

# Применение метода ядерных функций для оценки пространственной анизотропии 2-мерных данных и решения задач картопостроения в программном комплексе DV-Geo

**М.В. Перепечкин**

кандидат технических наук, начальник отдела поддержки и развития систем компьютерного моделирования месторождений<sup>1</sup> dv\_pererepechkin@cge.ru

**И.А. Глобенко**

аспирант<sup>2</sup>, инженер отдела поддержки и развития систем компьютерного моделирования месторождений<sup>1</sup> iaglobenko@cge.ru

<sup>1</sup>ОАО «ЦГЭ», Москва, Россия  
<sup>2</sup>МГРИ-РГГРУ, Москва, Россия

**В статье описана методика картопостроения с определением и учетом пространственной анизотропии данных. Учет анизотропии происходит на основе методики ядерных функций. Предложен алгоритм, реализующий эту методику в программном комплексе DV-Geo.**

**Материалы и методы**

Геолого-геофизические данные по месторождениям. Метод ядерных функций, интерполяция, кригинг.

**Ключевые слова**

геологическое моделирование, анизотропия, ядерные функции, DV-Geo, ЦГЭ

Рассматривается задача построения карт структурных горизонтов, эффективных и общих мощностей, параметров ФЕС по набору данных с пространственной анизотропией. Как правило, при построении карт оценка пространственной анизотропии происходит экспертно и вносится в метод интерполяции извне, а геологическое строение объекта и история его формирования подсказывают направление пространственной анизотропии. Однако, во-первых, эта процедура не может быть формализована. Во-вторых, параметры анизотропии задаются глобально для всей области, и не учитывают возможных изменений внутри неё. Желательно иметь формальные методы оценки пространственной анизотропии, которые можно встроить непосредственно в алгоритм картопостроения, а также оценить анизотропию не по всей области — а локально для заданной точки моделируемого объекта. Одним из таких методов оценки анизотропии данных является метод ядерных функций. Метод ядерных функций позволяет просто реализовать адаптацию к возможному изменению свойств данных — выбор параметров интерполятора происходит в скользящей окрестности точки с помощью метода перекрестной проверки. Ядерные функции содержат параметризованную анизотропию, поэтому параллельно процедуре сглаживания и интерполяции данных производится оценка параметров анизотропии.

Рассмотрим используемый при картопостроении алгоритм:

1. Построим регулярную сетку.
2. Для каждой точки регулярной сетки

найдем ближайшие точки данных.

3. Методом ядерных функций, используя данные по ближайшим точкам, и метод скользящего контроля определим параметры анизотропии данных для каждой точки регулярной сетки.
4. Используя полученные параметры анизотропии, вычислим значение в каждой точке регулярной сетки и построим искомую карту. Построение карты возможно как методом ядерных функций, так и кригингом или методами, основанными на обратных расстояниях.

Теперь опишем используемый метод ядерных функций с применением математического аппарата:

Пусть  $(x_\alpha, y_\alpha, Z_\alpha)$ ,  $\alpha=1, \dots, n$  — результаты измерения некоторого случайного 2-мерного поля  $Z(x, y)$  в точках  $(x_\alpha, y_\alpha)$  нерегулярной сети измерений, например скважинные данные по моделируемому параметру. Пусть  $(x_c, y_c)$  — координаты точки, в которой мы хотим оценить значение  $\hat{Z}(x_c, y_c)$  поля. Поместим координаты точек  $(x_c, y_c)$  в узлы регулярной сетки. Найдя значение в каждой точке, мы сможем построить карту.

Выбираем множество  $V_m(x_c, y_c)$  ближайших точек  $(x_\alpha, y_\alpha)$  к исследуемой точке  $(x_c, y_c)$ , где  $m$  — число ближайших точек.

