

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.41-54>

УДК 622.276.1/4.001.57

## **Топология в описании геологической неоднородности как способ оценки коэффициента охвата**

*Баннов А.А., Пупков Н.В.*

*ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия*

## **Topology in the geological heterogeneity case as a method of estimating the displacement coverage factor**

*A.A. Bannov, N.V. Pupkov*

*LLC «Tyumen Petroleum Research Center», Tyumen, Russia*

**E-mail: [aabannov@tnnc.rosneft.ru](mailto:aabannov@tnnc.rosneft.ru)**

**Аннотация.** Универсальная, оперативная и качественная оценка эффективности выбранной системы разработки, включающая в себя учёт геологической неоднородности, является одной из нерешенных задач при планировании разработки.

Характер геологического строения и условий осадконакопления оказывает влияние на достижимый коэффициент охвата. Существующие статические методики проводят оценку извлечения нефти без цифрового аналога пространственной неоднородности системы, в то время как геолого-гидродинамические модели позволяют найти желаемый параметр только при помощи длительного многочисленного расчёта. Таким образом, ставится задача нахождения коэффициента охвата при помощи современной методики описания пространственной неоднородности с привлечением способов нахождения многопараметрических зависимостей.

**Ключевые слова:** *топологические характеристики, коэффициент охвата, машинное обучение*

**Для цитирования:** Баннов А.А., Пупков Н.В. Топология в описании геологической неоднородности как способ оценки коэффициента охвата//Нефтяная провинция.-2021.-№1(25).-С.41-54. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.41-54>

**Abstract.** Universal, operational and qualitative performance assessment of a selected development system, which can take into account geological heterogeneity, is one of unsolved problems in reservoir development planning.

A geological structure nature and sedimentation conditions exert influence on achievable sweep efficiency. On the one hand, existing static methods evaluate oil recovery without

a digital analog of the system spatial heterogeneity. On the other hand simulation allows finding the desired parameter through long-term numerous calculations. Thus, the task of finding the sweep efficiency using a modern technique for describing spatial heterogeneity and for finding multivariable dependencies is set.

**Key words:** *topological characteristics, sweep efficiency, machine learning*

**For citation:** A.A. Bannov, N.V. Pupkov Topologija v opisanih geologicheskoi neodnorodnosti kak sposob ocenki koeficienta ohvata [Topology in the geological heterogeneity case as a method of estimating the displacement coverage factor]. Neftyanaya Provintsiya, No.1(25), 2021. pp.41-54. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.41-54> (in Russian)

Существует множество методик оценки коэффициента охвата, каждая из которых имеет свои особенности. Основоположниками подходов для определения вышеупомянутой важнейшей характеристики в области разработки пластов являются В.А. Бадьянов, Л.С. Бриллиант, Н.М. Закомалдина, В.М. Ревенко, Соколов С.В., Р.М. Курамшин, А.Н. Юрьев и др., предложившие множество методов, основанных на введении параметров элемента неоднородности, аппроксимации песчаности, создании функциональных зависимостей и др. особенностях для расчёта коэффициента охвата.

Стоит также отметить одну из работ Юрьева А.Н., где доказано, что такие параметры как неоднородность коллектора по проницаемости, подвижность нефти и воды, поршневое и не поршневое вытеснение влияют только на темпы добычи нефти, но не определяют конечную нефтеотдачу.

Многовариантные адаптационные расчёты ГДМ позволяют оценить технико-экономические характеристики пласта с учётом пространственной фильтрационно-ёмкостной неоднородности. Однако статистические методы дают оценку коэффициенту охвата гораздо быстрее. Тем не менее, статистическая оценка базируется на конкретных условиях и не учитывает пространственную неоднородность.

Таким образом, возможность оценить коэффициент охвата по не изменяющимся характеристикам до проведения гидродинамического моде-

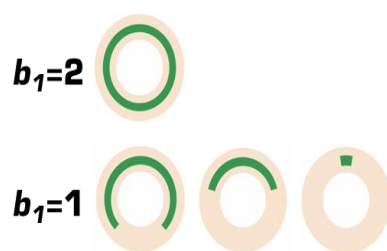
лирования способно сэкономить время и позволит учесть, связанные с неоднородностью, риски в планировании и мониторинге разработки нефтегазовых месторождений.

