

Вариограммный анализ геологических тел

К.Е. Закревский

к.г.–м.н., главный специалист¹
kezakrevskiy@rosneft.ru

В.Л. Попов

старший научный сотрудник²
PopovVL@tomsknpi.ru

¹ПАО «НК «Роснефть», Москва, Россия

²ОАО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия

В статье приводятся результаты численных расчетов, выполненных на синтетических цифровых геологических моделях. Описывается методика создания таких моделей и вариации исходных данных. Анализируется степень влияния изменчивости исходных данных (размеров тел и их количества) на результаты статистической оценки распределения тел в объеме резервуара.

Материалы и методы

Численные расчеты на синтетических моделях, объектно-ориентированные, индикаторные методы и многоточечная статистика.

Ключевые слова

вариограмма, радиус, расстояние, изменчивость, песчанность, геометрические размеры тела, реализации

Создание цифровых геологических моделей осуществляется сегодня, как правило, детерминистскими или стохастическими методами. Последние более гибкие и геологически адаптированные. В качестве стохастических применяются объектно-ориентированные методы, индикаторные и их комбинация — MPS, то есть многоточечная статистика [1, 2, 3, 4]. Объектно-ориентированные методы оперируют понятиями геометрических размеров распределяемых в объеме резервуара геологических тел (русел, конусов выноса): глубина, ширина, извилистость (амплитуда и длина волны).

Индикаторные методы опираются, в первую очередь, на статистические характеристики геологических тел на основе вариограммного анализа: радиус (ранг) вариограммы R , нагет, порог. Вариограмма определяет средний квадрат разности между значениями в точках измерений как функцию расстояния между ними. Она представляет собой зеркальное отражение автокорреляционной функции (АКФ). Известны виды АКФ для простых функций: для прямоугольника — треугольный вид, для периодических функций — периодический вид.

Однако, для распределения в резервуаре геологических тел заданной геометрической формы ситуация более сложная. В

зависимости от доли общего объема тел от объема резервуара (песчанности — NTG) наблюдается большее или меньшее пересечение тел. Между тем, вопрос об установлении соотношения между геометрическими размерами тел и величиной R имеет важное практическое значение для геологического моделирования.

Достаточно часто, особенно при нехватке информации по моделируемым пластам, используются статистические данные по аналогам этих пластов, собранные по обнажениям, например, гистограммы распределений различных геометрических размеров геологических тел. Для того, чтобы использовать эту информацию при индикаторном моделировании, необходимо установить соотношения между геометрическими размерами геологических тел и величиной R при разных значениях NTG.

Аналитическое решение этой задачи, если оно существует, достаточно сложное. Однако, можно попытаться решить ее численно. Появление мощных компьютеров позволяет в настоящее время выполнять многовариантные численные расчеты на синтетических моделях. Вначале осуществляется вариация количества и геометрических размеров, раскидываемых в межскважинном пространстве геологических тел при разных

