

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-303-310

УДК 004.932

Поиск трехмерных изображений методом сравнения контуров в задачах геологического моделирования пласта

Павел Александрович Литвинов¹✉, Игорь Александрович Бессмертный²

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ p.litvinov7@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>

² bessmertny@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>

Аннотация

Введение. Исследованы методы сравнения трехмерных изображений в задачах геологического моделирования пласта с целью повышения их качества. Предлагаемый в данной работе метод сочетает в себе такие преимущества, как глобальное представление формы, инвариантность к трансформациям, устойчивость к шумам и вычислительную эффективность. Разработан и обоснован подход, основанный на применении моментов изображений для анализа геологических данных в задачах геологического моделирования пласта. **Метод.** Решение задачи сравнения трехмерных изображений достигается применением математического аппарата алгебраических инвариантов. Сущность предлагаемого подхода состоит в вычислении моментов трехмерных изображений для сравнения инвариантов контуров эталона и образца. Результатом сравнения является количественная метрика соответствия сравниваемого контура искомому эталону. **Основные результаты.** Разработаны программные средства, встроенные в общий конвейер моделирования и анализа пакета Gempu. Метод показал удовлетворительные результаты работы на тестовой геологической модели. Точность распознавания позволяет использовать разработанные средства как рекомендательную систему. Подтверждена возможность применения предлагаемого метода для поиска заданного объекта в геологической модели и ограниченная применимость для верификации упрощенной модели в ходе итерационного расчета. **Обсуждение.** Выполнено сравнение разработанного метода с метрикой Хаусдорфа, методом сравнения поперечных срезов, методом сравнения ключевых точек с помощью алгоритмов SIFT и SURF, а также методом интерполяции на сетке. Показано, что для представленного метода возможно расширение области применения на более сложных геологических образованиях для работы с неоднородными структурами. Разработанные средства можно интегрировать с системами геологического моделирования, системами управления базами данных и аналитическими платформами.

Ключевые слова

поиск трехмерных изображений, сравнение контуров, моменты изображений, алгебраические инварианты, геологическое моделирование

Благодарности

Авторы выражают благодарность Гололобовой Нелли Игоревне за консультирование в области геологического моделирования.

Ссылка для цитирования: Литвинов П.А., Бессмертный И.А. Поиск трехмерных изображений методом сравнения контуров в задачах геологического моделирования пласта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 2. С. 303–310. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-303-310

Search for three-dimensional images using the contour comparison method in problems of geological reservoir modeling

Pavel A. Litvinov¹✉, Igor A. Bessmertny²

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ p.litvinov7@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>

² bessmertny@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>

Abstract

Methods for comparing three-dimensional images in problems of geological modeling of a reservoir are studied in order to improve their quality. The proposed method combines such advantages as global representation of shape, invariance to transformations, noise resistance, and computational efficiency. An approach based on the use of image moments for analyzing geological data in problems of geological modeling of a reservoir is developed and substantiated. The problem of comparing three-dimensional images is solved using the mathematical apparatus of algebraic invariants. The essence of the proposed approach is to calculate the moments of three-dimensional images for comparing the invariants of the contours of the standard and sample. The result of the comparison is a quantitative metric of the conformity of the compared contour to the desired standard. Developed software tools were built into the overall modeling and analysis pipeline of the Gempy package. The method showed satisfactory results on the test geological model. The recognition accuracy allows using the developed tools as a recommender system. The possibility of using the proposed method to search for a given object in a geological model and limited applicability for verifying a simplified model during iterative calculations are confirmed. The proposed method is compared with the Hausdorff metric, the cross-section comparison method, the SIFT and SURF methods, and the grid interpolation method. It is shown that the proposed method can be expanded to more complex geological formations for working with heterogeneous structures. The developed tools can be integrated with geological modeling systems, database management systems, and analytical platforms.

