

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Шестаков', is written over a faint, light blue oval stamp.

Шестаков Валерий Владимирович

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ
ОБЪЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ
СРЕДЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Гергет Ольга Михайловна

доктор технических наук, доцент, профессор
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет

Официальные оппоненты:

Темкин Игорь Олегович

доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой автоматизированных систем управ-
ления, Национальный исследовательский тех-
нологический университет «МИСиС»

Тимофеев Владимир Семенович

доктор технических наук, доцент, Новосиби-
рский государственный технический универси-
тет, г. Новосибирск

Защита состоится 26.04.2023 г. в 15 часов 00 мин на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.15 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: Россия, 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан "___" _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.15
д.т.н.



А.Я. Пак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Параметры геологической среды играют важную роль при разведке и разработке месторождений углеводородов. Они несут в себе информацию о составе горных пород, их коллекторских свойствах, миграции флюидов и т. д. Численные значения рассматриваемых параметров могут быть получены путем пересчета каротажных кривых с помощью общеизвестных петрофизических закономерностей или напрямую с помощью методов геофизических исследований скважин. *Геофизические исследования скважин* (ГИС) включают в себя комплекс каротажных методов, направленных на изучение геологического строения земных недр и на измерение физических параметров пород вдоль ствола скважины.

Ввиду того, что ГИС могут быть проведены лишь в некотором околоскважинном пространстве, существует практическая необходимость моделирования параметров геологической среды в пределах всего месторождения. Методы моделирования, разработанные на сегодняшний день, условно делятся на две группы: использующие для прогноза только данные ГИС; основанные на комплексировании данных 3D сейсморазведки, в частности полученные *методом общей глубинной точки* (МОГТ), и ГИС. Первая группа методов применяется в условиях густо разбуренного месторождения. Вторая группа применяется в условиях редкой нерегулярной сетки скважинных измерений и привлекает данные сейсмических наблюдений в пределах всего месторождения. Для решения задач прогноза наибольшее развитие и применение в последнее время получили геостатистические методы, нейронные сети и инверсионные методы.

Несмотря на большую эффективность методов второй группы, они также обладают рядом существенных недостатков. Ввиду этого, актуальной является разработка новых, более совершенных методов. Метод, предлагаемый в рамках данной работы, относится к классу геостатистических, однако в отличие от классических геостатистических аналогов, не требует введения предположения об однородности моделируемого параметра и использует сейсмические атрибуты для оценки пространственной ковариации. Также предлагаемый метод позволяет осуществлять оценку качества рассчитываемых моделей в любой точке исследуемого объема.

Целью данной работы является разработка геостатистического метода и алгоритмов моделирования объемных сред, обеспечивающих высокую разрешающую способность результатов и позволяющих учитывать неоднородность и анизотропность геологической среды.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие исследовательские **задачи**:

- Провести обзор методов наземной сейсморазведки и геофизических исследований скважин; методов и алгоритмов построения объемных моделей геологической среды.

- Разработать метод, лишенный недостатков рассмотренных аналогов и позволяющий оценивать точность моделей в любой точке исследуемого объема.
- На основании предложенных методов, сформулировать и программно реализовать алгоритмы построения объемных моделей геологической среды; рассмотреть возможность оптимизации и распараллеливания алгоритмов.
- Провести оценку эффективности разработанных алгоритмов.

Методы исследования. Выполненные в диссертационной работе исследования основаны на методах геостатистики, линейной алгебры, математического анализа, математической статистики, а также численных и аналитических экспериментах.

Научная новизна

1. Разработан метод кригинга эквивалентных моделей для объемного моделирования анизотропной и неоднородной геологической среды. Метод основан на формировании системы линейных уравнений по дополнительному параметру и подстановке найденных весовых коэффициентов в уравнение кригинга.
2. Предложен метод оценивания точности моделирования на основе множителя Лагранжа, введенного в уравнение кригинга для обеспечения несмещенности оценки.
3. Предложен метод формирования коэффициентов системы уравнений кригинга эквивалентных моделей, основанный на использовании скользящего окна и позволяющий воспроизводить в модели реальную геометрию геологического объекта.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается аналитическими и численными экспериментами, воспроизводимостью всех приведенных экспериментов; соответствием результатов экспериментов входным данным.

Практическая значимость

- Рассчитываемые объемные модели обладают горизонтальной разрешающей способностью сейсмических данных и вертикальной разрешающей способностью данных геофизических исследований скважин. Тем самым они позволяют с большей достоверностью проследивать нефтегазоносные коллектора и проводить оценку сложных геологических процессов.
- Аналитически и экспериментально доказано, что предложенный метод «кригинг эквивалентных моделей» эффективнее известного геостатистического метода «кригинг». В отличие от существующих аналогов, предлагающие оценивать коридор ошибок или кросс-валидацию для анализа ошибок, разработанный метод позволяет получать оценку погрешности в каждой точке моделируемого объема.
- Разработаны алгоритмы адаптации метода кригинга эквивалентных моделей к структурным факторам геологической среды. Рассматривается возможность распараллеливания и оптимизации адаптированных алгоритмов. В частности,

показано, что распараллеливание можно осуществлять относительно некоторого смещения Δh для модели с согласованной геометрией границ кровли и подошвы, и относительно коэффициента пропорциональности ∂h для модели с несогласованной геометрией.

- Построены алгоритмы и разработан комплекс программ с параллельной обработкой данных, базирующийся на предложенных в работе оригинальных моделях и методах, обеспечивающий сокращение временных затрат и увеличение точности прогноза параметров среды.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод кригинга эквивалентных моделей позволяет построить объемную модель неоднородной и анизотропной геологической среды за счет формирования коэффициентов системы уравнений из ковариационных свойств дополнительного параметра, измеренного по более частой сетке наблюдений.
2. Показано, что погрешность кригинга эквивалентных моделей зависит не от удаления от точек измерений, а от достаточности множества исходных данных и прямо пропорциональна множителю Лагранжа.
3. Предложенный метод формирования коэффициентов системы уравнений, основанный на использовании скользящего окна, перемещающегося с учетом особенностей строения геологического объекта, позволяет воспроизводить реальную геометрию геологических пластов в модели.

