

УДК 519.876.5: 550.8

## Использование методов непараметрической статистики для повышения достоверности прогноза коллекторских свойств пород

А.Г. Черников<sup>1</sup>, М.Б. Матушкин<sup>2\*</sup>, А.Ю. Дегтерёв<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н.В. Мельникова РАН, Российская Федерация, 111020, г. Москва, Крюковский туп., д. 4

<sup>2</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

<sup>3</sup> Rock Flow Dynamics, Российская Федерация, 117418, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 25А

\* E-mail: M\_Matushkin@vniigaz.gazprom.ru

**Тезисы.** Широко распространенные методы параметрической статистики, основанные на использовании для описания совокупностей значений их математического ожидания и дисперсии, имеют ряд принципиальных ограничений, из-за чего для некоторых задач оказываются неэффективны или принципиально непригодны. В ряде практических задач, решение которых требует применения статистического аппарата, имеющиеся ограничения могут быть крайне существенны. В то же время методы непараметрической статистики, лишенные подобных ограничений, все еще не нашли достаточно широкого применения, что объясняется более поздним развитием их теоретической базы и (в некоторых случаях) существенно большей ресурсоемкостью выполняемых вычислительных операций.

В настоящее время благодаря повсеместному распространению общедоступных персональных компьютеров достаточной вычислительной мощности принципиальные ограничения для использования методов непараметрической статистики отсутствуют, однако в ряде задач, где их применение могло бы быть востребовано, в частности при петрофизическом прогнозе, они все еще не используются в должном объеме.

В статье на примере задачи моделирования коллекторских свойств пород подземного хранилища газа, для решения которой традиционный статистический инструментарий оказывается неэффективным, показана востребованность процедур непараметрической статистики, рассмотрена работа инструментов, основанных на использовании этих методов. На примере реального подземного хранилища газа пошагово рассмотрены основные процедуры, выполняемые при петрофизическом прогнозе на базе методов непараметрической статистики.

При рассмотрении классической регрессионной модели метод наименьших квадратов обеспечивает наилучшие несмещенные оценки, но только при соблюдении ряда условий, одним из которых является постоянство дисперсии отклонений, или гомоскедастичность. Антонимом этого статистического термина является термин «гетероскедастичность» [1, 2]. С позиций параметрической статистики при гетероскедастичности полученные оценки не будут обладать наименьшей дисперсией по сравнению с другими оценками данного параметра, а выводы, получаемые при стандартных проверках оценок, могут быть ошибочными и приводить к неверным заключениям. Для того чтобы определить наличие гетероскедастичности, обычно используют тесты, в которых рассматривают гипотезы об отсутствии гетероскедастичности.

В статье использованы данные о пористости и проницаемости одного из подземных газовых хранилищ. В распоряжении авторов находились определения, выполненные на 330 образцах, отобранных в 30 скважинах. По стратиграфической принадлежности образцы распределены неравномерно, причем в среднем на одну опробованную скважину приходится всего 11 образцов.

При интерпретации материалов геофизических исследований скважин (ГИС) неконтролируемые случайности в распределении керновых анализов проб по скважинам и стратиграфическим горизонтам, их привязки по глубине в интервале отбора образцов и наличие погрешностей в лабораторных определениях свойств пород приводят к размыванию естественного вида корреляционных связей вплоть до невозможности достоверного их установления методами параметрической статистики (рис. 1).

**Ключевые слова:** непараметрическая статистика, моделирование, геология, петрофизика, интерполяция, нечеткие величины, марковская последовательность, распознавание, прогноз, фильтрационно-емкостные свойства.