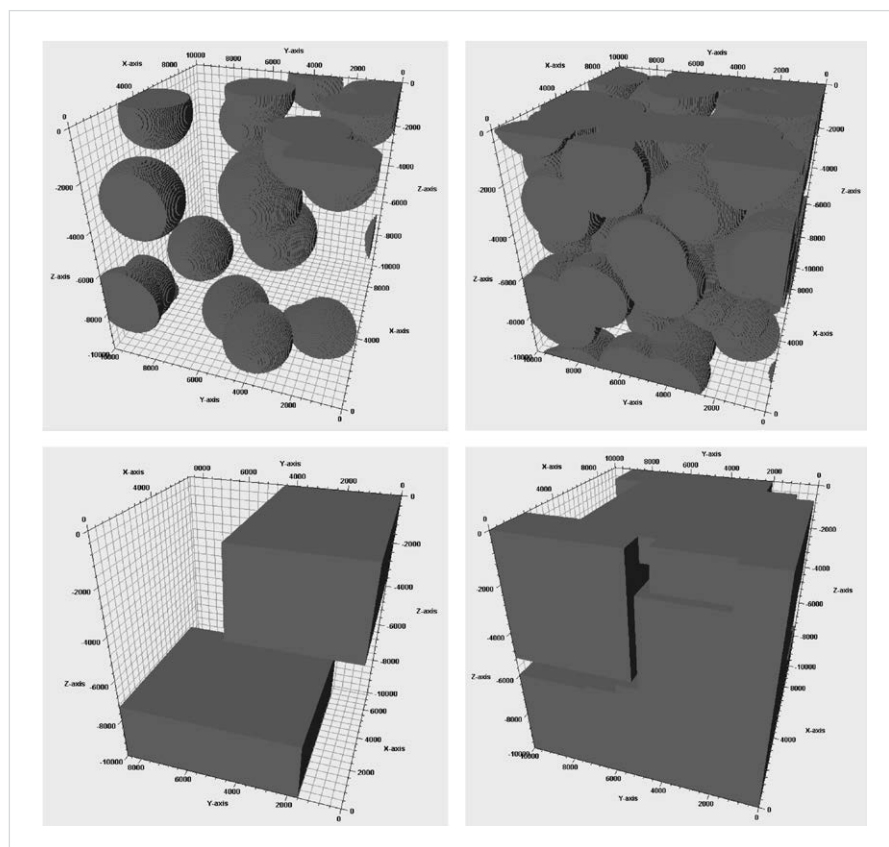


Рис. 1 — Примеры распределения различных тел в модели. Сверху — шары диаметром 3000 м (NTG слева равно 20%, справа — 80%). Снизу — кубы со стороной 7000 м (NTG слева равно 20%, справа — 70%)

Fig. 1 — Examples of different bodies distribution in the model. Top — balls diameter 3000 m (NTG, left, equals 20%, right — 80%). Bottom — cubes with a side of 7000 m (NTG, left, equals 20%, right — 70%)

значениях NTG. Затем оценивается величина R по различным направлениям. Далее рассматривается технология многовариантных расчетов и полученные результаты.

С целью получения исходных данных для анализа вариограмм, рассчитанных для тел заданной формы и размеров, были построены синтетические модели. Они имели размерность $200 \times 200 \times 200$ ячеек, размер каждой ячейки — $50 \times 50 \times 50$ м. Куб литотипов рассчитывался при помощи методов объектного моделирования. Для расчетов использовалась двухкомпонентная модель, в которой вмещающие породы (глины) были названы неколлектором (индекс 0), а распределенные в нем песчаные тела — коллектором (индекс 1). Для начала была смоделирована и проанализирована ситуация с простыми формами тел (рис. 1):

- изометричные кубы, размер ребра куба варьировался от 1000 до 8000 метров с шагом 1000 метров, песчанистость модели варьировалась от 20 до 80 % с шагом 20%;
- изометричные сферы, диаметр сферы варьировался от 1000 до 8000 метров с шагом 1000 метров, песчанистость модели варьировалась от 20 до 80 % с шагом 20%.

Для каждого значения песчаности модели и размеров тел было построено по 7 реализаций, по которым производилось осреднение. Далее для каждой реализации куба распределения тел были рассчитаны вариограммы. В работе исследовались вариограммы, полученные по ячейкам коллекторов, для ячеек неколлекторов вариограммы не строились.

Для расчета экспериментальных вариограмм использовались следующие настройки: модель вариограммы — сферическая, шаг гистограммы — 400 м, максимальная длина шага — 10000 м. Затем кубы с размерами тел более 6000 м были отброшены, так как для них не представляется возможным установить параметры вариограмм, поскольку большинство тел оказываются срезанными границей модели.

Расчет вариограммы по кубу литологии занимает значительное количество времени. Поэтому во время исследований каждый куб был прорежен по регулярной сетке, в которой оставались свойства в каждой тридцатой ячейке по осям I , J и K . Таким образом, удалось сократить время расчета вариограмм до приемлемых величин, сохранив неоднородность распределения свойств исходного куба.

На следующем этапе работ было выполнено исследование по установлению зависимостей параметров вариограммы от параметров геометрии каналов (русел), распространенных в кубе литологии методом объектного моделирования. В качестве объектов в синтетической модели распространялись каналы шириной 1 км. Переменными величинами принимались длина и амплитуда волны канала. Длина волны изменялась от 1 до 7 км с шагом 1 км. Для каждого значения длины волны амплитуда изменялась от 1 км до величины удвоенной длины волны. Расчеты проводились при трех различных уровнях песчаности: 20, 50 и 80 %.