Ядерная оценка значения в точке  $(x_c, y_c)$  задается формулой ([1]):

$$\hat{Z}(x_c, y_c, | \theta) = \frac{\sum_{\alpha \in V_m(x_c, y_c)} Z_\alpha \cdot \Phi(x_c - x_\alpha, y_c - y_\alpha, | \theta)}{\sum_{\alpha \in V_m(x_c, y_c)} \Phi(x_c - x_\alpha, y_c - y_\alpha, | \theta)} \quad (1)$$

	R min*	R max**	R отн^	Угол^^
Исходная карта	1000.00	6000.00	0.1666	110.00
<b>Определенные параметры анизотропии по разной выборке точек</b>				
635 точки	—	—	0.2837	110.79
91 точки	—	—	0.1487	109.33
29 точки	—	—	0.1690	111.45

Табл. 1 — Сильно выраженная анизотропия

	R min*	R max**	R отн^	Угол^^
Исходная карта	3000	4000	0.75	135
<b>Определенные параметры анизотропии по разной выборке точек</b>				
635 точки	—	—	0.6354	139.42
91 точки	—	—	0.6081	140.41
29 точки	—	—	0.7175	32.01

Табл. 2 — Случай с менее выраженной анизотропией

\* Минимальный радиус вариограммы. \*\* Максимальный радиус вариограммы. ^ Отношение минимального радиуса к максимальному. ^^ Угол между направлением максимального радиуса и направлением запад-восток

	R min*	R max**	R отн^	Угол^^
Исходная карта	2000	2000	1	-
<b>Определенные параметры анизотропии по разной выборке точек</b>				
635 точки	-	-	0.9259	115.53
91 точки	-	-	0.8808	90.73
29 точки	-	-	0.8469	129.39

Табл. 3 — Изотропный случай

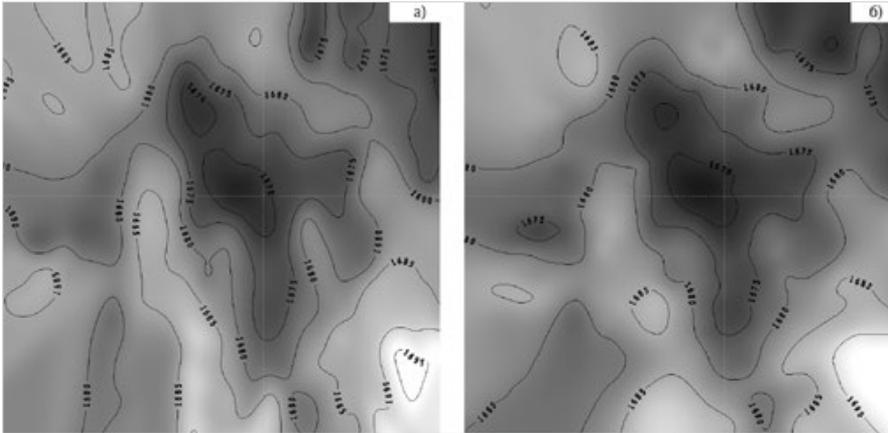


Рис. 1 — Трендовая поверхность, рассчитанная методом ядерных функций (а) и адаптивного метода скользящего среднего [3] с большим параметром сглаживания (б)

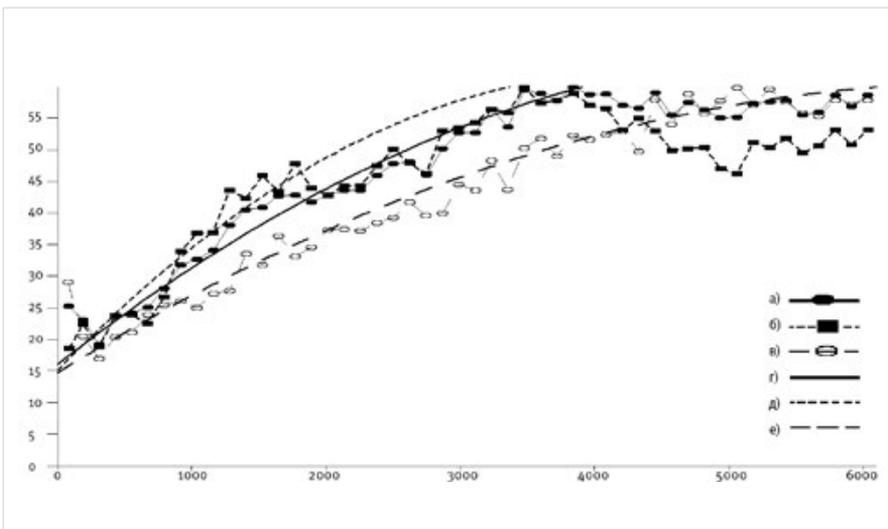


Рис. 2 — Экспериментальные вариограммы без учета анизотропии (а) и с учетом анизотропии для минимального (б) и максимального радиуса (в). Модели вариограмм без учета анизотропии (г) и с учетом анизотропии для минимального (д) и максимального радиуса (е).