Keywords

three-dimensional image search, contour comparison, image moments, algebraic invariants, geological modeling

Acknowledgements

The authors express their acknowledgements to Nelly Igorevna Gololobova for consulting in the field of geological modeling.

For citation: Litvinov P.A., Bessmertny I.A. Search for three-dimensional images using the contour comparison method in problems of geological reservoir modeling. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 303–310 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-303-310

Введение

Современный подход в создании цифрового двойника актива (месторождения или группы месторождений) предполагает разработку ряда моделей, одной из которых является геологическая модель. Данная модель может быть представлена в виде трехмерного изображения, описывающего месторождение, и сформирована на основе данных сейсморазведки и телеметрии. Геологическая модель представляет собой математическое отражение пласта и происходящие в нем физические процессы; при этом расчет модели требует значительных вычислительных мощностей. Геологическое моделирование применяют в первую очередь с целью обоснования и корректировки технических мероприятий среднесрочной и долгосрочной разработок. Такое моделирование используется на «зрелых» активах, с целью оптимизации методов их разработки. Модель строится приближенно, и от точности моделирования зависит качество прогноза, поскольку полученное в ходе моделирования трехмерное изображение пласта используется впоследствии в геофизическом анализе. В ходе анализа возникают задачи сравнения элементов модели с эталонами (например, при анализе построенной геологической модели, ее верификации), которые можно свести к автоматизированному поиску заданного трехмерного изображения эталонного объекта среди трехмерных изображений объектов модели.

При решении задачи сравнения элементов модели с эталонами работа ведется с оцифрованным физическим

объектом, трехмерное изображение которого не является нормированным и упорядоченным, поскольку было создано на основе данных геофизического исследования скважин и сейсморазведки. Соответственно, для успешного распознавания по образцу искомого объекта в полученном трехмерном изображении необходимо, чтобы это сравнение отвечало требованиям инвариантности к масштабу, ориентации и сдвигу. Для сравнения изображений предлагается анализировать их контуры. Целью исследования является повышение отдачи месторождений за счет увеличения качества моделей геологических пластов на основе математического аппарата алгебраических инвариантов для сопоставления трехмерных изображений. В настоящей работе выполнено сравнение предлагаемого метода с другими методами, применяемыми для решаемой задачи: метрика Хаусдорфа, метод сравнения поперечных срезов, метод интерполяции на сетке, а также методами сравнения ключевых точек Scale-invariant feature transform (SIFT) и Speeded-Up Robust Features (SURF)).

Наиболее перспективными для применения математического аппарата сравнения трехмерных изображений возможны две задачи, возникающие в ходе геологического моделирования: поиск заданного объекта в уже посчитанной модели и верификация упрощенных моделей в ходе их итерационного расчета. В первом случае примером использования может быть поиск «карманов» заданной структуры в посчитанной модели пласта. Прогнозирование строения пласта состоит из ряда операций и результатов измерений, которые анализирует

геолог. Поскольку использование результатов единственного источника (например, интерпретация данных сейсморазведки) недостаточно для корректного построения модели [1], то проведение сравнения объектов модели с эталонами, и комбинация результатов сравнений, может выступить дополнительной проверкой, которая подтвердит достоверность и точность геологического моделирования. Второй задачей в рамках геологического моделирования, где предлагаемый подход может быть применен, является верификация создаваемой упрощенной трехмерной модели [2]. Такие модели создаются для проведения быстрых оценок дебита и его прогноза или проведения исследовательских работ. При таком упрощенном моделировании оценка корректности построения модели может быть реализована путем сравнения одного из смоделированных объектов модели с существующим физическим объектом. Тогда искомым физическим объектом выступит в роли эталона, с которым необходимо будет сравнивать объекты модели. Такой подход позволяет итерационно увеличивать точность моделирования, постепенно доводя ее до минимально требуемой и достаточной. Рассмотренные две задачи предлагается решить путем сравнения контуров трехмерных изображений, применив математический аппарат моментов изображений.