Выбор оптимальной сетки расположения скважин, на основе которого оценивается соответствующий прогнозный уровень добычи нефти и закачки жидкости, должен проводиться при наличии количественной оценки неоднородности геологического строения месторождения. Такой оценкой могут послужить топологические характеристики трёхмерных тел.

Топология - наука, изучающая непрерывность и связанность объектов. В топологии рассматриваются деформации, происходящие без разрывов и склеиваний.

Пространственную неоднородность системы можно описать при помощи топологических параметров, так называемых чисел Бетти  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , которые характеризуют, соответственно, число связанных в модели тел, количество замкнутых комплексов и количество включений в телах [1].

В отличие от геометрии, в топологии не рассматриваются метрические свойства объектов. Например, с точки зрения топологии, кружка и бублик (тор) — одинаковы, потому как имеют одинаковые числа Бетти. Наглядным примером может послужить рис. 1, на котором изображены четыре тора с включениями. Для данной системы нулевое число равно четырём (четыре обособленных тела), как и второе число (четыре включения). Однако первое число будет равно двум только для одного из торов, потому как замкнутым комплексом является комплекс, который нельзя стянуть в точку, как это сделано на примере остальных 3-х торов.



*Рис. 1. Первое число Бетти на примере тора с включениями*

Обычно, в топологии имеют дело с непрерывными объектами и для того, чтобы оценить топологические характеристики 3-х мерных дискретных геологических моделей был создан алгоритм [1]. Далее приводится краткое описание методики алгоритма.

Алгоритм берёт начало с получения нулевого числа Бетти. Анализируется геологическая модель, и, при помощи критериев отсечения, отделяются тела с коллекторскими свойствами от прочих. Алгоритм производит сканирование пространства полученного куба до тех пор, пока не будет найдена первая ячейка, соответствующая коллектору. После этого цикл создает линейно связанный клеточный комплекс, в котором любые два куба соединяются последовательностью ячеек, соединенных между собой только по общей грани (Рис. 2 а), в остальных случаях (Рис. 2 б, Рис. 2 с) кубы считаются не связанными. Этот процесс повторяется для каждого элементарного куба в геологической модели, что позволяет алгоритму найти все тела и произвести их сортировку по количеству связанных ячеек.

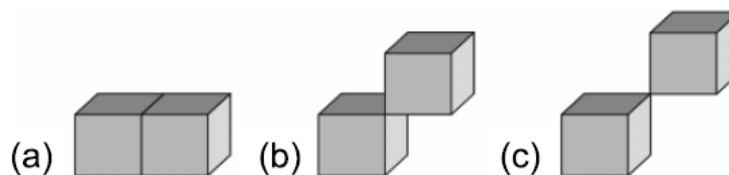
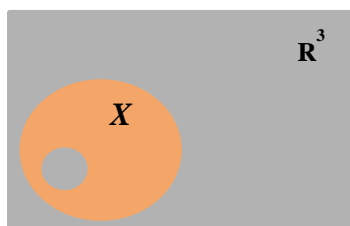


Рис. 2. а, б, с – виды взаимоотношения элементарных кубов в модели

Далее, в области каждого выделенного тела рассматриваются его включения, которые и представляют собой второе число Бетти. Для каждого тела включения суммируются. Простейшим примером данного процесса может служить рис. 3, на котором в трёхмерном пространстве  $R^3$  обнаружено песчаное тело  $X$  с одним включением в нём. Таким образом, для этого тела  $b_2=1$ .

Для того чтобы вычислить последнее число Бетти ( $b_1$ ), в данном алгоритме предлагается вычислить Эйлерову характеристику. В топологии теория Морса является самым распространенным подходом для вычисле-

ния данного параметра [1]. Теория Морса - математическая теория, связывающая алгебро-топологические свойства топологических тел и поведение гладких функций на них в критических точках. При помощи неё Эйлерова характеристика определяется посредством вычисления критических точек на гладкой функции.