Реализация и внедрение. Разработанные методы и алгоритмы построения объемных моделей геологической среды использовались при выполнении ряда работ, проводимых в рамках договоров подряда и государственных контрактов:

1. Государственный контракт № 81. Создание региональной геологической модели, методической и технологической базы по изучению и освоению трудноизвлекаемых запасов из отложений палеозоя Нюрольской структурно-фациальной зоны (Томская и Новосибирская области).
2. Договор подряда № 73. Переинтерпретация сейсморазведочных материалов МОГТ 3D на Усть-Пуглалымском лицензионном участке, Западно-Ключевском и Глухарином месторождениях.
3. Договор подряда № 255. Уточнение моделей залежей нефти пластов Б₉, Ю₁ и подготовка материалов к обоснованию заложения эксплуатационных скважин на Конторовичском (110-М) лицензионном участке.

Результаты диссертационной работы апробированы и внедрены в производственный процесс ООО Научно-аналитического центра «Недра».

Апробация. Представляемая работа прошла апробацию на следующих симпозиумах, семинарах, воркшопах и конференциях: XVI всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 28-30 октября 2015 г, Красноярск; 54-й Международная научная студенческая конференция МНСК-2016, 16-20 апреля 2016 г, Новосибирск; XVII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 2 ноября 2016 г., Новосибирск; XIV Меж-

дународная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь и современные информационные технологии", 7-11 ноября 2016 г, г. Томск; XXI Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. 3-7 апреля 2017 года, Томск; 5-я международная конференция «Геобайкал 2018», Иркутск, 11-17 августа 2018 г, Иркутск; XXII Международный симпозиум имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, 2-7 апреля 2018 г, Томск; II и III международные геолого-геофизические конференции и выставки «Современны технологии изучения и освоения недр Евразии» ГеоЕвразия 2019, 5-7 февраля 2019, 3-6 февраля 2020, Москва.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 17 работах: четыре публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, из них – две публикации проиндексированы в базах научного цитирования Scopus и Web of Science; одно свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ; 12 публикаций в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 127 наименований и двух приложений. Работа изложена на 148 страницах и включает в себя 44 рисунка и три таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Введение. В данной части работы обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определена научная новизна, а также отражены практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Анализ методов моделирования геологической среды. Во многих областях науки и техники (инженерная, рудная, почвоведение, социальная медицина и т.д.) ставятся задачи анализа и прогнозирования пространственных данных, полученных по нерегулярной сетке наблюдений с однократным наблюдением. В настоящее время разработано большое количество методов решения таких задач, на основе детерминированного и стохастического подходов. В рамках моделирования геологической среды в качестве исходных данных эти методы используют результаты геофизических исследований скважин (ГИС) и результаты сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ).

Методы прямого пересчета предполагают наличие прямой функциональной зависимости между сейсмическими данными и параметрами среды, измеренными с помощью ГИС. На основании этой зависимости сейсмические данные пересчитываются непосредственно в параметры среды. Качество моделей, получаемых таким образом, определяется путем сопоставления оценок и реальных значений, измеренных в стволах скважин. Основной недостаток методов прямого пересчета

заклучается в сложной взаимосвязи сейсмических данных и параметров среды, которую невозможно описать единой функциональной закономерностью.

Геостатистическое моделирование осуществляется с учетом предположения о стационарности второго рода, в соответствии с которым корреляция между значениями параметра, измеренными в двух различных точках пространства, зависит от расстояния между этими точками. С увеличением расстояния корреляционная зависимость уменьшается. Использование предположения о стационарности второго рода позволяет осуществлять оценку пространственной корреляции прогнозируемого параметра с помощью вариограммы в любой точке пространства. Недостаток геостатистического подхода заключается в том, что на практике условие стационарности прогнозируемого параметра не соблюдается, ввиду чего рассчитываемые модели противоречат поведению своих реальных аналогов.

Нейросетевые методы предполагают наличие некоторой функциональной зависимости между сейсмическими данными и параметрами среды. В связи с этим они могут быть отнесены к методам прямого пересчета. Важной их особенностью является то, что в процессе обучения искусственные нейронные сети способны устанавливать сложные, нелинейные функциональные закономерности между сейсмическими данными и параметрами среды и дают существенно лучшие результаты в сравнении с обычными методами прямого пересчета.

Методы сейсмической инверсии считаются ведущими на сегодняшний день и имеют сложную классификацию. В общем случае, методы сейсмической инверсии базируются на двухступенчатом преобразовании следующего вида: *сейсмические данные* $\Rightarrow$ *акустический импеданс* $\Rightarrow$ *параметр среды*. Качество проведенной сейсмической инверсии проверяется путем сопоставления исходных и синтетических сейсмических данных. Синтетические данные, в свою очередь, получают путем свертки поля акустического импеданса с импульсом, извлекаемым в пределах целевого глубинного интервала. Вне этого интервала точность свертки падает, ввиду чего точность моделей снижается.

Вышеприведенные методы обладают рядом недостатков, существенно снижающих качество получаемых моделей: методы прямого пересчета, сейсмической инверсии и нейронных сетей являются аппроксимационными, а не интерполяционными; горизонтальная разрешенность геостатистических методов низка по сравнению с прочими рассмотренными методами, при этом качество получаемых моделей можно оценить лишь методом кросс-валидации, либо экспертной оценкой.