Представленный метод отличается от аналогов тем, что оперирует не расстояниями между точками изображения и эталона, а метриками, описывающими форму, что делает его менее чувствительным к шумам и имеющим меньшую вычислительную сложность $O(n)$. Разработанный метод может быть использован для автоматизации процессов геологического анализа. Предложен метод для быстрого поиска объектов интереса в больших моделях, что актуально для задач разработки месторождений. Сформулирован метод оценки точности и достоверности упрощенных моделей, что снижает риски ошибок на этапах планирования проектирования ввода новых мощностей и добычи.

Использование моментов изображений для решения обозначенной задачи

Одним из способов сравнения изображений, с помощью анализа контуров эталона и идентифицируемого объекта, является сравнение их абсолютных инвариантов. Математическая база предлагаемого метода позволяет обеспечить требуемые условия инвариантности при сравнении контуров трехмерных изображений. На вход метода подаются черно-белые контуры изображений с толщиной в один пиксел (или воксель). В результате сравнения вычисляется количественная метрика соответствия того, насколько сравниваемый контур изображения соответствует искомому эталону. Предлагаемый метод на выходе формирует количественную метрику соответствия одного контура другому. В рамках данного исследования порог метрики был принят 0,87. Метод работает на базе алгебраических инвариантов, а искомые моменты изображений определяются через интеграл на основе функции плотности. Функцию плотности можно выразить через интенсивность пиксела или вокселя: поскольку обрабатываемое

изображение является бинарным, где контуры выделены одним цветом, а остальное изображение другим цветом, то интегрирование сводится к суммированию характеристик всех пикселей контура. Отметим, что идентификация контуров в трехмерных изображениях представляет отдельную задачу и выходит за рамки настоящей работы.

Для контуров двумерных изображений существуют моменты [3], сравнение которых решает поставленную задачу на плоскости. В русскоязычных научных работах за ними закрепилось название Ну-моменты. В работе [3] описан математический аппарат алгебраических инвариантов, который позволяет обеспечить требуемое сравнение, но только в двумерном пространстве. После публикации работы [3] автором был проведен ряд исследований, где расширялась область применения разработанного метода, увеличивался перечень задач обработки изображений, в котором Ну-моменты и их производные применимы. Например, кроме сравнения контуров, были разработаны подходы для анализа оригинального изображения и его копии с уменьшенным разрешением, с целью реконструкции оригинала [4]. Также были подробно исследованы подходы к наведению двумерного изображения на трехмерное, в том числе в [5, 6], с целью последующей идентификации и обработки, когда наведенное двумерное изображение совпадало со срезом исследуемого трехмерного. Активно изучались и разрабатывались подходы к снижению вычислительной сложности моментов изображения, например для моментов, инвариантных только к ориентации распознаваемого объекта [7]. В результате моменты изображений применимы как часть в больших конвейерах обработки изображений [8].

В работе [9] была развита теория, описанная в [3] до трехмерного пространства. Математическая база метода была расширена, она также основана на алгебраических инвариантах, но уже для трехмерного пространства. Получившийся в ходе разработки метод также инвариантен к масштабу, ориентации и сдвигу. Это, в свою очередь, дало старт исследованиям по расширению обозначенной в работе [9] области применения. В [10] предложен подход для распознавания лиц, позволяющий идентифицировать лица без привязки к позе и освещению, а в [11] выполнено сравнение моментов трехмерных изображений для решения задачи сравнения формы участков связывания белков. В работе [12] разработан метод, который получил применение в компьютерной графике для работы с геометрическими примитивами, используя который можно искать в меше (сетке полигонов) заданные примитивы. Как и в случае с двумерным пространством также были исследования по обеспечению инвариантности моментов к ориентации, но уже с учетом особенностей трех измерений [13]. Отдельно отметим, что в работе [14] был разработан математический аппарат для моментов в n -мерном пространстве.