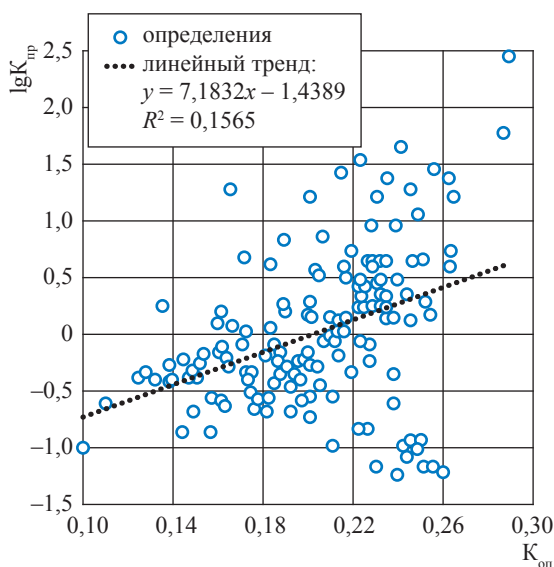
Другим усложняющим петрофизическое моделирование фактором, типичным для подземных газовых хранилищ, является растянутая на десятилетия технология накопления геологических (керна) и геофизических (комплексы, аппаратура, технологии) материалов. Результатом подобной пролонгированной практики накопления материалов становится несопоставимость керновых определений фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) с кривыми комплекса ГИС. Усложнение методики обработки данных за счет соблюдения принципа параметричности статистических методов также не гарантирует существенной адекватности моделируемых связей.

При массовой обработке геолого-геофизических материалов с целью петрофизического моделирования подземных газовых хранилищ для оценки аналитического выражения связи двух слабо коррелируемых параметров авторами применен непараметрический метод, названный «ранжированной регрессией». Этот способ, относящийся к подмножеству «непараметрических» методов статистики, аналогичен ранговой корреляции, и его реализация, демонстрируемая на примере с керном, состоит в следующем: ранжирование допускает восстановление естественного

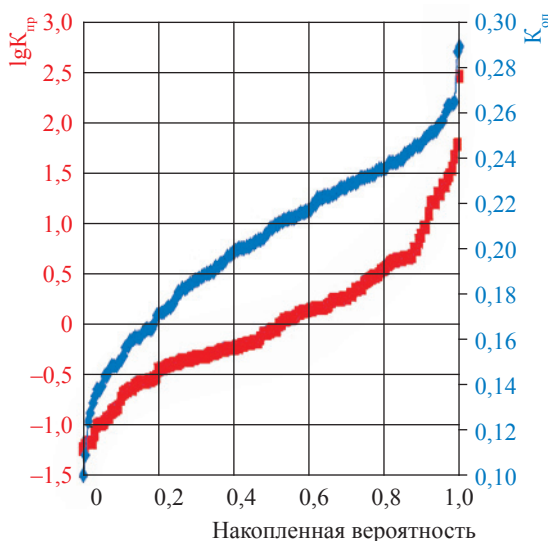
вида связи из «зашумленной» зависимости между двумя *априори коррелируемыми* параметрами исходя из попарного сопоставления значений их накопленной вероятности в ранжированной выборочной совокупности. При этом обязательно условие: оба сопоставляемых параметра относятся к *общей* генеральной совокупности и объемы сопоставляемых подвыборок равновелики. Причем условие равновеликости без труда преодолевается с помощью известного метода рандомизации числовых данных (метода Монте-Карло) [3, 4]. Также при ранжировании учитывается вид восстанавливаемой связи – прямая или обратная (рис. 2).

Сопоставляя попарно коррелируемые параметры в точках (интервалах) их равновероятного положения в выборке и заменяя значения накопленной вероятности соответствующими значениями коррелируемых параметров, получаем кривую ранжированной регрессии. Восстановленная связь открытой пористости и проницаемости (см. рис. 1, 2), аппроксимированная регрессионной кривой 5-й степени, представлена на рис. 3.