Глава 2. Геостатистические методы построения объемных моделей. Метод моделирования геологической среды, предлагаемый в диссертации, использует геостатистический подход. Классическая геостатистическая модель может быть представлена в следующем виде:

$$\hat{F}(x, y, h) = \sum_{i=1}^N v_i(x, y, h) f_i(h), \quad (1)$$

где x, y, h – пространственные координаты и глубина; $v_i(x, y, h)$ – весовая функция

параметра, измеренного в i -й точке измерений; $f_i(h)$ – известные значения параметра ГИС в i -й точке измерений; $\hat{F}(x, y, h)$ – прогнозируемое значение параметра ГИС; N – количество точек измерений. Для соблюдения условия несмещенности оценки (1), на весовые функции накладывается ограничение:

$$\sum_{i=1}^N v_i(x, y, h) = 1. \quad (2)$$

Численные значения весовых функций получаются путем решения системы линейных алгебраических уравнений следующего вида:

$$C^f(h) \cdot V(x_0, y_0, h) = Co^f(x_0, y_0, h), \quad (3)$$

где $C^f(h)$ – матрица ковариационных функций $C_{ij}^f(h) = M[f(x_i, y_i, h)f(x_j, y_j, h)] = c_{ij}$ известных значений свойства среды; $V(x_0, y_0, h)$ – матрица весовых функций, $Co^f(x_0, y_0, h)$ – матрица ковариационных функций $Co_i^f(x_0, y_0, h) = M[f_i(h)F^0(h)] = c_{i0}$ значений свойства среды в точках измерений и в точке прогноза $F^0(h) = F(x_0, y_0, h)$.

В классической геостатистике проблемой является то, что правая часть системы (3) неизвестна. Эта проблема решается путем замены ковариационных функций c_{ij} и c_{i0} на модель вариограммы. Вариограмма используется для описания пространственной корреляции и не зависит от значения пространственных координат, ввиду чего может быть рассчитана в любой точке исследуемого пространства (объема). Базируясь на вариограммах, геостатистические модели всегда дают сглаженное решение, не воспроизводящее вариабельность исходных данных. Последнее, очевидно, является недостатком, который может быть устранен путем привлечения дополнительных данных, измеренных по густой регулярной сетке (включающей в себя точки прогноза) и несущих в себе информацию о ковариационных свойствах реальной среды. В таком случае, ковариационные свойства не нужно оценивать с помощью вариограмм, т.к. они могут быть рассчитаны с привлечением дополнительного параметра.

В методе кригинга эквивалентных моделей предполагается, что ковариационные свойства, как свойства внутренней изменчивости или взаимосвязи, дополнительного параметра $A(x, y, h)$ и ковариационные свойства прогнозируемого параметра $F(x, y, h)$ идентичны, или хотя бы близки, т.к. измерены по одному и тому же объекту (см. рисунок 1). На основании этого предположения, модель среды в точке (x, y, h) записывается в виде взвешенной суммы:

$$\hat{F}_{\text{дк}}(x, y, h) = \sum_{i=1}^N w_i(x, y, h) f_i(h), \quad (4)$$

где $\hat{F}_{\text{дк}}(x, y, h)$ – оцениваемое значение параметра; $w_i(x, y, h)$ – весовые функции, рассчитанные по уравнению кригинга дополнительного параметра. Т.е. согласно выражению (4) оценка значения параметра в точке прогноза осуществляется на

основании численных значений весовых функций, полученных по дополнительным данным.

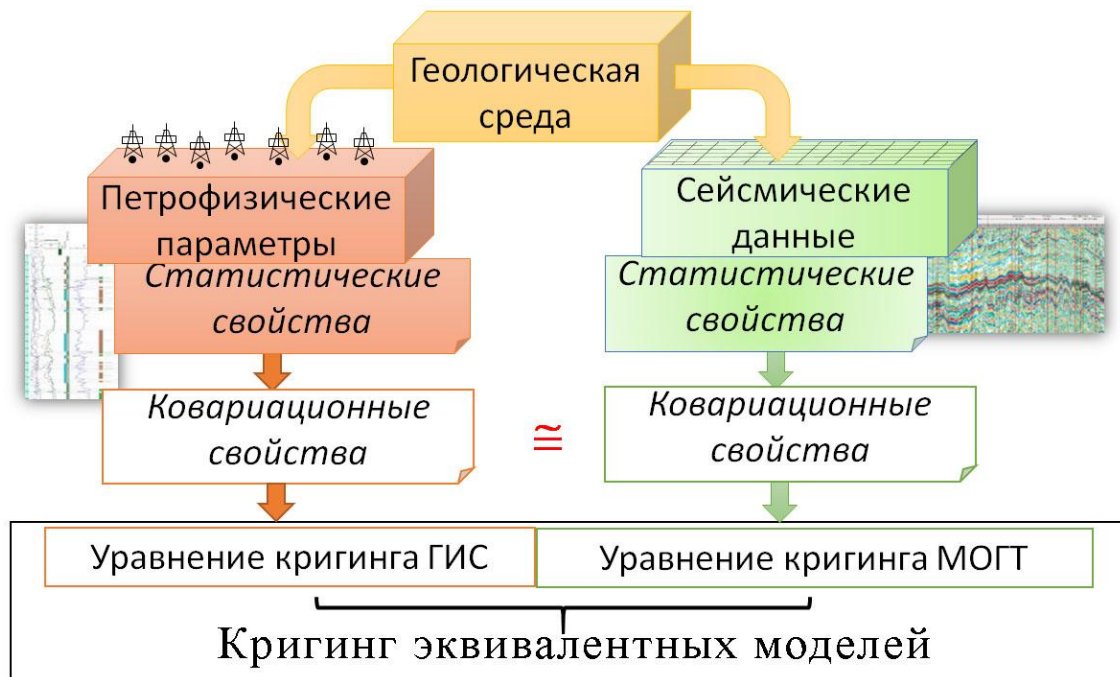


Рисунок 1 – Связь параметров среды и сейсмических данных

Метод расчета численных значений весовых функций для оценки (4) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений следующего вида:

$$C^a(h) \cdot W(x_0, y_0, h) = Co^a(x_0, y_0, h), \quad (5)$$

где элементы матрицы $C^a(h) - c_{ij}^a(h) = M[a_i(h)a_j(h)]$, соответствуют ковариациям дополнительного параметра $a(x_i, y_i, h)$ и $a(x_j, y_j, h)$; $W(x_0, y_0, h)$ – матрица весовых функций, полученных по данным дополнительного параметра; $Co^a(x_0, y_0, h) = M[a_i(h)A^0(h)]$ – ковариации дополнительного параметра в точках измерений и в точке прогноза.

Хотя сейсмическое поле является неоднородным и нестационарным процессом, в работе Ф.М. Гольцмана¹ было показано, что $A(x, y, h)$ в любой точке пространства является импульсным случайным процессом, для которого условие локальной стационарности допустимо в пределах длины волны λ . В связи с этим ковариацию можно вычислять путем осреднения в скользящем глубинном окне

$$c_{ij}^a(h) = M[a(x_i, y_i, h)a(x_j, y_j, h)] = \frac{1}{\lambda} \int_{h-\lambda/2}^{h+\lambda/2} a(x_i, y_i, \tau)a(x_j, y_j, \tau)d\tau. \quad (6)$$

Следовательно, если сейсмические данные определены в точке прогноза, численные значения весовых функций определяются по реальным данным и моделирование ковариационных свойств не требуется.

¹ Гольцман Ф. М. Статистические модели интерпретации. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1971. – 328 с.

Другая проблема классического геостатистического подхода заключается в неограниченности рассчитываемых значений весовых функций. Подобная неограниченность делает возможным получение физически нереального результата, что очевидно некорректно. В кригинге эквивалентных моделей проблема возникновения физически нереального результата решается путем наложения на весовые функции дополнительного ограничения:

$$w_i(x, y, h) \geq 0. \quad (7)$$

Очевидно, что при одновременном соблюдении (2) и (7) результат суммирования (4) не будет превышать пределов, определенных значениями исходных данных. Ввиду того, что (7) представляет собой неравенство, в явном виде добавить его в систему (5) невозможно. Поэтому поиск решения предлагается осуществлять итерационно с исключением из системы строк и столбцов тех слагаемых, которым соответствуют отрицательные весовые коэффициенты.

В итоге разработанный метод обладает двумя важными особенностями, которые в совокупности позволяют получать правдоподобные модели параметров среды:

- 1) метод является интерполяционным, т.е. он позволяет без искажений воспроизводить реальные данные в точках измерений;
- 2) в отличие от классических геостатистических методов метод кригинга эквивалентных моделей не требует введения гипотезы об однородности и в полной мере реализует неоднородную модель во всем прогнозируемом объеме.

Для анализа погрешностей кригинга эквивалентных моделей была введена общая статистическая модель среды с введением дополнительного и прогнозируемого параметра, представленная в виде линейных комбинаций следующего вида:

$$\begin{aligned} a_0(h) &= \hat{A}(h) + Q_a(h) = \sum_{i=1}^N w_i a_i(h) + \sum_{j=1}^M v_j^a \tilde{a}_j(h), \\ f_0(h) &= \hat{F}(h) + Q_f(h) = \sum_{i=1}^N v_i f_i(h) + \sum_{j=1}^M v_j^f \tilde{f}_j(h), \end{aligned} \quad (8)$$

где $Q(h)$ – отклонение параметра в точке прогноза от линейной комбинации известных значений параметра. Эту составляющую можно интерпретировать как недостающие (неизвестные) значения параметров. *Под достаточным множеством данных в работе будем подразумевать такое множество минимального объема, на основании которого можно с заданной точностью и в заданной точке восстановить параметры среды в виде линейной комбинации (4) данных из множества.*

С учетом того, что среднеквадратическая погрешность оценки (4) записывается в виде:

$$\sigma_{ДК}^2(x, y, h) = \psi^2(x, y, h) - \sum_{i=1}^N w_i(x, y, h) c_{i0}^a(x, y, h), \quad (9)$$

а также с учетом введенной модели (8), аналитически доказывается, что если множество исходных данных является достаточным в прогнозируемой точке (x, y, h) (для которой $Q(h) = 0$), то среднеквадратическая погрешность (9) оказывается нулевой:

$$\sigma_{\text{ЭК}}^2(x_0, y_0, h_0) = \sum_{i=1}^N w_i \sum_{j=1}^N w_j c_{ij}^a - \sum_{i=1}^N w_i(h) c_{i0}^a(h) = 0. \quad (10)$$

Таким образом, в отличие от классических геостатистических методов, в которых погрешность моделирования равна нулю только в точках измерений, метод кригинга эквивалентных моделей обеспечивает точный прогноз в любой точке, для которой выборка данных достаточна.

С учетом той же модели (8) аналитически доказывается, что если для прогнозируемой точки используемое множество данных является недостаточным, тогда:

- среднеквадратическая погрешность также становится отличной от нуля

$$\sigma_{\text{ЭК}}^2(x_0, y_0, h_0) = v^a \left(v^a \psi_{\hat{f}}^2 + \sum_{i=1}^N \left(w_i c_{iN+1}^a - \frac{\det(G^i)}{\det(C^a)} \left(\sum_{j=1}^N w_j c_{ij}^a - v^a c_{iN+1}^a \right) \right) \right), \quad (11)$$

- погрешность оценки весовых функций прямо пропорциональна весовому коэффициенту неизвестного значения v^a ;
- множитель Лагранжа в общем случае отличен от нуля:

$$\mu = v^a \frac{\det(G_{N+1})}{\det(C^a)}, \quad (12)$$

где $G_i = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1N+1} & \dots & c_{1N} & 1 \\ c_{21} & \dots & c_{2N+1} & \dots & c_{2N} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{N1} & \dots & c_{NN+1} & \dots & c_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}$; $G_{N+1} = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1N} & c_{1N+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{N1} & \dots & c_N & c_{NN+1} \\ 1 & \dots & 1 & 1 \end{pmatrix}$.