Вначале рассмотрим результаты исследований по распределению в объеме простых геометрических объектов — шаров и кубов. По результатам исследований было

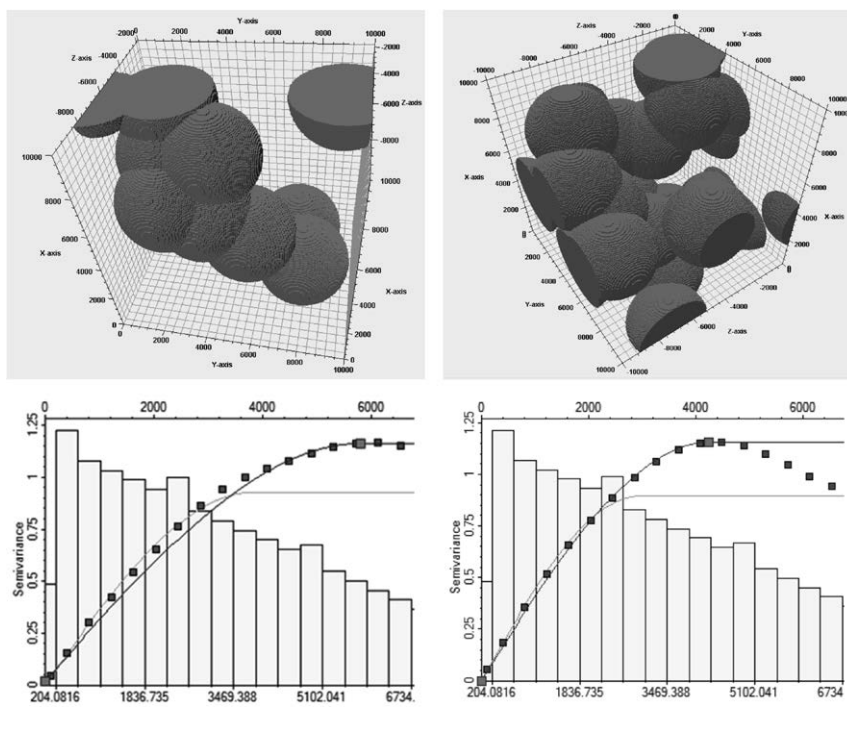


Fig. 2 — Кластеризация тел коллектора в модели и беспорядочное наложение тел (вверху), соответствующие этим распределениям коллекторских тел вариограммы (внизу)

Fig. 2 — Clustering of reservoir rock bodies in the model and disorderly overlapping of bodies (top), variograms corresponding to these distributions of reservoir rock bodies (bottom)