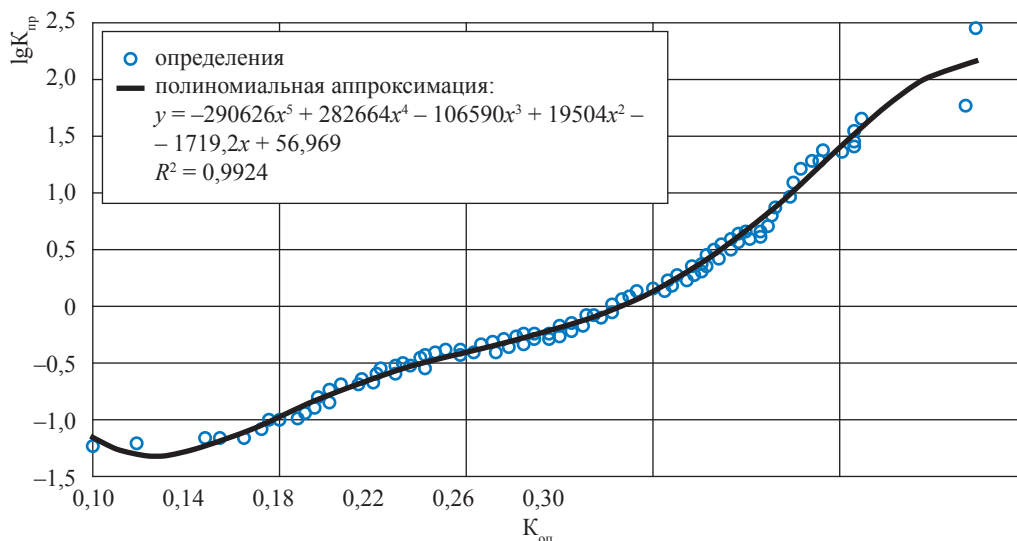
Разработана модификация метода ранжированной регрессии – способ моделирования ФЕС с использованием нормальной



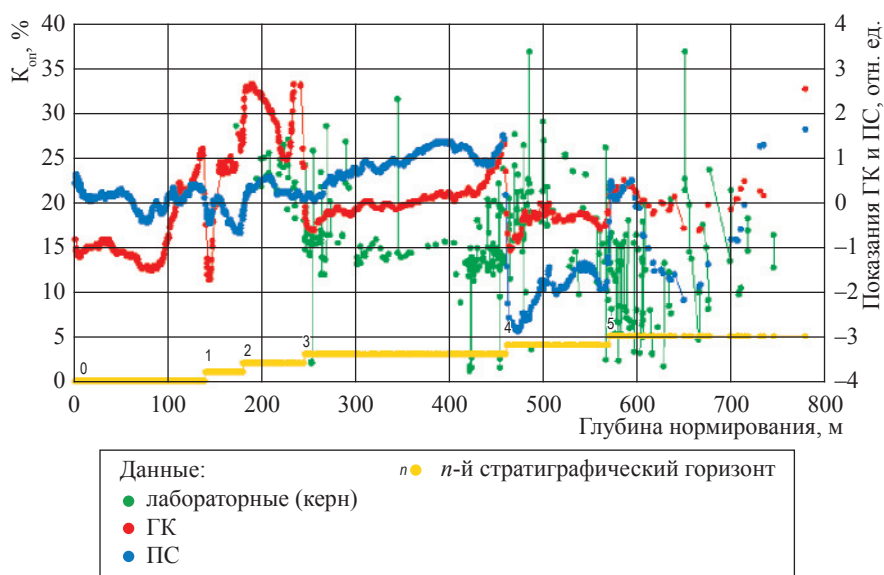
**Рис. 1. Поле корреляции открытой пористости ( $K_{он}$ ) и логарифма коэффициента проницаемости ( $K_{пр}$ , мД) для терригенных отложений одного стратиграфического горизонта:**  
 $R^2$  – коэффициент детерминации



**Рис. 2. Ранжированные значения  $K_{он}$  и  $lgK_{пр}$  (см. рис. 1), совмещенные на шкале накопленной вероятности**



**Рис. 3. Пример трансформации поля корреляции значений  $K_{он}$  и  $LgK_{пр}$  (см. рис. 1) в кривую ранжированной регрессии и аппроксимации ее полиномом 5-й степени (для терригенных отложений)**