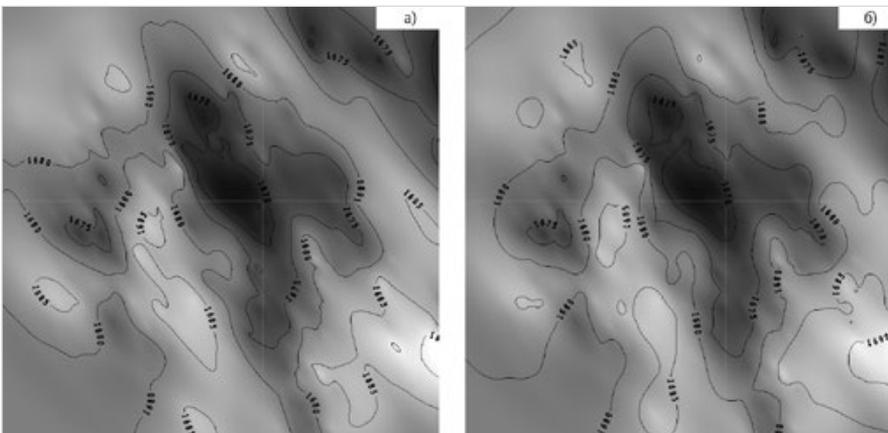


Рис. 3 — Кривая горизонта рассчитанная методом кригинга с учетом (а) и без учета (б) анизотропии направленной под углом 134°

В качестве ядра осреднения возьмем анизотропную Гауссовскую функцию:

$$\Phi(x, y | \Theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \cdot \exp(-Q(x, y | \Theta) / 2), Q(x, y | \Theta) = x^2 \left( \frac{\sin^2 \varphi}{\sigma_1^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{\sigma_2^2} \right) + y^2 \left( \frac{\sin^2 \varphi}{\sigma_1^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{\sigma_2^2} \right) + 2xy \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \left( \frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \quad (2)$$

$$\Theta = (\sigma_1, \sigma_2, \varphi); \quad 0 < \sigma_2 \leq \sigma_1; \quad 0 \leq \varphi \leq \pi$$

Здесь  $(\sigma_1, \sigma_2)$ ,  $0 < \sigma_2 \leq \sigma_1$  — длины полуосей 2-мерного эллипса рассеяния. Параметр  $0 \leq \varphi \leq \pi$  есть угол между направлением главной оси эллипса рассеяния и осью X.

Рассмотрим ядерную оценку для точки  $(x_p, y_p)$ , принадлежащей множеству  $V_m(x_c, y_c)$ , используя информацию из других точек наблюдения, принадлежащих тому же множеству:

$$\hat{Z}_{(x_p, y_p)}^{(m)}(x_p, y_p | \Theta) = \frac{\sum_{(x_u, y_u) \in V_m(x_c, y_c)} Z_u \cdot \Phi(x_u - x_p, y_u - y_p | \Theta)}{\sum_{(x_u, y_u) \in V_m(x_c, y_c)} \Phi(x_u - x_p, y_u - y_p | \Theta)} \quad (3)$$

Применив полученную оценку ко всем точкам множества  $V_m(x_c, y_c)$ , мы можем вычислить функцию рассогласования для вектора  $\Theta$  и оценить его компоненты из решения задачи на минимум[2]:

$$\sum_{(x_p, y_p) \in V_m(x_c, y_c)} |\hat{Z}_{(x_p, y_p)}^{(m)}(x_p, y_p | \Theta) - Z_p|^2 \rightarrow \min_{\Theta} \quad (4)$$

После минимизации получим угол  $\varphi$  и отношение минимального радиуса к максимальному  $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ . Важно отметить, что полученные радиусы и радиус вариограммы это не одно и то же, и они будут отличаться. Однако, отношение радиусов при вариограммном анализе и оценке ядерных функций близко. Ядерная оценка не использует вариограмму для оценки параметров анизотропии, оценка происходит подбором параметров ядра. Полученный угол и отношение можно использовать при интерполяции как самим методом ядерных функций, так и при вариограммном анализе для кригинга или методами, основанными на обратных расстояниях.

С помощью метода ядерных функций возможно оценить как глобальные параметры анизотропии по всей области (взяв за число ближайших все точки), так и локальные параметры определив количество ближайших точек или радиус в котором следует производить оценку.