Из выражений 11-12 видно, что множитель Лагранжа и средний квадрат погрешности прямо-пропорциональны весовому коэффициенту неизвестного значения и определяются ковариациями известных значений, ковариациями неизвестного значения с известными. На практике выражение (11) вычислить не представляется возможным. Если в последнем столбце G_{N+1} заменить ковариации неизвестной составляющей с известными значениями на среднеквадратическую погрешность в точке прогноза, тогда получим оценку веса неизвестной составляющей:

$$\hat{v}^a = \mu \frac{\det(C^a)}{\det(\hat{G}_{N+1})} \quad (13)$$

Данную оценку веса следует понимать как верхнюю оценку, т.к. вес неизвестной составляющей находится в диапазоне $[0, 1]$, а погрешность кригинга эквивалент-

ных моделей прямо пропорциональна этому весу. Оценку (13) можно интерпретировать как *относительную погрешность прогноза параметра*.

Для сопоставления погрешности кригинга эквивалентных моделей $\sigma_{ЭК}$ и погрешности обычного кригинга $\sigma_{ОК}$ проведены аналитические исследования на однородной модели с ковариационной функцией вида $c(\rho) = \psi^2 e^{-\beta|\rho|}$ при различных значениях β (см. рисунок 2).

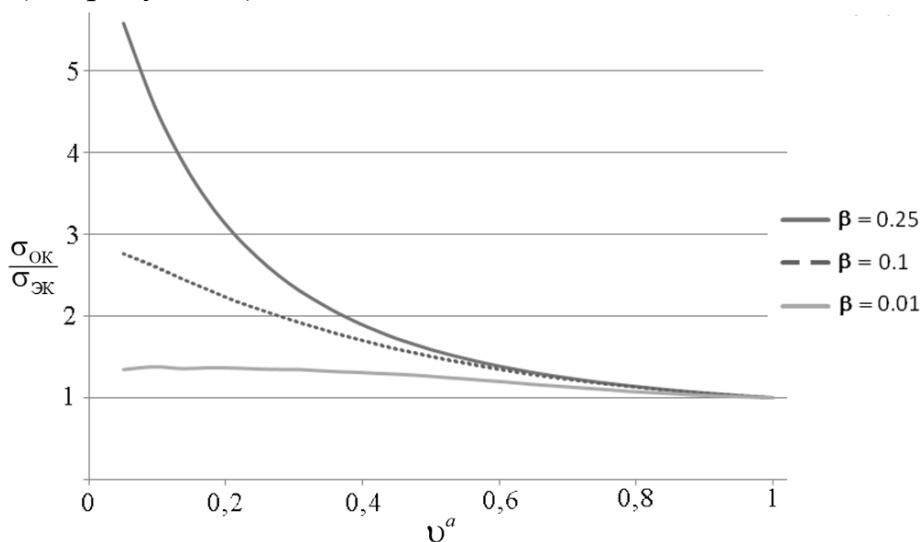


Рисунок 2 – Отношение погрешности обычного кригинга к погрешности кригинга эквивалентных моделей в зависимости от веса неизвестной составляющей

Из рисунка 2 видно, что погрешность обычного кригинга и кригинга эквивалентных моделей одинаковы при единственном условии: если вес неизвестной составляющей v^a равен единице. Во всех прочих случаях погрешность кригинга эквивалентных моделей оказывается меньше. Эффективность кригинга эквивалентных моделей растет с уменьшением веса неизвестной составляющей и увеличением β (уменьшением интервала корреляции исходных данных).

Глава 3. Алгоритмы построения объемных моделей геологической среды. В рамках данной главы приводится описание алгоритма кригинга эквивалентных моделей, рассматривается возможность оптимизации времени его работы и распараллеливания. Рассматриваются три варианта адаптации алгоритма к структурным факторам геологической среды: основанный на модели с согласованной геометрией геологических границ; основанный на модели с несогласованной геометрией геологических границ; основанный на обеих вышеупомянутых моделях.

Алгоритм кригинга эквивалентных моделей подразумевает расчет значения параметра среды в узле сетки $\{x, y, h\}$ путем весового суммирования по формуле (4), а значения весовых функций рассчитываются путем решения системы линейных алгебраических уравнений (5). Коэффициенты этой системы представляют собой значения ковариации. Дискретная формула расчета ковариации может быть записана в следующем виде:

$$c_{ij}^a(h_m) = \frac{1}{K} \sum_{k=m-\frac{K}{2}}^{m+\frac{K}{2}} A(x_i, y_i, h_k) A(x_j, y_j, h_k), \quad (14)$$

где K – размер окна, в пределах которого осуществляется выборка значений параметра; h_m – положение точки прогноза по глубине. Чем больше K , тем большее количество значений дополнительного параметра попадет в пределы окна.