**Рис. 4. Результаты предварительной увязки лабораторных определений  $K_{пр}$  с нормированными значениями ГК и ПС в пределах стратиграфических горизонтов**

геофизической модели объекта [5], суть которого состоит в следующем:

1) все результаты керновых определений, помеченные номером скважины и глубиной отбора, получают стратиграфическую привязку. Таким образом, глубины отбора образцов, извлеченных из разных скважин, но из определенного стратиграфического горизонта, могут быть сопоставлены с кривыми ГИС на нормальном разрезе. Если образцы привязываются к «материнской» скважине, увязка выполняется по фактическим глубинам отбора. Если

используется коллекция образцов из разных скважин, привязка выполняется методом Монте-Карло (рис. 4, 5) в пределах установленных стратиграфических подразделений, показанных на рис. 4–8 пронумерованными отрезками;

2) затем для каждого стратиграфического интервала выполняется раздельное (поточечное) ранжирование значений кривых гамма-каротажа (ГК) и  $K_{он}$ . При ранжировании учитывается вид регрессионной связи между значениями ГК и  $K_{он}$  – отрицательная, и затем производится перестроение

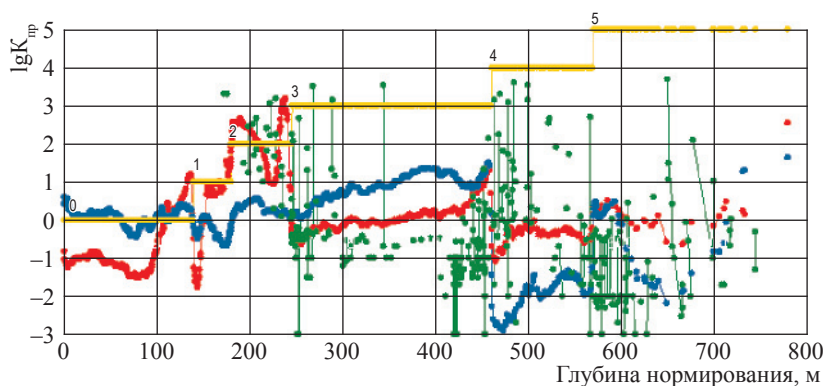


Рис. 5. Результаты предварительной привязки по нормированной глубине лабораторных определений  $K_{пр}$ , мД, к кривым ГК и ПС: здесь и далее на рис. 6 и 7 см. экспликацию к рис. 4

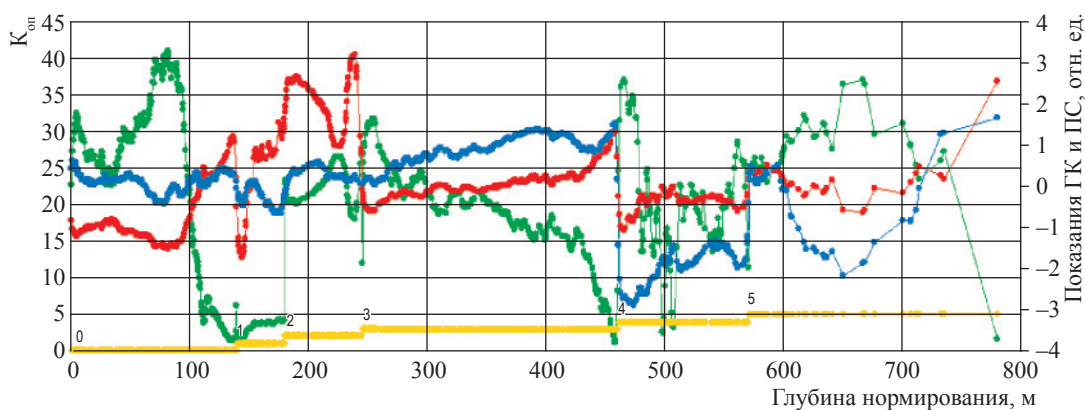


Рис. 6. Модель изменения открытой пористости и ГК для терригенных и карбонатных интервалов разреза, установленная способом ранжированной регрессии