Для оценки работоспособности выбранного подхода с помощью метода стохастической симуляции построим несколько карт с заданной, заранее известной степенью анизотропии, взяв в качестве параметра, вариограммы с разными радиусами в двух взаимно перпендикулярных направлениях. И выбрав из них в произвольных точках значения, на которых в дальнейшем будем выполнять тестирование нашего метода.

Зададим три варианта распределения данных с разной выраженностью пространственной анизотропии: сильно выраженная анизотропия (табл. 1), средне выраженная анизотропия (табл. 2), и изотропный случай (табл. 3). Создадим для каждого варианта несколько выборок случайных точек, на которых предлагаемым методом оценим пространственную анизотропию.

Направление сильно выраженной анизотропии хорошо определяется на любом числе точек (табл. 1), определение отношения радиусов сильно от взаимного расположения точек. При менее выраженной анизотропии с

уменьшением числа точек качество определение параметров анизотропии падает, при 29 точках данных возможно неверное определение угла (табл. 2). При изотропной среде, определяемое отношение максимального радиуса к минимальному не опускается ниже 0.8, что при использовании метода не позволит нам внести в расчет серьезную ошибку, даже если анизотропия отсутствует (табл. 3).

Видно, что метод ядерных функций может быть использован для определения пространственной анизотропии и лучше работает на большом количестве исходных данных.

Использование ядерной оценки в качестве метода интерполяции данных дает сильно осредненную карту и может быть использован для выделения тренда из исходных данных, но метод затратен с точки зрения используемых вычислительных ресурсов. На рис. 1 показана получаемая данным методом трендовая карта, видно, что она учитывает направление анизотропии данных, в отличие от других методов.

Намного ценнее полученные данные анизотропии, которые можно использовать как при интерполяции любыми другими методами, так и для общего понимания природы происхождения исследуемых данных.

При интерполяции с помощью кригинга [4] будем учитывать глобальные параметры анизотропии по всей области, чтобы не нарушать требования стационарности данных. По скважинным данным были определены следующие параметры анизотропии: угол

между осью X и большим радиусом вариограммы  $134^\circ$ , отношение радиусов 0.768. Для оценки качества определения глобальных параметров анизотропии по исходным данным в найденных направлениях были построены вариограммы приведенные на рис. 2. Далее полученные вариограммы были использованы при расчете карт методом кригинга. Полученные карты представлены на рис. 3.

Видно, что анизотропия существует и вариограммный анализ подтвердил ее наличие, данное оценкой методом ядерных функций. Незначительную глобальную анизотропию трудно определить исходя из экспертной оценки исходных данных, но она вносит заметные изменения в получаемую карту в межскважинном пространстве. Метод ядерных функций позволил формально определить анизотропию и учесть ее при картопостроении.

При использовании методов интерполяции, основанных на обратных расстояниях, возможен учет, как глобальных параметров анизотропии, так и локальных. Наибольший интерес представляет учет локальных изменений анизотропии, так как ее направление и величина может меняться в разных точках картируемой области, и необходимо учитывать это при моделировании.

При определении локальной анизотропии в дальнейшем будем использовать множество из 40 ближайших точек. Для проверки возможности учета локальной анизотропии рассмотрим два простых случая: искусственно заданы поверхности, наклоненные в направлении

север-юг и восток-запад, по ним рассчитаны значения в скважинах, и проведена интерполяция этих значений. Результаты интерполяции по таким данным отображены на рис. 4.

Из рисунков (д) и (е) видно, что сильная однородная изменчивость данных легко определяется методом ядерных функций, а при отсутствующей анизотропии, как мы проверили ранее (оценка глобальной анизотропии — табл. 3) определяемые параметры не вносят сильной ошибки. Следовательно, мы можем использовать данный метод для определения параметров локальной анизотропии и их учета при моделировании. На рис. 5 показаны примеры реальных поверхностей, рассчитанных с учетом локальной пространственной анизотропии.

Использование данных по локальной пространственной анизотропии вносит заметные изменения в получаемую карту в межскважинном пространстве.

Метод ядерных функций может быть применен при интерполяции данных для выделения тренда. Но главное, он позволяет получить параметры анизотропии, которые могут быть эффективно использованы другими методами интерполяции. Метод позволяет оценить направление общей анизотропии данных при использовании геостатистических методов интерполяции и выделить направление и величину локальной изменчивости для прочих методов. Метод используется при картопостроении в программном комплексе DV-Geo [5].