Предлагаемый метод решения задач

Учитывая то, что в настоящей работе поиск контуров изображений не выполнялся, то отправной точкой

будут служить трехмерные черно-белые изображения с идентифицированными контурами толщиной в один воксель. Сравнение контуров трехмерных изображений выполнено при анализе их инвариантов. Авторы работы [9] основывались на идее в [3] расширили теоретическую базу до трехмерного пространства, развивая оригинальный метод. Для решения обозначенной в рамках настоящего исследования задачи введем обозначение момента трехмерного изображения. Момент изображения m_{pqr} порядка (p, q, r) функции плотности $\rho(x, y, z)$ существует и определяется через интеграл Римана как

$$m_{(pqr)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q z^r \rho(x, y, z) dx dy dz,$$

где $p, q, r = 0, 1, 2, \dots, n$; функция плотности $\rho(x, y, z)$ является кусочно-непрерывной, а значит, ограниченной, а также имеет ненулевые значения в пространстве R^3 только в конечной части пространства (x, y, z) .

Как и в случае с двумерным пространством и моментами m_{pq} порядка (p, q) для моментов трехмерного изображения вводится определение центральных моментов, инвариантных к масштабу

$$\mu_{(pqr)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q (z - \bar{z})^r \times \rho(x, y, z) d(x - \bar{x}) d(y - \bar{y}) d(z - \bar{z}), \quad (1)$$

где $\bar{x} = \frac{m_{100}}{m_{000}}$, $\bar{y} = \frac{m_{010}}{m_{000}}$ и $\bar{z} = \frac{m_{001}}{m_{000}}$.

В работе [9] приведены три абсолютных инварианта — инварианты к масштабу, ориентации и сдвигу.

$$I_1 = \mu_{200} + \mu_{020} + \mu_{002}, \quad (2)$$

$$I_2 = \mu_{020}\mu_{002} - \mu_{011}^2 + \mu_{200}\mu_{002} - \mu_{101}^2 + \mu_{200}\mu_{020} - \mu_{110}^2, \quad (3)$$

$$I_3 = \mu_{200}\mu_{020}\mu_{002} - \mu_{200}\mu_{011}^2 - \mu_{002}\mu_{110}^2 + 2\mu_{110}\mu_{011}\mu_{101} - \mu_{020}\mu_{101}^2. \quad (4)$$

Также в [9] выведены выражения для сравнения контуров на основе абсолютных инвариантов (2), (3), (4): $\frac{I_1^2}{I_2}$ и $\frac{I_3}{I_1^3}$. Их вычисление дает количественную характеристику соответствия эталона трехмерного изображения и искомого объекта.

Отметим, что для дискретного изображения можно выразить центральные моменты трехмерного изображения (1) через сумму ряда:

$$\mu_{(pqr)} = \sum_X \sum_Y \sum_Z (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q (z - \bar{z})^r \rho(x, y, z),$$

где X, Y, Z — области, где определены точки трехмерного изображения. Это применимо в том числе и к формуле (1) для трехмерного изображения.

Помимо рассмотрения метода сравнения контуров, стоит дать оценку применимости другим методам, используемым для решения обозначенной задачи.

Рассмотрим четыре метода, которые по мнению авторов настоящей работы наиболее часто применяются.

Метрика Хаусдорфа. Метод основан на измерении максимального расстояния между ближайшими точками двух объектов. Расчет расстояния служит оценкой сходства или расхождения двух объектов. Вследствие ее чувствительности к артефактам и шумам удобно находить локальные различия между объектами. Моменты же, напротив, описывают форму, и менее чувствительны к локальным искажениям. Для применения данного метода в настоящей работе потребуются итерационные вычисления расстояния между множеством объектов, в то время как сравнение моментов — это анализ числовых характеристик.

Метод интерполяции на сетке. Метод предполагает интерполяцию двух поверхностей на одинаковые сетки. Затем, на основе значений в узлах сеток, строятся численные описания поверхности, вычисляются разности (например, среднеквадратичные) для каждой пары узлов. Необходимо учитывать, что интерполяция сглаживает мелкие детали и границы, в то время как применяемые моменты напрямую работают с геометрией объектов. По аналогии с метрикой Хаусдорфа, сравнение поверхностей методом интерполяции на сетке итерационное, и требует больших вычислительных ресурсов, чем сравнение числовых характеристик.