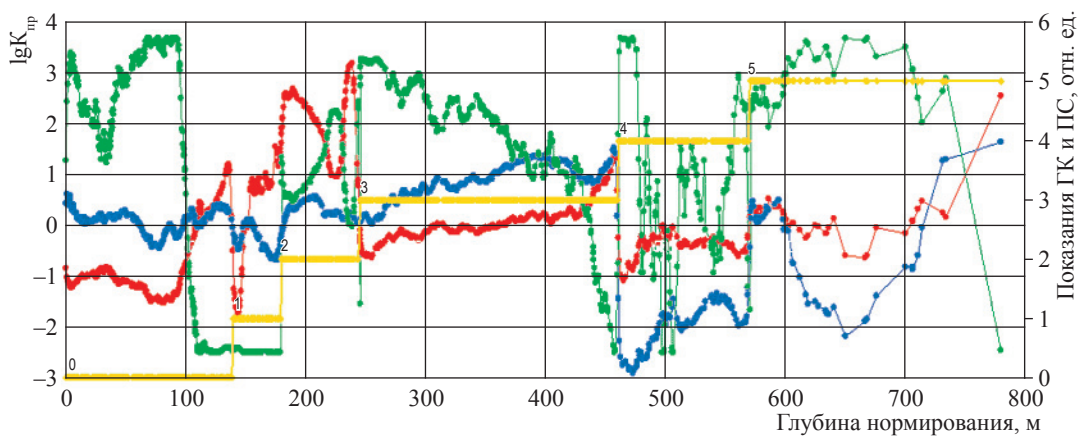


Рис. 7. Модель изменения  $lgK_{пр}$  и нормированных значений ГК и ПС для терригенных и карбонатных интервалов разреза, установленная способом ранжированной регрессии

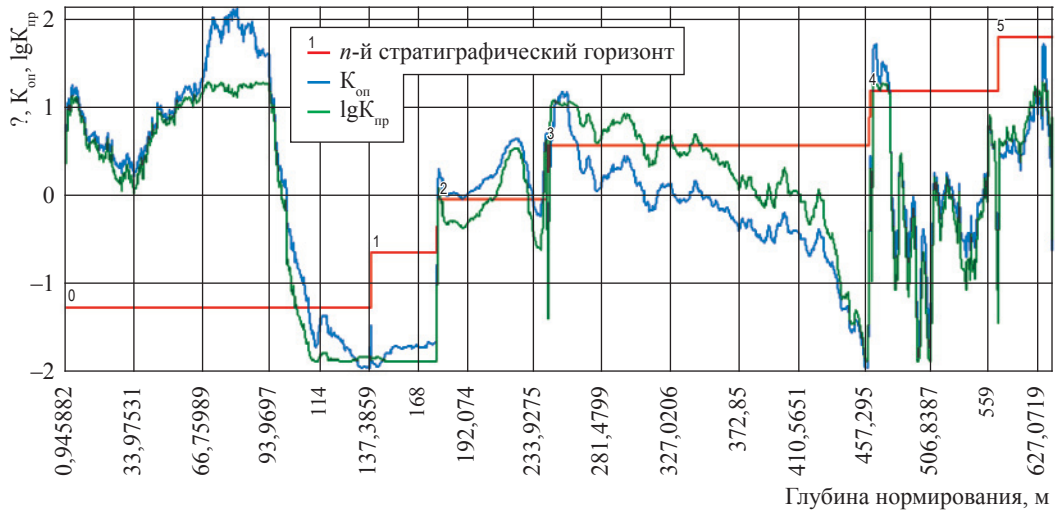


Рис. 8. Нормальная петрофизическая модель ( $K_{он}$  и  $lgK_{пр}$ )