*Рис. 3. Изображение второго числа Бетти на примере песчаного тела X*

Однако, дискретный куб песчаности представляющий собой последовательность элементарных кубов, которым присвоены нули и единицы, соответствующие глинам и коллекторам, не является гладкой функцией. Чтобы посчитать Эйлерову характеристику для 3-х мерных геологических тел, в алгоритме используется дискретные аналоги гладких функций [1], индексы критических точек которых соответствуют нескольким шаблонам специально введенной окрестности точки.

Вычисленная при помощи теории Морса Эйлерова характеристика с другой стороны определяется альтернативной суммой чисел Бетти. В [1] также приводится доказательство этого утверждения. Таким образом, после вычисления перечисленных ранее характеристик вычисляется первое число Бетти при помощи уравнения 1.

$$\begin{aligned} \chi &= b_0 - b_1 + b_2 \\ b_1 &= b_0 - \chi + b_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Численный алгоритм нахождения топологических характеристик и его реализация были предоставлены в [2]. Программный модуль принимает данные типа «GRDECL», представляющие собой последовательные значения элементарных кубов.

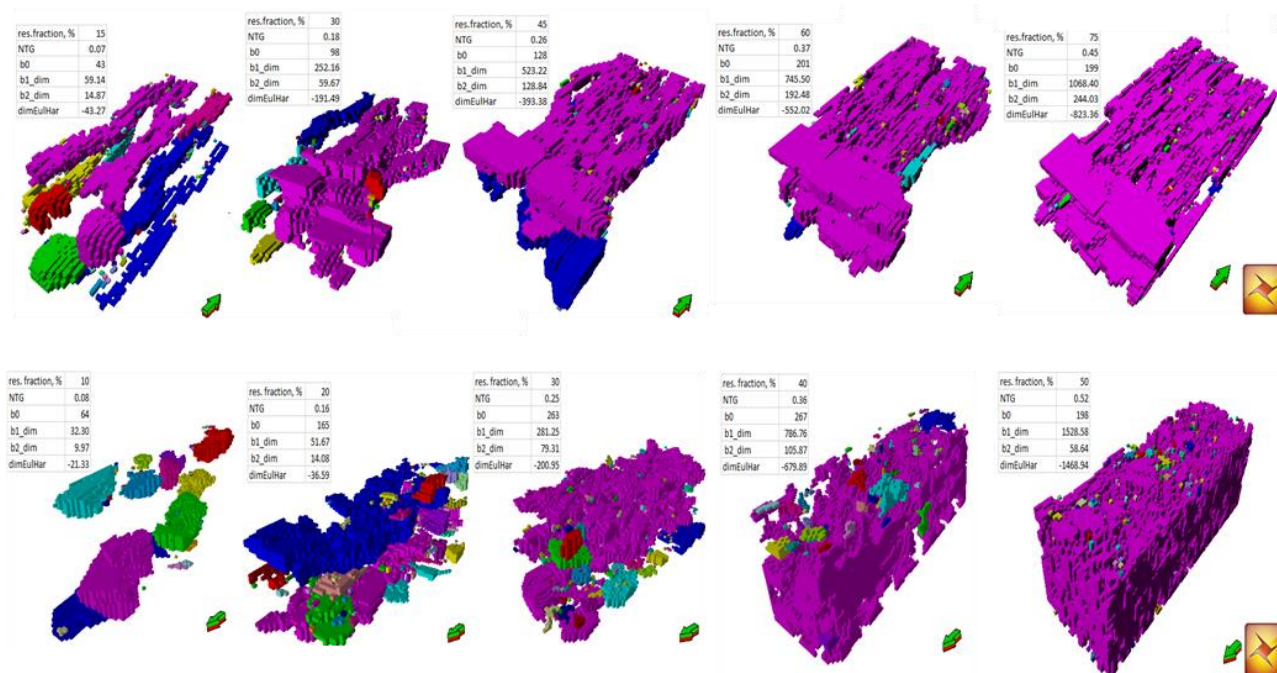
## Получение модели расчёта $K_{охв}$ .