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-05-33066 мол\_а\_вед, гранта для молодых кандидатов наук Министерства образования и науки РФ № МК-630.2013.5 и гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» Министерства образования и науки № 2012-1.2.2-12-000-1008-4378 (контракт № 8335).

## Итоги

Метод ядерных функций показал свою эффективность для определения параметров анизотропии.

## Выводы

Метод ядерных функций позволяет оценить направление общей анизотропии данных при использовании геостатистических методов интерполяции и выделить направление и величину локальной изменчивости для прочих методов. Метод используется при картопостроении в программном комплексе DV-Geo.

## Список используемой литературы

1. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М.: Мир, 1993. 349 с.
2. Лесин В.В., Лисовец Ю.П. Основы методов оптимизации. М.: МАИ, 1995. 344 с.
3. С.И. Билибин, М.В. Перепечкин, Е.В. Ковалевский. Моделирование залежей углеводородов для подсчета запасов в программном комплексе DV-Geo // Экспозиция Нефть Газ, 2010. №3. С. 36–38.
4. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 408 с.
5. Кашик А.С., Гогоненков Г.Н., Билибин С.И., Перепечкин М.В., Ковалевский Е.В. Система геологического моделирования DV-Geo как пример российского инновационного бизнеса // Экспозиция Нефть Газ, 2011, №5. С. 11–15

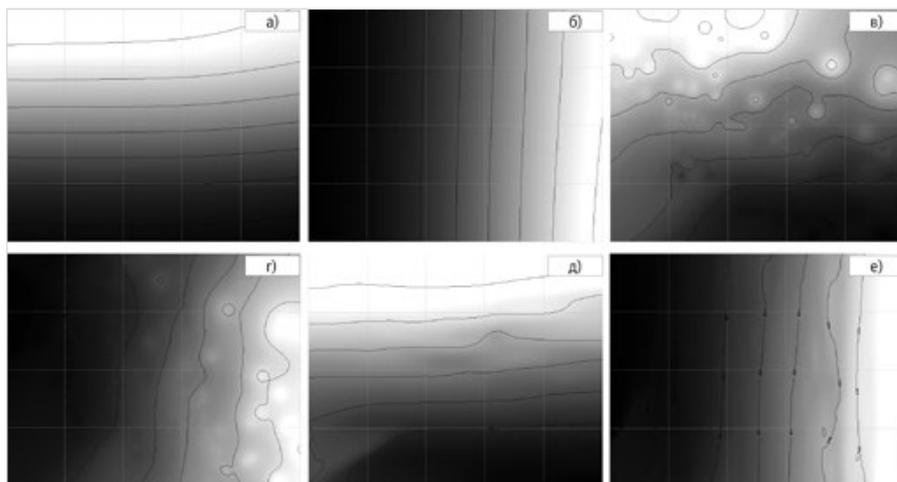


Рис. 4 — Исходные поверхности (а, б). Метод обратных расстояний без учета анизотропии (в, г) и с учетом локальной анизотропии — (д, е)

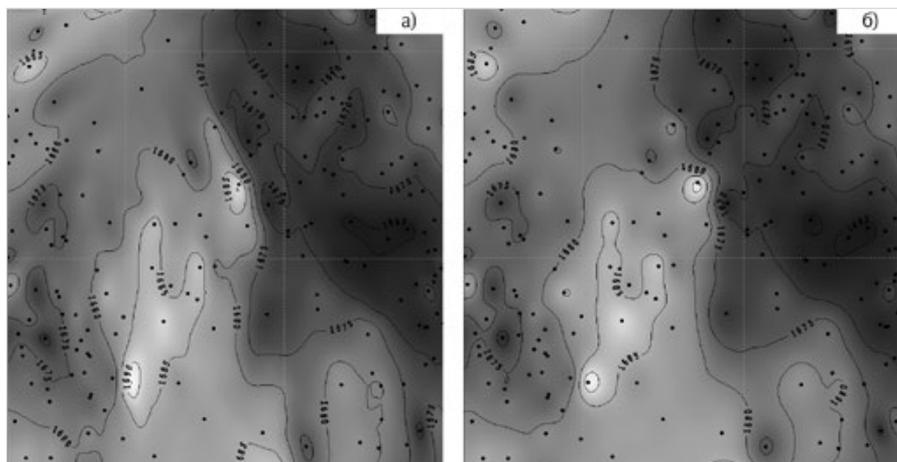


Рис. 5 — Интерполяция кровли горизонта методом обратных расстояний с учетом анизотропии (а) и без учета анизотропии (б)