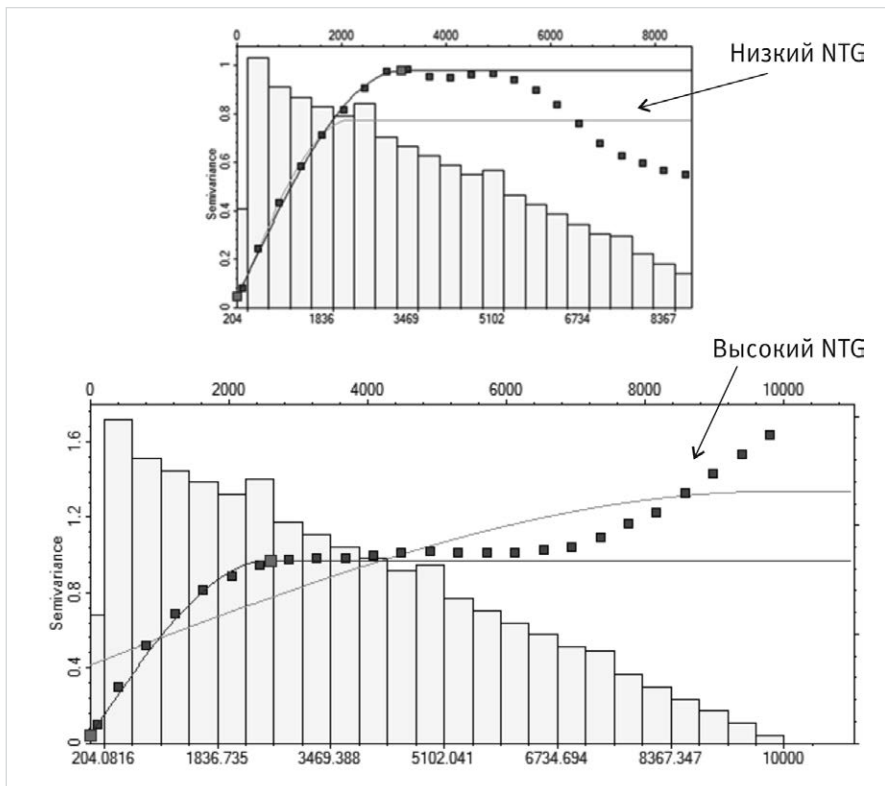


Fig. 3 — Вариограммы при различном NTG модели. Тела сферической формы, радиусом 3 км
Fig. 3 — Variograms with different model NTG. Bodies of spherical shape, 3 km in radius

установлено, что ранг вариограммы R статистически надежно связан с размерами тел L , но может быть искажен за счёт различных явлений.

Ранг вариограмм может оказаться заниженным относительно размеров тел вследствие срезания их большого количества

границами модели. Экспериментально этот эффект особенно ярко проявляется, если размеры тел превышают примерно половину размера модели в данном направлении.

С другой стороны, ранг вариограмм может оказаться завышенным при кластеризации тел. Этот эффект наиболее явно

проявляется при небольшом количестве тел (низком NTG), когда их кластеризация вносит существенный вклад в общую статистику вариограммы. В случае высокого NTG само явление кластеризации имеет меньшую вероятность появления, поскольку большое количество тел распределяется в объеме статистически однородной, и кластеризация некоторого количества тел не приводит к существенному искажению статистики.

Беспорядочное наложение тел друг на друга, которое всегда имеет место быть при объектном моделировании, без объединения тел в кластеры (обособленные группы) не вносит ошибку в определение размеров тел коллектора по рангам вариограмм (рис. 2).

Песчаность модели оказывает существенное влияние на форму вариограмм. При низком NTG вариограммы почти во всех случаях имеют характерный вид: вариограмма вначале выходит на порог, а затем уходит вниз, проявляя «hole effect», или «эффект ямы» (рис. 3, вверху). Это связано с тем, что низкий параметр NTG модели дает небольшое количество тел, погруженных во вмещающую породу, и при более или менее равномерном распределении тел по модели, прослеживается периодичность их появления. Это повторное появление тела коллектора по направлению и выражается в появлении «hole effect» на вариограмме. При высоком значении NTG модели появление ячеек коллектора вдали от тела чаще имеет случайный характер за счёт того, что

таких ячеек количественно больше. Это приводит к уходу вариограммы вверх от порога на большие расстояния (рис. 3, внизу).

Рассмотрим особенности вариограмм для распределения тел кубической формы. Для таких тел ранг вариограммы оказывается несколько завышенным относительно стороны куба L в среднем на величину около 23%, при этом он не зависит от размеров тел. Завышение ранга связано с тем, что достаточно часто в распределении появляется кластеризация тел, которая стремится его увеличить (рис. 4, вверху). При этом следует отметить сильный разброс значений при увеличении размеров тел. Влияние дискретности модели выражается в зависимости величины так называемого «эффекта самородка» («nugget effect») от стороны куба. Когда размеры тел уменьшаются, дискретность модели начинает играть весомую роль, что и приводит к повышению этой величины (рис. 4, внизу).

Для распределений тел сферической формы ранг вариограмм R , несмотря на встречающиеся искажения в вариограммах, в среднем почти соответствует диаметру сфер L . Средняя величина отношения R/L составила 0,97 при почти горизонтальной зависимости (рис. 5, вверху). В случае распределения тел сферической формы проявилась, так же, как и в случае распределения кубов, зависимость «эффекта самородка» от размеров тел.

