным* исследованиям автором была выведена формула расчёта направления наилучшего изменения магнитной анизотропии. Эллиптическая модель наилучшим образом подходит для описания характера влияния анизотропии.

$$\sin^2(\beta - \alpha) \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2}\right) = \frac{1}{x^2} - \frac{1}{a^2},$$

где  $a$  – значение большой полуоси эллипса;  $b$  – значение малой полуоси эллипса;  $\beta$  – угол, соответствующий точке с экспериментальными данными;  $x$  – расчётное значение;  $\alpha$  – угол, соответствующий углу наклона главной оси эллипсоида.

Разработанный и опробованный алгоритм позволяет при наличии одних только экспериментальных данных и соответствующих им углов определять направление индуктивной намагниченности керна и строить эллиптическую модель магнитной восприимчивости с удовлетворительной точностью.



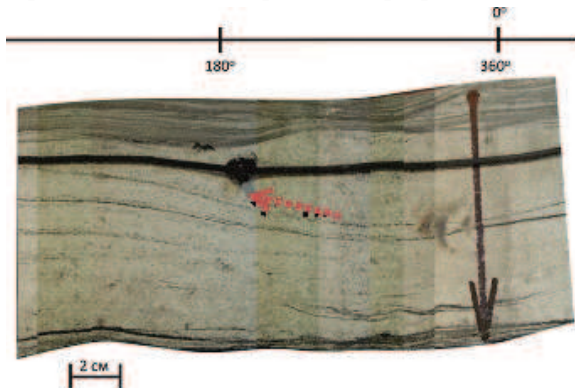


**Рис. 3.** Сопоставление результатов магнитных ( $a$  – значение большой полуоси эллипса;  $b$  – значение малой полуоси эллипса;  $\beta$  – угол, соответствующий точке с экспериментальными данными;  $x$  – расчётное значение;  $\alpha$  – угол, соответствующий углу наклона главной оси эллипсоида) и акустических (зависимость скорости ультразвуковых колебаний от угла с вычитанием константы скорости) методов

Пространственная ориентировка керна в совокупности с эллиптической моделью однозначно выделяет упорядоченность структурных особенностей пород и анизотропию магнитных и упругих свойств в системах координат (географическая, магнитная).

В качестве результатов по **акустическим** методам рассчитывалась зависимость скорости УЗК от угла с вычитанием константы скорости (рис. 3). Дополнительным критерием оценки достоверности расчётов было сравнение результатов по магнитным и акустическим методам (рис. 3).

Для получения геологической информации из образца керна применяется фотосканирование и формирование фоторазвертки поверхности образца керна. На рис. 4 отчётливо видны следы слоистости, указывающие на направление изменения условий осадконакопления. На основании этих данных можно дать количественную оценку элементов залегания слоистости и трещиноватости (при её наличии). При большем количестве образцов керна можно более полно представить картину осадконакопления и определить направление улучшения коллекторских свойств в интересующем разрезе.



**Рис. 4.** Фоторазвертка образца керна (изменение направления слоистости)

Модель исследования неоднородности базируется на петрофизических измерениях керна материала. Это позволяет применить изменения магнитных свойств при учёте анизотропии проницаемости. На рис. 5, 6 показаны зависимости проницаемости от фактора Кёнигсбергера (отношение остаточной намагниченности к индуцированной). На графиках отображена высокая корреляция данных, а это свидетельствует о наличии связи магнитной анизотропии с фильтрационной.

#### Выводы

1. Факты наличия анизотропии горных пород констатируются результатами магнитных и акустических измерений.
2. Различие анизотропных показателей для водонасыщенных и нефтенасыщенных пород свидетельствует о том, что анизотропия влияет на показания акустических методов. Вполне вероятно, это происходит из-за того, что нефть является сжимаемой жидкостью, а вода – нет.
3. Между пористостью, проницаемостью и средней скоростью прохождения упругой волны существует корреляционная связь.
4. Тип пористости не влияет на анизотропию магнитно-акустических свойств породы.
5. Согласно результатам, проведённым по анализируемой выборке, магнитная анизотропия существует наряду с анизотропией проницаемости, следовательно, оценить изменение проницаемости можно с помощью измерения анизотропии магнитной восприимчивости. Однако необходимо провести более обширные исследования и выяснить причину этого явления.
6. Метод фотографического сканирования керна позволяет качественно и количественно оценить направление изменения свойств и элементов залегания слоистости.