Для определения влияния неоднородности тел на  $K_{охв}$  были задействованы геологическое и гидродинамическое моделирование и методы машинного обучения.

Для того, чтобы оценить  $K_{охв}$  в зависимости от пространственной неоднородности, была построена база данных, состоящая из параметров синтетических моделей, построенных с не изменяющимися факторами, влияющими на коэффициент вытеснения, а именно проявлением капиллярных сил и различным минералогическим составом пород.

Существует три основные группы обстановок осадконакопления: континентальная, переходная и морская. Так как в этой работе рассмотрено влияние геологической неоднородности коллекторов, для этого были выбраны 2 обстановки осадконакопления: дельтовый комплекс – как пример относительно сообщающейся системы тел переходного типа и меандрирующие реки – как пример относительно разобщённой системы тел, принадлежащей к типу континентальных обстановок. При помощи объектного моделирования созданы множество геологических моделей с изменяющейся долей тел.

Модели отражают основные особенности седиментации (Рис. 4). В дельтовом комплексе основными коллекторами являются распределительные каналы и устьевые бары с распределением пористости, уменьшающейся вниз по разрезу [4]. Размер моделей с синтетическими дельтовыми комплексами равен 2000х4000х40 м. В меандрирующих реках лучшими коллекторами являются прирусловые бары, с увеличением пористости вниз по разрезу [3, 5]. Размер моделей с синтетически построенными меандрирующими реками равен 1500х4500х50 м. Для моделирования пористости в обоих видах моделей были выбраны ранги, характерные для основных тел-коллекторов [3, 4, 5].



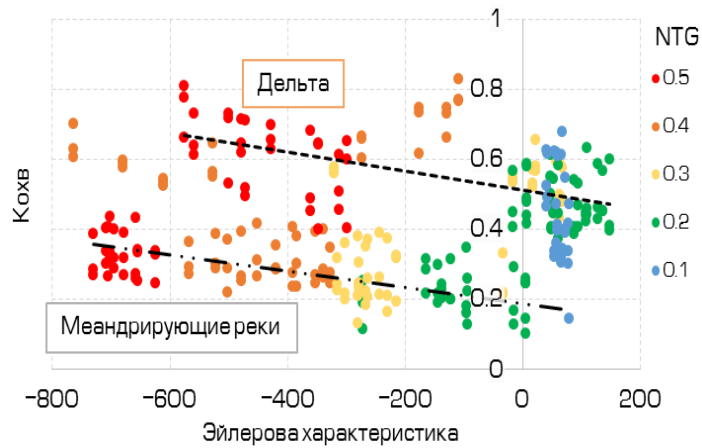
**Рис. 4. Синтетические модели разных обстановок осадконакопления**

Вверху представлены модели дельтового комплекса, снизу – меандрирующих рек. Слева направо смоделировано увеличение доли тел. В таблицах рядом с каждой моделью отображены –доля тел, песчанность, числа Бетти и Эйлера характеристика.

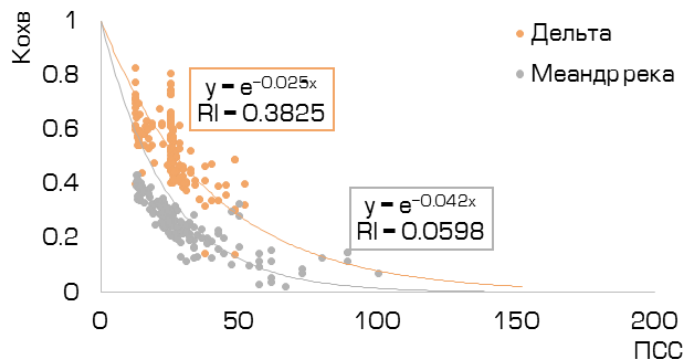
Проницаемость задавалась в прямом пересчёте от пористости и была распределена в диапазоне от 5 до 150 мД. Моделировалась чистая нефтяная зона.

Также использовалась модель нелетучей нефти “Blackoil”, так как выделившийся газ влияет на эффективность вытеснения и, соответственно, на оценку основных технико-экономических показателей разработки.