В дополнение к этому, для распределений сфер появилась тенденция снижения рангов

вариограмм с увеличением песчаности модели (рис. 5, внизу). Это связано с тем, что в моделях с большим количеством тел сферы сливаются центральными частями, по которым длина корреляции будет наивысшей.

Перейдем к рассмотрению результатов исследований по распределению в объеме сложных геометрических объектов — каналов.

Всего было выполнено около 230 расчетов куба литотипов, для каждого из которых оценивались значения следующих параметров вариограмм: ранг, самородок (nugget), порог (sill), ранг первой ямы (hole) и высота ямы (рис. 6, вверху). С использованием этих первичных параметров рассчитывались вторичные. Например, отношение высоты ямы к порогу вариограммы (глубина ямы на вариограмме). Вариограммы рассчитывались вдоль направления течения каналов и поперек (рис. 6, внизу).

Расчеты показали, что по параметрам вариограммы возможно восстановить геометрические параметры каналов.

Длина волны канала может быть установлена по рангу ямы, посчитанному по направлению вдоль оси сноса материала (рис. 7). Имелось предположение, что выраженность ямы влияет на точность снятия отсчета по оси ранга вариограммы и, таким образом, может влиять на точность определения длины волны каналов. Однако, исследование отношения ранга ямы к длине волны в зависимости от глубины ямы (отношение порога ямы к порогу

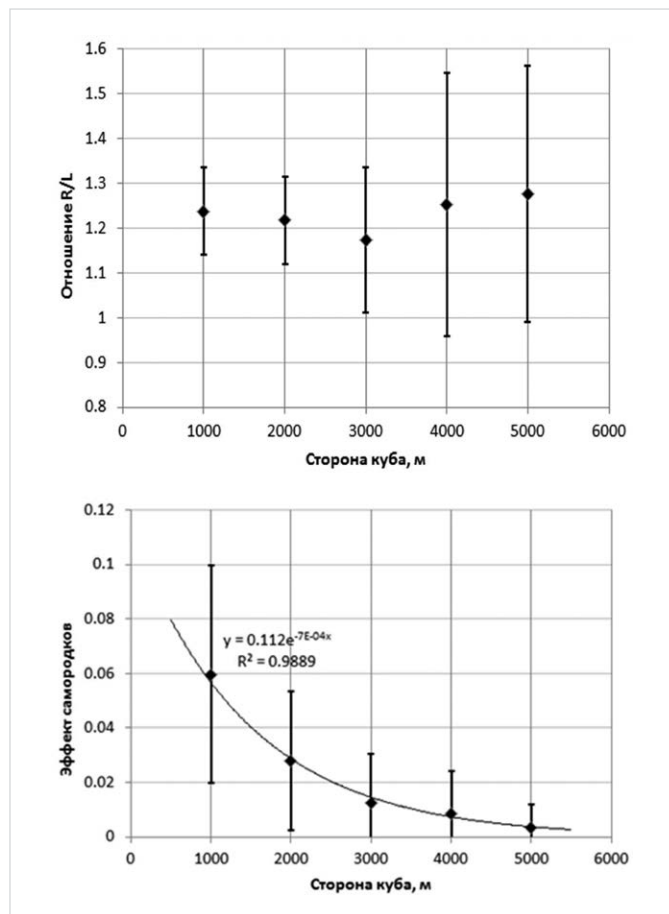


Рис. 4 — Зависимость отношения R/L от стороны куба (верхний рисунок) и зависимость «эффекта самородков» от стороны куба (нижний рисунок)

Fig. 4 — Dependence of the R/L ratio on the cube side (top) and dependence of "nugget effect" on the cube side (bottom)