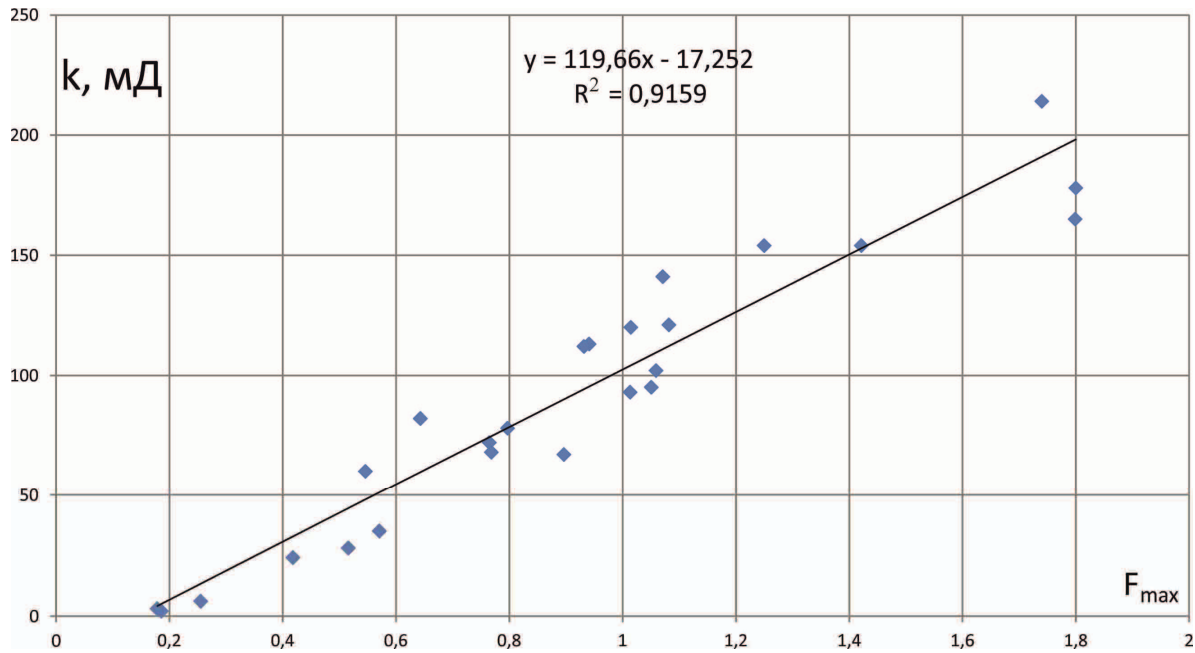


Рис. 5. Взаимосвязь магнитных и пластовых свойств ( $k$  – проницаемость;  $F_{\max}$  – максимальный фактор Кёнигсбергера)