Метод сравнения поперечных срезов. Метод предполагает последовательное исследование формы объектов посредством анализа срезов. Фактически, каждый срез представляет собой отдельный двумерный контур, который сопоставляется с двумерным контуром, полученным из эталона. Существуют разные подходы в сравнении двумерных срезов: от сравнения Ну-моментов до сравнения таких метрик как площадь, длина и т. п. В любом случае результаты анализа зависят от изначальной ориентации срезов и их дискретизации. При сравнении трехмерных изображений такой зависимости нет. Также, сравнение моментов позволяет учесть топологию изображения целиком, а не разбивать его на отдельные несвязные двумерные срезы. С примерами использования подобных методов можно ознакомиться в материалах [5, 6].

Метод сравнения ключевых точек, где наибольшую известность имеют алгоритмы SIFT [15] и SURF [16]. Суть метода заключается в том, чтобы найти ключевые точки эталонного и полученного изображений и сравнить их. Алгоритмы SIFT и SURF обеспечивают инвариантность к масштабированию, ориентации и сдвигу. Они также дают незначительную устойчивость к искажению, но в настоящей работе задача найти не точно такой же объект, а только похожий. Например, если требуется найти прямоугольник, и используется эталон с углами в 90° , а образец со скругленными углами, то алгоритмы построят разные наборы ключевых точек, и, как следствие, получили бы ложноотрицательные результаты сравнения. Это связано с тем, что при наличии мелких деталей алгоритмы вычисляют дескрипторы ключевых точек с ошибками из-за зашумленности. Сравнение рассматриваемых методов представлено в таблице.

Таблица. Сравнительная таблица рассматриваемых методов
Table. Comparative table of the methods under consideration

Метод	Инвариантность	Вычислительная сложность	Устойчивость к шуму
Метрика Хаусдорфа	Нет	$O(n^2)$	Низкая
Метод сравнения поперечных срезов	Частичная	$O(n)$	Средняя
Метод сравнения ключевых точек (SIFT и SURF)	Да	$O(n \log n)$	Низкая
Метод интерполяции на сетке	Нет	$O(n)$	Высокая
Предлагаемый метод	Да	$O(n)$	Высокая

Разработанный метод сочетает в себе ключевые преимущества: глобальное представление формы, инвариантность к трансформациям, устойчивость к шумам и вычислительную эффективность. На основе предложенного метода разработана методика сравнения объектов в геологическом моделировании, превосходящая как локальные, так и сеточные подходы по отдельным показателям

Результаты

В настоящей работе для геологического моделирования использовался пакет с открытым кодом Gempy, реализованный на языке программирования Python. Пакет позволяет моделировать сложные трехмерные геологические модели, с такими включениями как разломы, складчатые структуры, сети разломов, магматические тела, складки и прочее. Благодаря тому, что программное обеспечение распространяется по модели

open source, можно легко встроить собственный модуль в конвейер расчета. Также пакет содержит в себе встроенные инструменты визуализации получившихся моделей. В качестве опытной модели используется готовая публичная модель. Она обладает достаточным количеством слоев для наглядности работы метода в рамках исследования, а также позволяет проверить корректность работы метода при сравнении криволинейных трехмерных объектов. Визуализация опытной модели приведена на рис. 1. Модель содержит три слоя и один нефтяной карман. Искомый карман находится между слоями Formation 1 (Порода 1) и Formation 3 (Порода 3) (рис. 1). Значения координатных осей соответствуют координатам вокселей в границах моделируемого экстенда. Стоит отметить, что исходная модель не содержит достаточно данных для определения топологии пласта встроенными средствами Gempy.