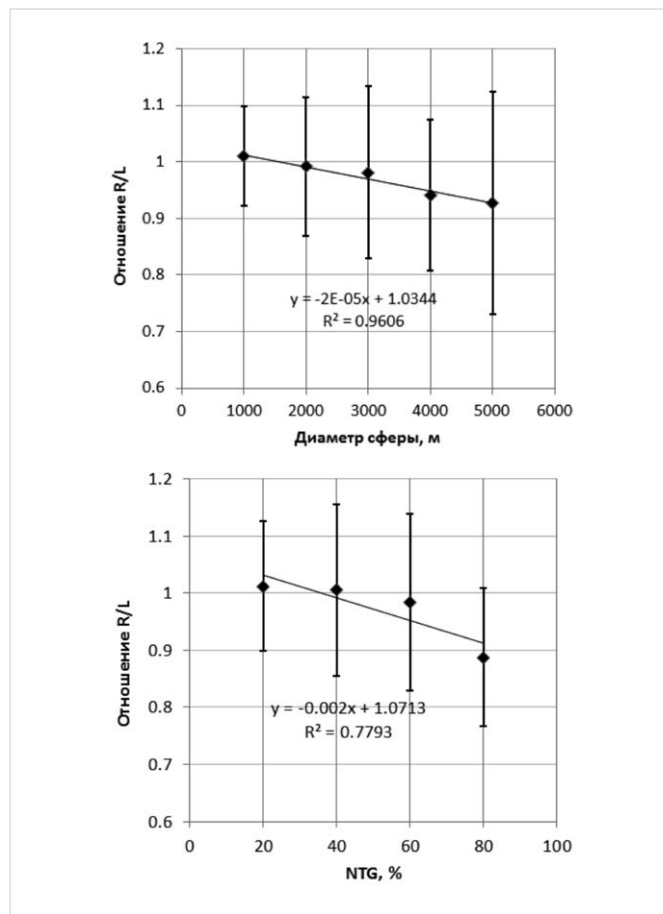


Рис. 5 — Зависимость отношения R/L от диаметра сфер коллектора (верхний рисунок) и зависимость отношения R/L от NTG модели (нижний рисунок)

Fig. 5 — Dependence of the R/L ratio on reservoir rock sphere diameter (top) and dependence of the R/L ratio on model NTG (bottom)

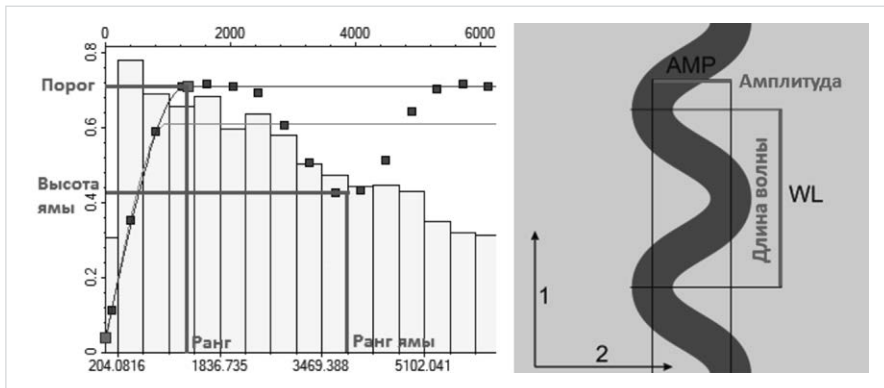


Рис. 6 — Параметры вариограммы (слева) и параметры каналов для распределения в резервуаре (справа)

Fig. 6 — Variogram parameters (left) and channel parameters for distribution in the reservoir (right)

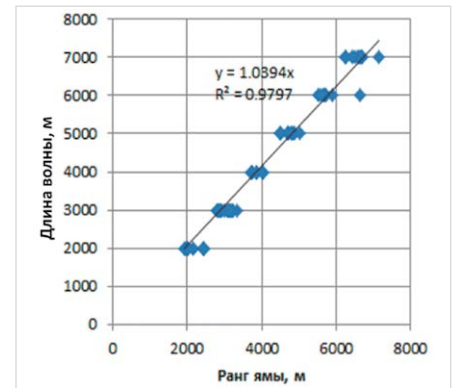


Рис. 7 — Зависимость длины волны канала от ранга ямы вариограммы по направлению вдоль оси течения канала

Fig. 7 — Dependence of the channel wave length on the variogram valley rank in the direction along the channel flow axis