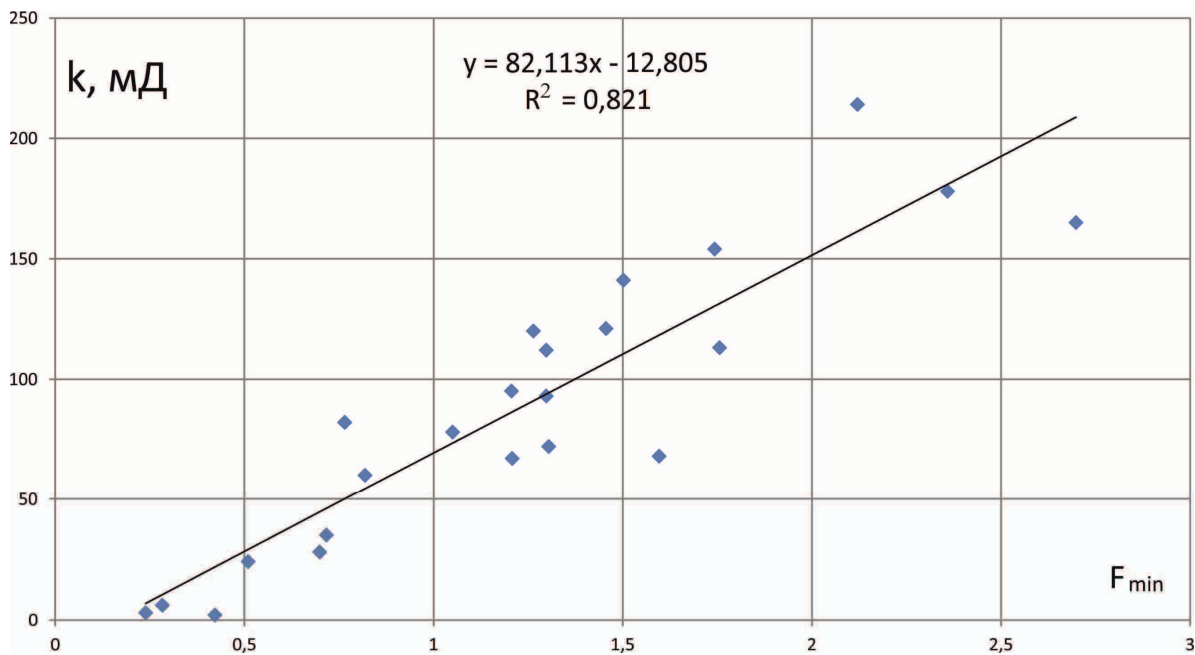


Рис. 6. Взаимосвязь магнитных и пластовых свойств ( $k$  – проницаемость;  $F_{\min}$  – минимальный фактор Кёнигсбергера)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрофизика: справочник: в 3 кн. Кн. 1. Горные породы и полезные ископаемые / Н.Б. Дортман и др. / под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1992. – 390 с.
2. Семёнов В.В., Казанский А.Ю., Банников Е.А. Изучение анизотропии горных пород на керне и её ориентация в пространстве палеомагнитным методом // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 1. – С. 18–23.
3. Усманов Р.Х., Талипов И.Ф., Азаматов М.А. Исследование направлений фильтрации и флюидомиграции при разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами УВ // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 1. – С. 63–66.
4. Злобин А.А., Лебедев С.В., Юшков И.П. Определение осей анизотропии пустотного пространства горных пород // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 66–70.
5. Korovin M. Investigation of the Acoustic and Petromagnetic Anisotropy of Oil Fields Rocks // 75<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC. London 2013. Extended abstract. Publication date: 10.06.2013. URL: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=68815> (дата обращения: 30.09.2013).

6. Korovin M. Investigation of the Spatial Heterogeneity Petromagnetic Properties of Oil Fields Rocks // 73<sup>rd</sup> EAGE Conference & Exhibition, Extended abstract. Vienna, 2011. Publication date: 23.05.11. URL: <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=50945> (дата обращения: 30.09.2013).
7. Методика и результаты изучения анизотропии верхнеюрских коллекторов (на примере Крапивинского месторождения углеводородов) / Д.В. Александров, В.П. Меркулов, Л.А. Краснощекова, Т.Е. Мартынова, Ю.Я. Ненахов // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 114–119.
8. Меркулов В.П., Краснощекова Л.А. Исследование пространственной литолого-петрофизической неоднородности продуктивных коллекторов месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 296–303.
9. Храмов А.Н., Шолпо Л.Е. Палеомагнетизм. Принципы, методы и геологические приложения палеомагнитологии. – Л.: Недра, 1967. – 252 с.
10. Петрофизика: Справочник. В 3 кн. Кн. 2. Техника и методика исследований / под ред. А.А. Молчанова, Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1992. – 256 с.

Поступила 14.10.2013 г.

UDC 553.98:552.578.2

## SPECIAL CORE ANALYSIS TO STUDY OIL AND GAS RESERVOIR ANISOTROPY

Mikhail O. Korovin,

Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: korovinmo@hw.tpu.ru.