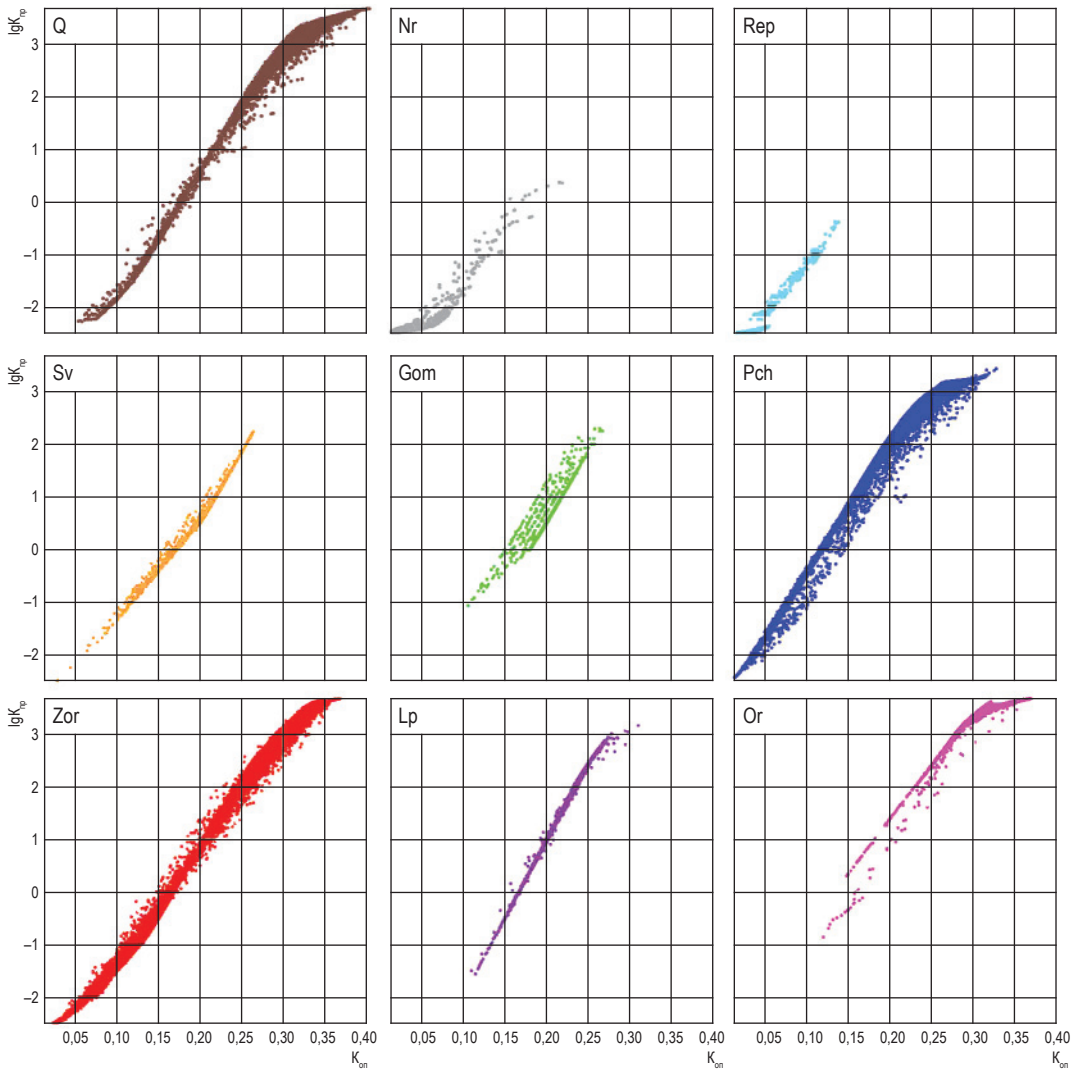


Рис. 9. Кроссплоты, демонстрирующие связь проницаемости ( $lgK_{пр}$ ) и открытой пористости ( $K_{он}$ ) в модели для различных стратиграфических горизонтов