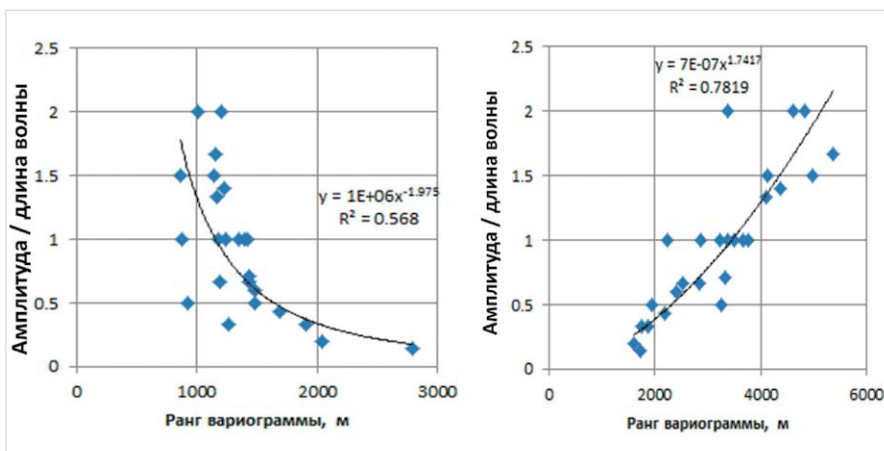


Рис. 8 — Зависимость отношения амплитуды волны к её длине от ранга вариограммы в первом (слева) и втором (справа) направлениях

Fig. 8 — Dependence of the wave amplitude to wave length ratio on the variogram rank in the first (left) and second (right) directions

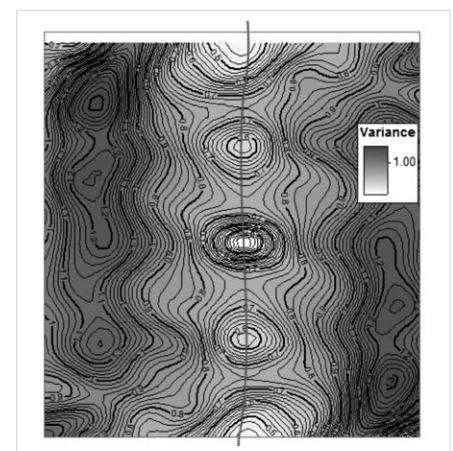


Рис. 9 — Вариограммная карта для каналов с длиной волны 5000 м и амплитудой 7000 м

Fig. 9 — Variogram chart for channels with a wavelength of 5000 m and an amplitude of 7000 m

вариограммы) показало, что даже при глубине ямы в 10–20 % удается установить длину волны с хорошей точностью (рис. 7).

Зависимость амплитуды от параметров экспериментальной вариограммы установить не удалось. Однако, была выявлена значимая связь отношения амплитуды волны к её длине от рангов вариограмм, вдоль и поперек направления течения (рис. 8). Таким образом, для улучшения точности можно использовать среднеарифметическое определение отношения амплитуды к длине волны по обоим направлениям вариограммы. Вероятно, что коэффициенты в этих уравнениях будут зависеть от ширины канала (в рамках данной работы, это изучено не было).

При исследовании вариограмм выяснилось, что в направлении движения порог возрастает с увеличением длины волны каналов. Тем не менее, даже когда порог имеет очень низкую величину (~0,4 ед), удается уверенно определить ранг ямы. Направление сноса материала соответствует направлению с минимума порога и уверенно устанавливается по вариограммной карте. На рис. 9 мы видим, что направление движения материала уверенно выделяется как ось, соответствующая минимуму «силла», и на которой лежат ямы.

Итоги

В результате исследований было установлено, что ранг вариограмм может оказаться заниженным относительно размеров тел вследствие срезания большого количества тел границами модели. Экспериментально этот эффект особенно ярко проявляется, если размеры тел превышают примерно половину размера модели в данном направлении.

С другой стороны, ранг вариограмм может оказаться завышенным при кластеризации тел. Этот эффект наиболее явно проявляется при небольшом количестве тел (низком NTG). Песчанность модели оказывает существенное влияние на форму вариограмм.