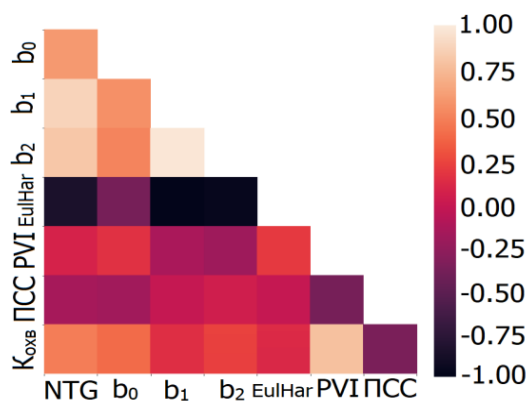
Полученные результаты моделирования представлены в виде зависимости Эйлеровой характеристики и ПСС на коэффициент охвата (Рис. 5-6). Также построена матрица корреляций параметров друг от друга (Рис. 7). Отмечено, что Эйлерова характеристика имеет прослеживаемый тренд для моделей обеих обстановок осадконакопления (Рис. 5). Также различаются тренды для ПСС и Кохв для различных условий седиментации.



**Рис. 5. Зависимость Эйлеровой характеристики от коэффициента охвата.**  
 Каждая точка соответствует расчёту на ГДМ (300 расчётов на проведённых на 100 геологических моделях).



**Рис. 6. Влияние плотности сетки скважин на  $K_{охв}$  для различных моделей обстановок осадконакопления**



**Рис. 7. Матрица корреляций геологических и гидродинамических параметров**  
 \*PVI – параметр характеризующий поровый объём промытый водой, при котором останавливался расчёт моделей в момент достижения всех скважин 98% обводнённости или  $1 \text{ м}^3/\text{день}$  добычи нефти; NTG - песчанистость



Наиболее значимые параметры, влияющие на коэффициент охвата по результатам моделирования, являются закаченный поровый объем и плотность сетки скважин. Теоретически считается, что чем больше в системе обособленных тел ( $b_0$ ) и включений в них ( $b_2$ ), тем меньше должен быть коэффициент охвата и зависимость должна быть обратно пропорциональной. Однако, составленная матрица корреляций указала, что в данном наборе синтетических параметров коэффициент для песчаности сравним с коэффициентом, учитывающим обособленные тела ( $b_0$ ), и имеет прямую зависимость с коэффициентом охвата. Это связано с тем, что в моделируемых системах при увеличении доли тел в объеме модели растут большинство статических параметров.

Таким образом, увеличение песчаности коррелирует с увеличением всех чисел бетти. Эйлерова характеристика же, как показывает зависимость от коэффициента охвата (Рис. 5) и матрица корреляций, имеет обратную связь с коэффициентом охвата, что, теоретически, подтверждается, так как увеличение протоковых каналов ( $b_1$ ), сопровождающееся уменьшением обособленных тел и включений в них, в альтернативной сумме создают отрицательное значение эйлеровой характеристики (ур-е 1).

Получив базу данных для анализа, требовалось найти многопараметрическую зависимость от представленных параметров на коэффициент охвата. В настоящее время являются популярными для этой задачи методы машинного обучения.

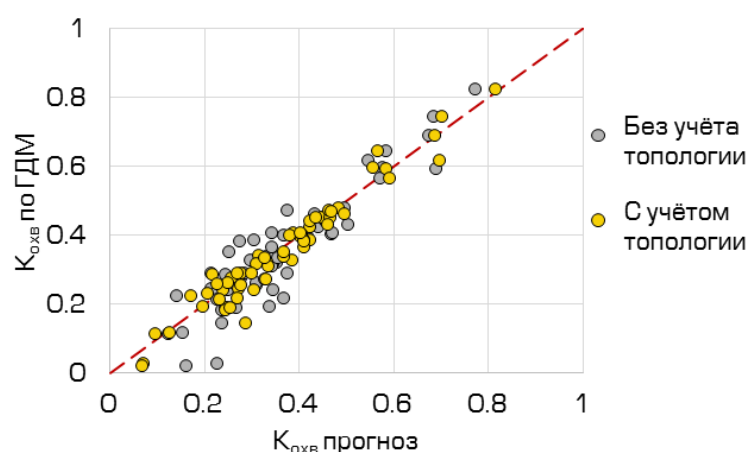
### **Применение машинного обучения для оценки $K_{охв}$**

Одна из задач методов МО состоит в поиске предсказывающей модели по имеющейся базе данных. В данной работе для данной задачи использовался градиентный бустинг.