**Relevance of the work** is caused by the need to maximize production of reserves from existing fields with increasing depletion by selecting the most appropriate development strategy.

**Objective:** To consider the study issues of the spatial anisotropy of reservoir petrophysical properties by the laboratory methods.

**Methods:** The samples were subjected to thermal demagnetization, and then the residual magnetization was measured to determine the direction of core spatial orientation. Spatial measurements of acoustic and magnetic properties were carried out by the oriented samples. Additional research on the photographic scanning reflects visual distribution of changes in sedimentary properties and environments.

**Results:** The obtained results show the significant correlation of magnetic and acoustic properties and permeability of the core samples and allow predicting the direction of improved filtering. The author found out the relationship between rock structure characteristics and permeability and porosity of reservoir rocks.

### Key words:

Anisotropy, magnetic properties, acoustic properties, photographic scanning, Koenigsberger factor, laboratory core analysis.

### REFERENCES

1. Dortman N.B. *Petrofizika: spravochnik. Gornye porody i poleznye iskopaemye* [Petrophysics: handbook. Rocks and minerals]. Moscow, Nedra, 1992. 390 p.
2. Semyonov V.V., Kazanskiy A.Yu., Bannikov E.A. Izuchenie anizotropii gornyykh porod na kerne i ee orientatsiya v prostranstve paleomagnitnym metodom [Study of the anisotropy of rocks at the core and its orientation in space paleomagnetically]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeni*, 2008, no. 1, pp. 18–23.
3. Usmanov R.Kh., Talipov I.F., Azamatov M.A. Issledovanie napravleniy filtratsii i flyuidomigratsii pri razrabotke mestorozhdeniy s trudnoizvlekaemymi zapasami UV [Study the directions of filtering and fluid migration at mining stocks with hard hydrocarbons]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeni*, 2009, no 1, pp. 63–66.
4. Zlobin A.A., Lebedev S.V., Yushkov I.R. Opredelenie osey anizotropii pustotnogo prostranstva gornyykh porod [Determination of the anisotropy axes of the void space rocks]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeni*, 2008, no. 8, pp. 66–70.
5. Korovin M. *Investigation of the Acoustic and Petromagnetic Anisotropy of Oil Fields Rocks // 75<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. London 2013. Extended abstract. Publication date: 10.06.2013. Available at: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=68815> (accessed 30.09.2013).
6. Korovin M. *Investigation of the Spatial Heterogeneity Petromagnetic Properties of Oil Fields Rocks // 73<sup>rd</sup> EAGE Conference & Exhibition, Extended abstract*. Vienna, 2011. Publication date: 23.05.11. Available at: <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=50945> (accessed 30.09.2013).
7. Aleksandrov D.V., Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A., Martynova T.E., Nenakhov Yu.Ya. Metodika i rezultaty izucheniya anizotropii verkhneyurskikh kolektorov (na primere Krapivinskogo mestorozhdeniya uglevodorodov) [The methodology and results of a study of the Upper Jurassic reservoir anisotropy (by the example of Krapivinskoye hydrocarbon deposit)]. *Geofizicheskie metody pri razvedke neдр i ekologicheskikh issledovaniyakh* [Geophysical methods in exploration of mineral resources and environmental studies]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2003. pp. 114–119.
8. Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A. Issledovanie prostranstvennoy litologo-petrofizicheskoy neodnorodnosti produktivnykh kolektorov mestorozhdeniy nefi i gaza [Investigation of the spatial heterogeneity of lithologic and petrophysical productive reservoirs of oil and gas]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no 6, pp. 296–303.
9. Hramov A.N., Sholpo L.E. *Paleomagnetizm. Printsipy, metody i geologicheskie prilozheniya paleomagnitologii* [Paleomagnetism. Principles, methods and geological applications of paleomagnetology]. Leningrad, Nedra, 1967. 252 p.
10. Dortman N.B. *Petrofizika: spravochnik. Tekhnika i metodika issledovaniy* [Petrophysics: handbook. Technology and research methods]. Moscow, Nedra, 1992. 256 p.