Схематичное изображение исследуемого пласта в проекции оси ординат приведено на рис. 2.

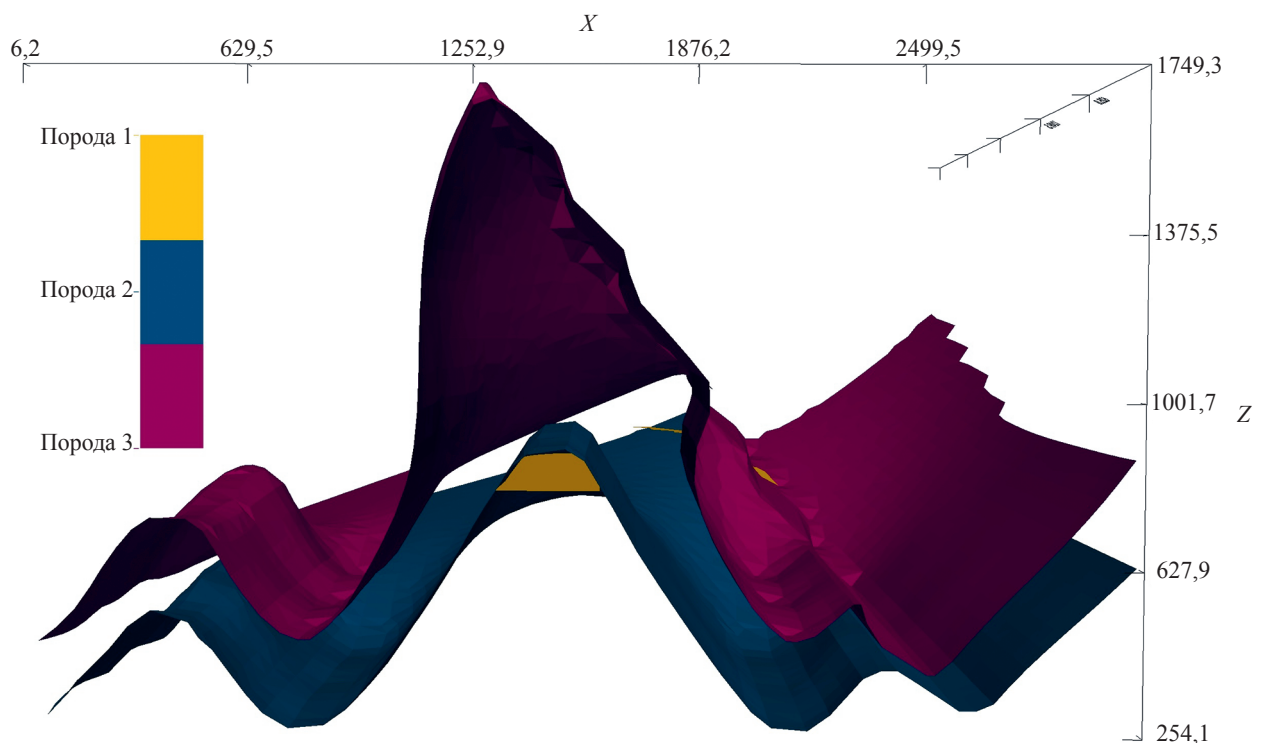


Рис. 1. Вид многослойной структуры модели

Fig. 1. View of the multilayer structure of the model

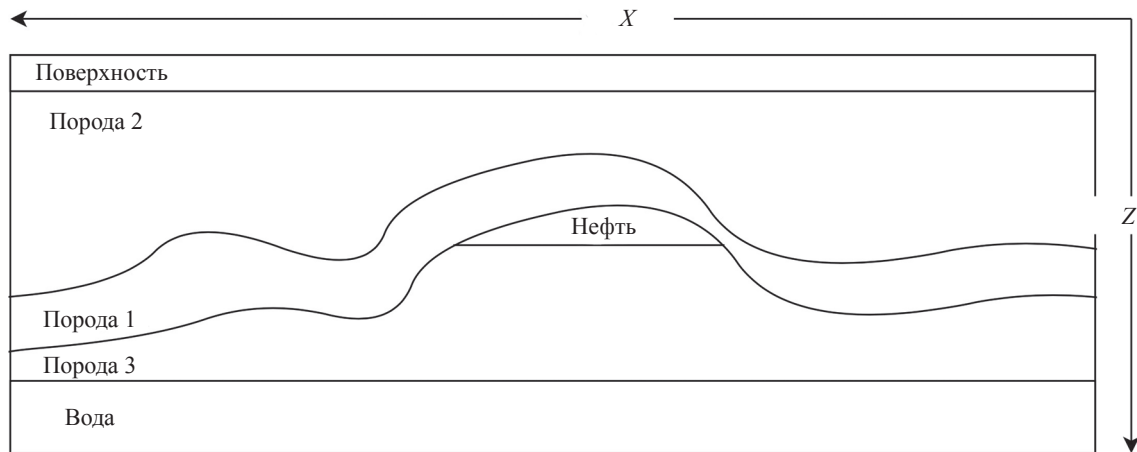


Рис. 2. Схематичное изображение структуры пласта
Fig. 2. Schematic representation of the formation structure

Приведем два сценария работы предлагаемого метода.

Сценарий 1. Выполним поиск заданного объекта в уже посчитанной модели. Примем за искомый объект нефтяной карман. В ходе исследования итерационно сравнивались все контуры модели с контуром эталона. Для сравнения контуров было вычислено значение

выражения $\frac{I_1^2}{I_2}$ для контура эталона и 156 контуров в трехмерном изображении, где I_1 и I_2 описаны в уравнениях (2) и (3). Значение для контура эталона составило 3,476. В силу специфики решаемой задачи вместо метрики среднеквадратичного отклонения была выбрана метрика точности. Порог точности был задан в 87 %. Результаты работы созданных средств поиска контуров: ложноположительный результат — 2; истинно положительный результат — 1; ложноотрицательный результат — 0; истинно отрицательный результат — 153.