Градиентный бустинг – специальная техника последовательного построения модели предсказывающих функций, в которой функция потерь

становится минимальной при помощи градиентного спуска. Суть метода заключается в построении специальных наборов предсказателей (функций, нацеленных предсказывать по подвыборкам обучающих данных), и улучшении получившегося набора путём усложнения предсказателей, дающих ошибочный результат. В градиентном бустинге используются неглубокие деревья решений. Метод позволяет уменьшить влияние сильной корреляции между  $K_{\text{оХВ}}$  и параметрами, показавшими в матрице корреляций наибольший результат.

Выделив набор признаков и предсказываемую величину ( $K_{\text{оХВ}}$ ) было проведено обучение модели прогноза (80% объёма базы данных) и тестирование (на 20% объёма базы данных). Результаты показали хорошее совпадение (Рис. 8, табл. 1) при участии топологических параметров.



**Рис. 8. Оценка качества прогнозирования на синтетических моделях с учетом топологии (желтый цвет) и без учета топологии (серый цвет) на тестовой выборке (60 точек).**

Таблица 1

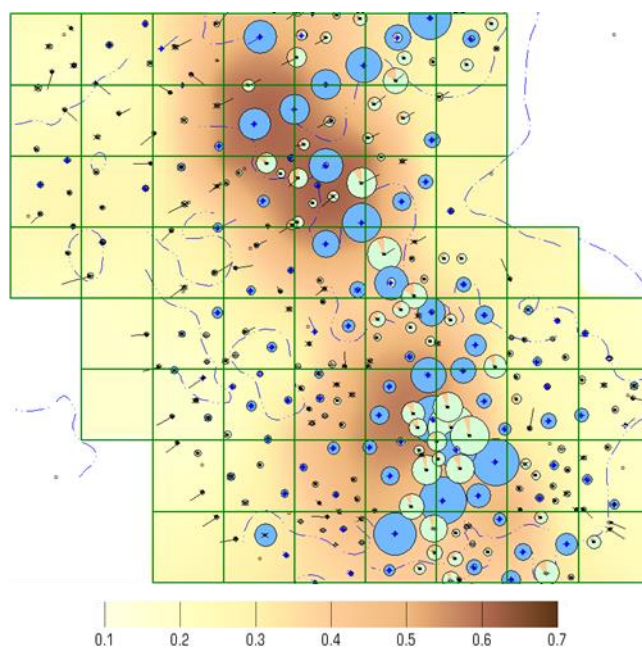
**Качество прогнозирования**

Критерий	Без учёта топологии	С учётом топологии
$R^2$	0,73	0,94
Ср. абс. ошибка	0,078	0,034

## Применение на модели реального месторождения

В качестве примера применимости метода было выбрано Кошильское месторождение, эксплуатируемое с 1991г. В 2019г. методами объектного моделирования была получена геологическая модель, представляющая собой модель 2-х обстановок осадконакопления – русловый канал и шельфовая зона.

Анализ позволил создать карту прогнозируемого  $K_{охв}$  (Рис. 9) путём разделения геологической модели на секторы 2000х2000 м. Также метод позволил оценить общий  $K_{охв}$  по месторождению 0,44 (в нулевом варианте ПТД  $K_{охв}$  равен 0,7). Стоит отметить, что на месторождении присутствует проблема быстрого обводнения скважин и текущий  $K_{охв}$  равен 0,31.