При большом количестве узлов сетки, общее количество рассчитываемых ковариаций окажется велико. Например, для модели с количеством отсчетов, равным $100 \cdot 100 \cdot 2000 = 2 \cdot 10^7$ и количеством скважин, равным 25 общее количество рассчитываемых ковариаций составит $O_1 = 1.3 \cdot 10^{10}$. Уменьшение этого количества и, соответственно, оптимизация рассматриваемого алгоритма могут быть достигнуты за счет независимости основной матрицы $C^a(h)$ от координат точки прогноза (x, y) . Каждая уникальная матрица $C^a(h_m), i = \overline{1, M}$ (M – количество отсчетов по вертикали) может быть предварительно рассчитана и сохранена в некотором буфере и в дальнейшем многократно использована для формирования систем. В рамках введенного выше примера, количество рассчитываемых ковариаций после оптимизации составит $O_2 = (25 \cdot 25 + 25) \cdot 2000 = 1.3 \cdot 10^6$, что в $O_1 / O_2 = 10^4$ раз меньше по сравнению со случаем без оптимизации.

Рассматривается возможность ускорения работы алгоритма с помощью распараллеливания. Предложены три варианта адаптации алгоритма к структурным факторам геологической среды: для моделей с согласованной геометрией границ; для модели с несогласованной геометрией границ; универсальный, учитывающий оба предыдущих случая. В основе алгоритмов положены новые оценки ковариационных функций (15) и (16), учитывающие неоднородность данных и геометрию границ:

$$c_{ij}(\eta) = \frac{1}{K} \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} A(x_i, y_i, k \cdot \Delta h + H(x_i, y_i) + \eta) A(x_j, y_j, k \cdot \Delta h + H(x_j, y_j) + \eta), \quad (15)$$

$$c_{ij}(\partial h) = \frac{1}{K} \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} A_i(k \cdot \Delta h + H_i(\partial h)) A_j(k \cdot \Delta h + H_j(\partial h)). \quad (16)$$

где Δh и ∂h – соответственно смещение положения скользящего окна и коэффициент пропорциональности. Неоднородность учитывается размером окна K , а геометрия границ в смещении центра окна, согласно положению структурного фактора $H(x, y)$.

Глава 4. Исследование эффективности алгоритмов построения объемных моделей геологической среды и их программных реализаций. Алгоритмы, рассмотренные в третьей главе, реализованы средствами языка C# как часть программного приложения *Volumetric Geoenvironment* (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663794). Приложение может быть запущено на персональном компьютере с установленной операционной сис-

темой Windows 7 (и выше), а также платформой .NET Framework версии 3.5 (и выше).

Исследования погрешностей кригинга эквивалентных моделей на экспериментальной модели показали, что в зонах, где множество исходных данных является достаточным, погрешность моделирования и оценка веса неизвестной составляющей оказались равными нулю. В зонах, где вес $v^a \neq 0$ (т.е. где множество данных недостаточно), вес v^a , оценка веса и погрешность моделирования оказались одинаковыми по характеру распределения (рисунок 3).

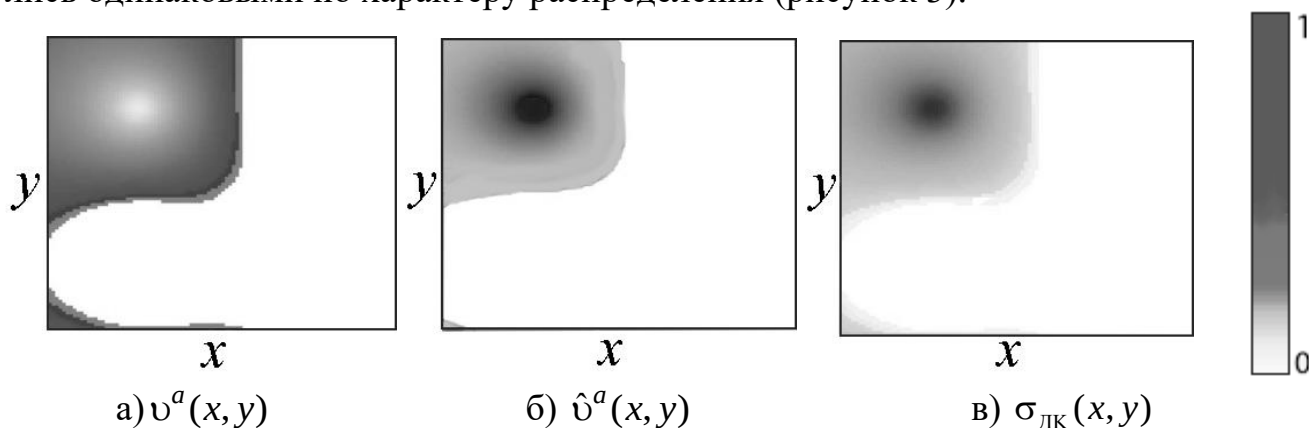


Рисунок 3 – Весовая функция $v^a(x, y)$ неизвестных данных (а), оценка веса $\hat{v}^a(x, y)$ неизвестной составляющей (б); среднеквадратическая погрешность $\sigma_{\text{дк}}(x, y)$ модели (в)

Исследования погрешностей кригинга эквивалентных моделей на реальных данных проводились в три этапа. Исходными данными для экспериментов являлись: куб сейсмического атрибута, полученного в пределах месторождения; кривые ГИС семи скважин. На первом этапе множество исходных данных включало в себя данные только трех скважин (рисунок 4а). Практически во всей анализируемой области, за исключением отдельных небольших участков, оценка веса неизвестной составляющей оказалась значимой (больше 0.5). На втором этапе в множество были добавлены две скважины, расположенные в центральной части площади (рисунок 4б). В результате оценка веса существенно снизилась как вблизи скважин, так и на значительном удалении от них. На третьем этапе множество включало в себя данные всех семи скважин (рисунок 4в). Оценка веса оказалась близкой к нулю в большей части рассматриваемой области. Последнее может свидетельствовать о достаточности выборки данных семи скважин а также о достижении наилучшего качества модели, в сравнении с предыдущими результатами. Исходя из полученных результатов, полученная оценка веса неизвестной составляющей имеет практическую значимость при анализе погрешностей моделирования. В частности, оценка веса неизвестной составляющей может быть использована для локализации зон достаточности/недостаточности данных и соответственно, для численной оценки качества полученной модели в каждой точке исследуемого объема.