Применяемая методика показала удовлетворительные результаты работы, однако на один искомый контур пришлось два ложноположительных результата. Точность распознавания позволяет использовать разработанные на основе методики средства как рекомендательную систему, поскольку позволяет устранить ложноотрицательные результаты, однако она недостаточна для автоматизированной чистовой разметки имеющихся моделей. Методика также применима как вспомогательная система черновой разметки, которая впоследствии верифицируется геологом. При этом необходима база искомых эталонов, используемых для автоматизированного сравнения.

Сценарий 2. Использован метод верификации упрощенной модели в ходе ее итерационного расчета. Примем за искомый контур тот же, что и в рамках сценария 1. Использование пакета Gempy позволяет встроить в конвейер расчета модели дополнительные этапы. Критерием останова является сходимость расчетов: достигая нужного уровня сходимости при заданной точности моделирование считается завершенным, а модель рассчитанной. В ходе расчета должны сходиться

сразу же множество параметров, это обуславливает необходимость учета всей сцены целиком для каждой итерации. В настоящей работе сравнение трехмерных изображений осуществлено на каждой итерации расчета. Первоначально предполагалось использовать существующий эталон для сравнения. Однако на начальных итерациях расчета геометрическая форма сравниваемых объектов значительно была упрощена, и провести сравнение качественно не удалось. Для решения этой проблемы была создана база эталонов с постепенным усложнением меша, конечным элементом которой был исходный эталон.