*Рис. 9. Карта прогнозируемого  $K_{охв}$  на карте накопленных отборов*

Применимость метода имеет место на всех стадиях разработки месторождения (Табл. 2). Однако ввиду малой изученности на первой стадии разработки месторождения геологическая модель может иметь большое различие с реальной системой неоднородности “под землей”, а то и вовсе после разведки и при бурении основного фонда скважин отсутствовать. С другой стороны, современные методы обработки сейсмических данных

позволяют получать кубы песчанности, что даёт возможность, при наработке статистики по различным фаціальным обстановкам, использовать данную методику для получения  $K_{\text{охв}}$  после стадии разведки. На поздних стадиях метод может быть полезен для дополнительного сравнения с результатами ГДМ и характеристик вытеснения.

Таблица 2

**Применимость метода**

	Стадии разработки			
	I	II	III	IV
Изученность	Низкая	Средняя	Высокая	
Примечание	Оценочный результат	Характеристики вытеснения не работают	Проверка достижимости утвержденного $K_{\text{охв}}$	
Точность результата	+ -	+	+	+

Получен способ определения  $K_{\text{охв}}$  быстрым путём, не уступающим по качеству расчёт на ГДМ. Помимо этого возможно применение метода в отсутствии данных о добыче, на любой стадии разработки.

Метод может быть эффективен в управлении разработкой месторождения при построении карт неоднородности/ $K_{\text{охв}}$  для проектирования эффективного комплекса мероприятий.

Дальнейшее развитие заключается в наработке статистики по различным фаціальным обстановкам, опробовании результатов метода при использовании сейсмических данных, составление матрицы выбора  $K_{\text{охв}}$ , промышленной разработки программного продукта.

**Список литературы**

1. Базайкин Я.В, Тайманов И.А. О численном алгоритме расчета топологических характеристик трехмерных тел // Computational Mathematics and Mathematical Physics – Pleiades Publishing, Ltd. (Плеадес Паблишинг, Лтд) – М, 2013, – № 53, С. 523–530
2. Базайкин Я.В, Байков В.А., Тайманов И.А., Яковлев А.А. Численный анализ топологических характеристик трехмерных геологических моделей нефтегазовых месторождений // Математическое моделирование – М, 2013, – № 25(10), С.19–31.

3. Martin R Gibling. 2006. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, v. 76, 731–770
4. D. Reynolds. 1999. Dimensions of Paralic Sandstone Bodies. *AAPG Bulletin*, V. 83, No. 2, P. 211–229
5. Brian J. Willis, Hong tang. 2010. Three-dimensional connectivity of point-bar deposits. *Journal of Sedimentary Research*, v. 80, 440–454.

### References

1. Bazaikin, YV, Taimanov, IA: On a numerical algorithm for computing topological characteristics of three-dimensional bodies *J Comput Math Math Phys (Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki)* 53, 523–530 (2013) (in Russian)
2. Bazaikin, YV, Baikov, VA, Taimanov, IA, Yakovlev, AA: Numerical analysis of topological characteristics of three-dimensional geological models of oil and gas fields *Math Model* 25(10), 19–31 (2013) (in Russian)
3. Martin R Gibling. 2006. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, v. 76, 731–770 (in English)
4. D. Reynolds. 1999. Dimensions of Paralic Sandstone Bodies. *AAPG Bulletin*, V. 83, No. 2, P. 211–229 (in English)
5. Brian J. Willis, Hong tang. 2010. Three-dimensional connectivity of point-bar deposits. *Journal of Sedimentary Research*, v. 80, 440–454 (in English)

### **Сведения об авторах**

*Баннов Анатолий Алексеевич*, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»  
Россия, 625000, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1  
E-mail: aabannov@tnnc.rosneft.ru

*Пупков Николай Владимирович*, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»  
Россия, 625000, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1  
E-mail: nvpupkov@tnnc.rosneft.ru

### **Authors**

*A.A. Bannov*, LLC «Tyumen Petroleum Research Center»  
79/1, Osipenko st., Tyumen, 625000, Russian Federation  
E-mail: aabannov@tnnc.rosneft.ru

*N.V. Pupkov*, LLC «Tyumen Petroleum Research Center»  
79/1, Osipenko st., Tyumen, 625000, Russian Federation  
E-mail: nvpupkov@tnnc.rosneft.ru

*Статья поступила в редакцию 20.01.2021*

*Принята к публикации 13.03.2021*

*Опубликована 30.03.2021*