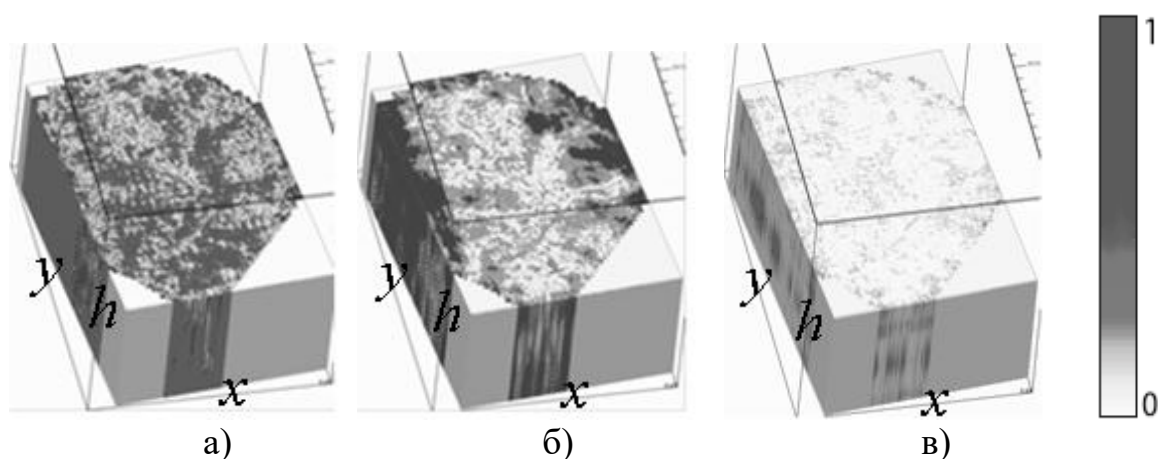


Рисунок 4 – Срез куба относительной погрешности кригинга эквивалентных моделей, полученный вдоль Баженовской свиты при моделировании: по трем скважинам (а); пяти скважинам (б); семи скважинам (в). Конторовичское месторождение Томской области (с разрешения ООО «Томскгеонефтегаз»)

Приводятся примеры моделирования с использованием: алгоритма без адаптации (рисунок 5б); алгоритма, основанного на модели с согласованной геометрией границ (рисунок 5в). Для демонстрации эффективности адаптированных алгоритмов, приводится сравнение реперных горизонтов, прослеженных по исходным сейсмическим данным (рисунок 5а) и полученным моделям среды. Результаты сравнения сведены в таблицу 1.

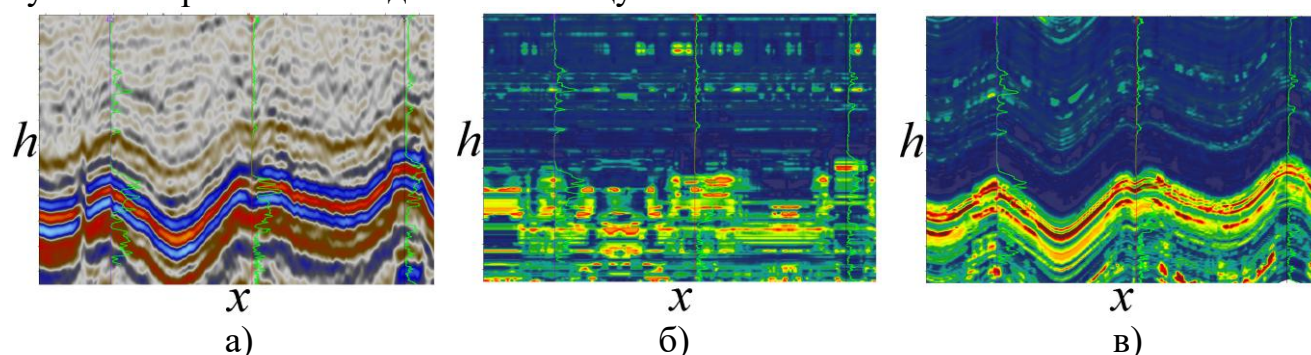


Рисунок 5 – Вертикальные срезы куба сейсмического атрибута (а); горизонтально-слоистой модели Aps (б); модели с согласованной геометрией границ параметра Aps (в)

Таблица 1 – Результаты сравнения горизонтов, полученных по моделям с адаптацией и без с исходными горизонтами, полученными по сейсмическим данным

Название горизонта	Относительная погрешность без адаптации, %	Относительная погрешность с адаптацией, %	Абсолютная погрешность без адаптации, м	Абсолютная погрешность с адаптацией, м
J0	0.91	0.02	16.29	0.51
A2	1.21	0.05	19.15	0.82
B8	1.12	0.04	15.51	0.41