## Application of kernel functions to the two-dimensional data spatial anisotropy estimation and to solving of mapping problems in the DV-Geo software system

UDC 550.8.028

### Authors:

**Mihail V. Perepechkin** — ph.D.<sup>1</sup>; [dv\\_perepechkin@cge.ru](mailto:dv_perepechkin@cge.ru)

**Ivan A. Globenko** — ph.D. student<sup>2</sup>, engineer<sup>1</sup>; [iaglobenko@cge.ru](mailto:iaglobenko@cge.ru)

<sup>1</sup>Central Geophysical Expedition, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

The article describes a method of mapping which determinates and takes into account the spatial anisotropy of data. Consideration of anisotropy is based on the methodology of kernel functions. The algorithm is proposed which implements this technique in the DV-Geo program system.

### Materials and methods

Geological and geophysical field data.

The method of kernel functions, interpolation, kriging.

### Results

The method of kernel functions has shown it effectiveness for anisotropy parameter determination.

### Conclusions

The method of kernel functions allows us to evaluate the overall data anisotropy

direction for geostatistical interpolation methods and highlights the direction and magnitude of the data local variability for other methods. The method is used in data mapping in DV-Geo software system.

### Keywords

geological modeling, anisotropy, kernel functions, DV-Geo, CGE

### References

1. Hardle W. Applied nonparametric regression. New York: Cambridge university press, 1990.
2. Lesin V.V., Lisovec Ju.P. *Osnovy metodov optimizacii* [Fundamentals of method of optimization]. Moscow: MAI, 1995, 344 p.
3. Bilibin S.I., Perepechkin M.V., Kovalevskiy E.V. *Modelirovanie zalezhey uglevodorodov dlya podscheta zapasov v programnom komplekse DV-Geo* [Modeling of hydrocarbon reservoirs and reserves estimation in the software complex DV-Geo]. *Exposition Oil Gas*, 2010, issue 3, pp. 36–38.
4. Materon Zh. *Osnovy prikladnoy geostatistiki* [Fundamentals of Applied Geostatistics]. Moscow: Mir, 1968, 408 p.
5. Kashik A.S., Gogonenkov G.N., Bilibin S.I., Perepechkin M.V., Kovalevskiy E.V. *Sistema geologicheskogo modelirovaniya DV-Geo kak primer rossijskogo innovacionnogo biznesa* [DV-Geo geomodeling system as an example of innovation business in Russia]. *Exposition Oil Gas*, 2011, issue 5, pp. 11–15.

**XXXVII конференция Ассоциации буровых подрядчиков**  
**Инновационные решения в бурении нефтяных и газовых скважин**

**21-24 мая 2013 года**  
**Москва**

**Ассоциация буровых подрядчиков**

Современные технологии строительства скважин в России и за рубежом.  
 Повышение технико-экономических и качественных показателей строительства скважин со сверхбольшими отходами, многозабойных и боковых стволов.  
 Геолого-технологические исследования и геофизическое сопровождение в процессе бурения.  
 Высокопроизводительные вычисления и геомеханическое моделирование.  
 Опыт применения управляемых систем.  
 Современные подходы в создании и модернизации бурового оборудования.  
 Инновационные технологии и оборудование для шельфовых нефтегазовых проектов.  
 Новые решения по освоению и заканчиванию скважин.  
 Комплекс мероприятий по ремонту скважин и интенсификации притока.  
 Совершенствование нормативно-технической базы, вопросы технического регулирования, стандартизации и сертификации в нефтегазовой отрасли.

тел: 8 (495) 380 72 30  
 e-mail: [adcr@adcr.ru](mailto:adcr@adcr.ru); [abprus@mail.ru](mailto:abprus@mail.ru)

ЭКСПОЗИЦИЯ НЕФТЬ ГАЗ

НЕФТЬ ГАЗ

SPE

Нефть.Газ. НОВАЦИИ

РОGTEC  
[www.rogtecmagazine.com](http://www.rogtecmagazine.com)

СОЮЗ НЕФТЕГАЗ