увязанных значений  $K_{оп}$  в соответствии с положением равновероятных точек ГК на шкале глубин. Таким образом осуществляется увязка нормальных кривых ГК или потенциала самопроизвольной поляризации (ПС) с лабораторными определениями значений ФЕС. Видно (см. рис. 6, 7), что первоначально хаотически расположенные (см. рис. 4, 5) значения  $K_{оп}$  и  $IgK_{гп}$  распределяются в соответствии со стратиграфической глубиной и значениями ГК и ПС;

3) следующий этап заключается в восстановлении значений  $K_{оп}$  для всего нормально-го разреза исследуемого объекта и установлении связи между данными ГИС и значениями ФЕС. Для этого широко используются методы Монте-Карло, ранжированной регрессии, фильтрации и многофакторного анализа. Аналогичным образом устанавливаются зависимости для других показателей, и создается нормальная петрофизическая модель объекта, адекватная его геофизической нормальной модели (рис. 8).

Нормальная петрофизическая модель позволяет оценить стратиграфическую изменчивость не только ФЕС, но и их взаимных связей. Кроссплоты<sup>1</sup>, характеризующие связь между пористостью и логарифмом проницаемости в различных стратиграфических интервалах модели, приведены на рис. 9;

4) заключительным этапом петрофизического моделирования является адаптация обобщенной модели ФЕС к замеренным геофизическим показателям во всех скважинах на подземном хранилище газа для построения 3D-модели изменчивости его ФЕС [6, 7].

Оценка предлагаемой методики петрофизического прогнозирования осуществлялась путем сопоставления эффективного объема порового пространства пласта коллектора с результатами режимных измерений в наблюдательных скважинах.

\*\*\*

Преимущества предлагаемого метода состоят в обеспечении постоянства дисперсии отклонений (в пределах выделенных породно-стратиграфических кластеров) как исходных геофизических, так и прогнозируемых

петрофизических характеристик объекта, что объективно смягчает требования к имеющейся для количественной интерпретации исходной геолого-геофизической информации и в итоге оптимизирует и ускоряет сам процесс обработки данных. Фактически методику можно рассматривать как элемент инновационной технологии больших данных, феномен которой обусловлен постоянным ростом объема данных, накопленных крупными компаниями, в том числе нефтегазового комплекса. Собранный информация для многих организаций является важным активом, однако обрабатывать ее и извлекать из нее пользу с каждым днем становится все сложнее и дороже.

### Список литературы

1. Магнус Я.Р. Эконометрика / Я.Р. Магнус, П.К. Кагышев, А.А. Пересецкий. – М.: Дело, 2004. – 576 с.
2. GREENE, W.H. Econometric analysis / William H. Greene. – New York: Pearson Education, Inc., 2003. – 1026 с.
3. Литтл, Р. Дж.А. Статистический анализ данных с пропусками / Литтл Р. Дж.А., Рубин Д.Б. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 336 с.
4. Шитиков В.К. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг. – Тольятти: Кассандра, 2014. – 314 с.
5. Дегтерёв А.Ю. Специфика межскважинной корреляции при геологическом моделировании подземных хранилищ газа в водоносных пластах / А.Ю. Дегтерёв, В.Е. Кан, А.Г. Черников и др. // Каротажник. – 2016. – № 3 (261). – С. 67–87.
6. Черников А.Г. 3D-моделирование петрофизических свойств сложнопостроенных объектов подземного хранения газа на основе алгоритма нечетких марковских последовательностей / А.Г. Черников, М.Б. Матушкин, А.Ю. Дегтерёв // Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – № 1 (25). – С. 148–157.
7. Матушкин М.Б. Пакетная обработка геолого-геофизических данных для создания геолого-технологических моделей / М.Б. Матушкин, А.Г. Черников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 12. – С. 115–124.