Из таблицы видно, что использование алгоритма, адаптированного к структурным факторам геологической среды, позволило в среднем уменьшить значение абсолютной погрешности процедуры прослеживания горизонтов в 31 раз.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан геостатистический метод, получивший название кригинг эквивалентных моделей, который в отличие от классических геостатистических методов, опирается на анизотропную неоднородную модель среды и исключает вероятность получения физически нереального результата.
2. Исследования точности разработанного метода на моделях *достаточного* и *недостаточного* множества исходных данных показали, что:
 - в зонах, где исходные данные являются достаточными, погрешность кригинга эквивалентных моделей равна нулю вне зависимости от удаления точки прогноза от точек с измерениями;
 - предложена оценка погрешности на основе «неинтересного» в теории геостатистики множителя Лагранжа;
 - погрешность классического кригинга и кригинга эквивалентных моделей одинакова при единственном условии: если значение в точке прогноза не может быть представлено весовой суммой известных значений. Во всех прочих случаях погрешность кригинга эквивалентных моделей оказывается меньше. Показан пример, в рамках которого погрешность кригинга эквивалентных моделей в 6 раз меньше погрешности классического кригинга.
3. Разработаны три варианта адаптации алгоритма к структурным факторам геологической среды:
 - основанный на модели с согласованной геометрией границ;
 - основанный на модели с несогласованной геометрией границ;
 - универсальный алгоритм.
 Показан пример применения универсального алгоритма, в рамках которого погрешность восстановления геометрических особенностей модели удалось уменьшить в 31 раз по сравнению с алгоритмом без адаптации. Также показано, что в результате оптимизации и распараллеливания алгоритмов, время выполнения алгоритмов удалось сократить в 5 раз.
4. Результаты диссертационной работы внедрены в производственную деятельность ООО НАЦ «Недра»; показали работоспособность и высокую надежность разработанных алгоритмов, их практическую значимость и перспективность применения при прогнозе вещественного состава геологических сред.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Шестаков, В.В. Влияние репрезентативности исходных данных на результаты моделирования методом двойного крайгинга / В.В. Шестаков, Д.Ю. Степанов

- // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 1. – С. 88-97 (Scopus, WoS).
2. Шестаков, В.В. Адаптация алгоритма двойного крайгинга к структурным факторам геологической среды / В.В. Шестаков, О.М. Гергет // Системы анализа и обработки данных. – 2020. – № 1 (78). – С. 119-134.
 3. Шестаков В.В. Оптимизированный алгоритм двойного крайгинга для моделирования параметров геологической среды / В.В. Шестаков, О.М. Гергет // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Том 9. – № 4.
 4. Шестаков, В.В. Геостатистический смысл неопределенного множителя Лагранжа в методах ординарного и двойного кригинга / В.В. Шестаков, О.М. Гергет, Д.Ю. Степанов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – № 8. – С. 88-97 (Scopus, WoS).

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663794 (RU); заявка № 2020662973 от 26.10.2020, дата рег. 02.11.2020; Бюл. № 2020Э16389 от 01.10.2020 // Шестаков В.В., Степанов Д.Ю., Сысолятина Г.А. Volumetric Geoenvironment.

Статьи в других изданиях

6. Шестаков, В.В. Геостатистическое моделирование свойств геологических сред по данным наземной и скважинной сейсморазведки / В.В. Шестаков, Д.Ю. Степанов // Материалы XVI всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Красноярск, 28-30 октября 2015 г. – Красноярск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2015. – С. 57.
7. Shestakov, V.V. Three-dimensional models of geoenvironmental parameters / V.V. Shestakov, G.A. Sysolyatina, D.Y. Stepanov // Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine, Tomsk, 2016. – Advances in Computer Science Research, 2016. – Vol. 51. – P. 126-129. (WoS)
8. Шестаков, В.В. Модифицированный алгоритм Кригинга построения трехмерных моделей геологических сред / В.В. Шестаков // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016, Новосибирск, 16-20 апреля 2016 г. – Новосибирск: НГУ, 2016. – С. 72.
9. Шестаков, В.В. Исследование алгоритма совместного геоestatистического 3D-моделирования геологических сред / В.В. Шестаков, Д.Ю. Степанов, И.В. Парубенко // Материалы XVII Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 30 октября - 3 ноября 2016 г. – Новосибирск : ИВТ СО РАН, 2016. – С. 75-76.
10. Шестаков, В.В. Оценка эффективности параллельного алгоритма совместного геоestatистического моделирования / В.В. Шестаков // Сборник трудов XIV

- Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 7-11 ноября 2016 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 244-245.
11. Шестаков, В.В. Построение кубов петрофизических параметров на месторождениях Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / В.В. Шестаков, И.В. Парубенко // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина, Томск, 3-7 апреля 2017 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 1. – С. 427-428.
 12. Шестаков, В.В. Оценка информативности выборки данных нейтрон-нейтронного каротажа / В.В. Шестаков, А.А. Аржаник, А.А. Шевченко // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 4-7 декабря 2017 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 21-22.
 13. Шестаков, В.В. Оценка информативности сейсмических атрибутов при решении задачи построения объемных петрофизических моделей / В.В. Шестаков, А.А. Аржаник, А.А. Шевченко // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 3-7 декабря 2018 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 16-17.
 14. Шестаков, В.В. Выбор информативного сейсмического атрибута для построения трехмерной петрофизической модели. / В.В. Шестаков, А.А. Аржаник, А.А. Шевченко // Труды XXII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, Томск, 2-7 апреля 2018 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – Т. 1. – С. 456-458.
 15. Shestakov, V.V. The Application of the "Double Kriging" Method in the Construction of Volumetric Petrophysical Models / V.V. Shestakov, D.Yu. Stepanov, G.A. Sysolyatina, M. Amani // 5th International Conference GeoBaikal, Irkutsk, 11-17 August 2018. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. – P. 1-6. (Scopus).
 16. Шестаков, В.В. Исследование информативности скважинных данных при построении объемных петрофизических моделей методом «Двойного Кригинга» / В.В. Шестаков, Д.Ю. Степанов // Сборник работ II международной геолого-геофизической конференции и выставки «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии», Москва, 4-7 февраля 2019 г. – Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019. – С. 352-356.
 17. Шестаков, В.В. Адаптация алгоритма двойного крайгинга к структурным факторам геологической среды / В.В. Шестаков, Д.Ю. Степанов // Сборник работ III международной геолого-геофизической конференции и выставки «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии», Москва, 3-6 февраля 2020 г. – Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. – Т. 2. – С. 199-202.