При этом следует отметить увеличение разброса значений при увеличении размеров тел. Когда размеры тел уменьшаются, дискретность модели начинает играть большую роль, что и приводит к повышению этой величины.

Выводы

Для тел прибрежно-морского генезиса, аппроксимирующихся кубами и шарами, ранг вариограммы R статистически надежно связан с размерами тел L , несмотря на вариации

песчанности (количества тел). Погрешности оценки величины R составляют около 25%. Это дает возможность использования статистических данных по размерам тел, собранных по обнажениям, при индикаторном моделировании. Для русловых объектов также существует возможность оценки характеристик русел (амплитуда, извилистость) на основе вариограммного анализа. Следует отметить, что такие оптимистичные результаты были получены при одинаковых размерах тел и нулевом уровне шума. Оценка влияния различия тел по размерам, ориентации и при различном уровне шума будет сделана в следующих работах.

Список литературы

1. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоestatистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
2. Дойч К.В. Геоestatистическое моделирование коллекторов. М.–Ижевск: ИКИ, 2011. 400 с.
3. Матерон Ж. М. Основы прикладной геоestatистики. М.: Мир, 1968. 408 с.
4. Дюбрьоль О. Геоestatистика в нефтяной геологии. М.–Ижевск: ИКИ, 2009. 256 с.

Variogram analysis of geological bodies

UDC 551

Authors:

Konstantin E. Zakrevskiy — Ph.D., chief specialist¹; kezakrevskiy@rosneft.ru

Viktor L. Popov — senior researcher²; PopovVL@tomsknipi.ru

¹JSC "NK "Rosneft", Moscow, Russian Federation

²JSC "TomskNIPIneft", Tomsk, Russian Federation

Abstract

Synthetic geological models are used to obtain the results which are presented in the paper. The methodology of creation of that geological models and variation of its source data are described. The influence of variation of the source data (bodies' size and number) on the results of statistical estimation of reservoir parameters was analyzed.

Materials and methods

Numerical calculations in synthetic geological models, object modeling, indicator modeling, multi-point statistics.

Results

It was found that variogram range can be smaller than bodies' size due to cutting bodies

by model boundaries. This effect is significant in a model when bodies size exceed half of a model size in that direction.

On the other hand, variogram range can be larger due to influence of clusterization of bodies in a model. This effect more significant in models with low number of bodies (low NTG). Variogram curve shape is greatly affected by model NTG.

It should be noted that model size has significant effect on the variability of statistical parameters. It is a result of discrete model nature. When the bodies size is comparable to cell size it results in upward bias in variability.

Conclusions

Variogram range is strongly related with size of bodies in shallow marine facies which can be

represented as cubes and spheres. The body size estimation error is approximately 25%. It permit using in indicator modeling the data of the statistical analysis of the bodies sizes which are obtained from outcrops. Statistical parameters which are related with channel geometry (sinuosity, wave amplitude, wave length) were founded.

It should be noted that this results were obtained with zero level of statistical noise. The influence of statistical noise will be studied in future work.

Keywords

variogram, range, distance, variability, NTG, geometrical dimensions of bodies, realizations

References

1. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: theory and practice]. Moscow: Nauka, 2010, 327 p.
2. Doych K.V. *Geostatisticheskoe modelirovanie*

kollektorov [Geostatistical modeling of reservoirs]. Moscow–Izhevsk: ICI, 2011, 400 p.

3. Matheron Zh. M. *Osnovy prikladnoy geostatistiki* [Fundamentals of Applied

Geostatistics]. Moscow: Mir, 1968, 408 p.

4. Dyubryul' O. *Geostatistika v nefyanoy geologii* [Geostatistics in Petroleum Geology]. Moscow–Izhevsk: ICI, 2009, 256 p.

19-я международная специализированная выставка

ЭНЕРГЕТИКА

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

13-15
МАРТА

18-й международный симпозиум
«Энергоресурсоэффективность и энергосбережение»

КАЗАНЬ
2018



12+



420059, г. Казань, Оренбургский тракт, 8
Тел.: (843) 202-29-07, 202-29-92 (горячая линия),
E-mail: expokazan@mail.ru, www.expoenergo.ru



КАЗАНСКАЯ
ЯРМАРКА