<sup>1</sup> Кроссплот – специализированная диаграмма, которая сравнивает многократные измерения величин, сделанных в одно время или в одном месте по двум или больше осям.



## Application of distribution-free statistical methods to upgrade certainty of reservoir quality prediction

A.G. Chernikov<sup>1</sup>, M.B. Matushkin<sup>2\*</sup>, A.Yu. Degterev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Bld. 4, Kryukovskiy tupik, Moscow, 111020, Russian Federation

<sup>2</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninsky district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

<sup>3</sup> Rock Flow Dynamics, Bld. 25A, Profsoyuznaya street, Moscow, 117418, Russian Federation

\* E-mail: M\_Matushkin@vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** Widely used methods of parametric statistics based on description of data arrays with their mathematical expectation and dispersion has few principal limits making them inefficient or absolutely unfit for some tasks. For a number of applied tasks which require statistical apparatus this limits could be rather important. At the same time, methods of distribution-free (non-parametric) statistics, which don't suffer from such disadvantages, are not popular still. It could be explained with later development of their theoretical foundation and in some cases with higher resource intensity of computations.

Nowadays, thanks to all-round expansion of the omnibus and rather powerful personal computers, there are no principal bounds for application of non-parametric statistical methods, but in some tasks where they could be useful, in particular for petrophysical prognoses, they are not practiced still in necessary extent. In this paper on example of modelling reservoir properties of underground gas storages, where traditional statistical apparatus fails, the relevance of non-parametric statistical procedures is demonstrated. The main distribution-free statistical procedures usually being followed during petrophysical predictive modelling are examined step-by-step.

**Keywords:** distribution-free statistics, simulation, petroleum physics, geology, interpolation, fuzzy variables, Markov sequence, recognition, forecast, porosity, permeability.

### References

1. MAGNUS, Ya.R., P.K. KATYSHEV, A.A. PERESETSKIY. *Econometrics* [Ekonometrika]. Moscow: Delo, 2004. (Russ.).
2. GREENE, W.H. *Econometric analysis*. New York: Pearson Education, Inc., 2003.
3. LITTLE, Roderick J.A., and Donald B. RUBIN. *Statistical analysis with missing data*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
4. SHITIKOV, V.K., G.S. ROZENBERG. *Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R* [Randomizatsiya i butstrep: statisticheskiy analiz v biologii i ekologii s ispolzovaniyem R]. Tolyatti, Russia: Cassandra, 2014. (Russ.).
5. DEGTEREV, A.Yu., V.Ye. KAN, A.G. CHERNIKOV et al. Special features of crosswell correlation at geological modelling of underground gas storages in water-bearing strata [Spetsifika mezhskvazhinnoy korrelyatsii pri geologicheskoy modelirovaniy podzemnykh khranilishch gaza v vodonosnykh plastakh]. *Karotazhnik*. 2016, no. 3 (261), pp. 67–87. ISSN 1810-5599. (Russ.).
6. CHERNIKOV, A.G., M.B. MATUSHKIN, A.Yu. DEGTEREV. 3D-simulation of petrophysical properties of complex underground gas storage objects using an algorithm of fuzzy Markov sequences [3D-modelirovaniye petrofi zicheskikh svoystv slozhnopostroyennykh obyektov podzemnogo khranilishcha gaza na osnove algoritma nechetkikh markovskikh posledovatelnostey]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2016, no. 1 (25): Issues for resource provision of gasextractive regions of Russia, pp. 148–157. ISSN 2306-8949. (Russ.).
7. MATUSHKIN, M.B., M.B. CHERNIKOV. Batch processing of geological measurements and well logs for designing geological-engineering models [Paketnaya obrabotka geologo-geofizicheskikh dannykh dlya sozdaniya geologo-tekhnologicheskikh modeley]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2011, no. 12, pp. 115–124. ISSN 0236-1493. (Russ.).