Изначальный расчет модели требовал 5 итераций расчета с разделением на 6, 6, 42, 9 и 6 частей (chunks). На вычислительном узле с характеристиками CPU 1,1 GHz Intel Core i5, GPU Intel Iris Plus Graphics 1536 МБ и RAM 16 ГБ 3733 MHz LPDDR4X расчет занимал 1 мин 34 с. После модификации конвейера Gempy, с усложняющейся поэтапно проверкой сходимости, требуемая сходимость получена на четвертой итерации, а расчет длился на 1100 мс меньше, что составляет 1,1 % от общей продолжительности расчета. При этом временные затраты для подготовки базы эталонов, очевидно, несопоставимы, и предлагаемый метод неэффективен в случае разовых вычислений. Можно констатировать, что в сценарии 2 разработанный метод применим в том случае, если модель необходимо постоянно пересчитывать, и затраты на пересчет превышают затраты на создание базы упрощенных эталонов.

Заключение

Метод сравнения контуров применим для реализации поиска трехмерных изображений в задачах геологического моделирования пласта. Предложенный метод позволяет решать задачи оценки корректности построения упрощенной модели и достоверности построенной модели. Метод применим в общем конвейере моделирования и анализа, имеет высокую устойчивость к шуму, а также инвариантен к ориентации, масшта-

бированию и сдвигу. При этом предложенный метод только дополняет, а не заменяет полный расчет модели из-за наличия преимуществ и ограничений.

К преимуществам данного метода можно отнести выявление изменений в моделируемом объекте, низкую ресурсоемкость и интуитивное представление. Сравнение контуров применимо для выявления изменений и аномалий в геологической структуре, такое применение упрощает первичные автоматизированные диагностику и анализ. Сравнение контуров также менее ресурсоемко по сравнению с более комплексными методами анализа геологических моделей. Предлагаемый метод имеет вычислительную сложность $O(n)$. Сами контуры представляют собой понятное и наглядное представление формы и структуры пласта, что облегчает первичную интерпретацию данных.

Стоит отметить, что помимо выделенных преимуществ данный метод обладает явными ограничениями, которые необходимо учитывать при использовании, а именно потерю информации, зависимость от качества данных и отсутствие подходов в работе с многозначностью контуров. В предлагаемом методе не используется информация о внутренней структуре пласта, полученная в ходе сейсморазведки, контуры

представляют собой упрощенную проекцию данных. Точность сравнения контуров сильно зависит от качества исходных данных и метода построения контуров. Некачественные данные с большим количеством помех приводят к неверной идентификации контуров, а значит и неудовлетворительным результатами работы метода. В некоторых случаях, один и тот же контур может представлять разные геологические объекты, и принадлежность к конкретному объекту можно определить только в контексте, что усложняет интерпретацию.

Предложенный метод и разработанные средства могут быть усовершенствованы путем расширения области применения и обеспечения совместимости с другими системами. Возможно расширение области применения метода на более сложные геологические образования для работы с неоднородными геологическими структурами. К таким структурам можно отнести фации, разломы и тектонические структуры. Также, возможно внедрение методов для отслеживания изменений геологических образований с течением времени. Разработанные средства можно интегрировать с системами геологического моделирования, системами управления базами данных и аналитическими платформами.

Литература

1. Билибин С.И., Дьяконова Т.Ф., Исакова Т.Г., Истомин С.Б., Юканова Е.А. Трехмерная геологическая модель — необходимый и обязательный этап изучения нефтегазового месторождения // Недропользование XXI век. 2007. № 4. С. 38–42.
2. Григорьев Ю.М., Харбанов М.В. Разработка модуля по созданию упрощенной структурной 3D модели нефтяного пласта // Математические заметки ЯГУ. 2013. Т. 20. № 2. С. 246–255.
3. Hu M.-K. Visual pattern recognition by moment invariants // IRE Transactions on Information Theory. 1962. V. 8. N 2. P. 179–187. <https://doi.org/10.1109/Tit.1962.1057692>
4. Boyce J.F., Hossack W.J. Moment invariants for pattern recognition // Pattern Recognition Letters. 1983. V. 1. N 5-6. P. 451–456. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(83\)90085-5](https://doi.org/10.1016/0167-8655(83)90085-5)
5. Нгуен З.Т., Хачумов М.В. Метод наведения 3D-модели объекта на 2D-изображение на основе инвариантных моментов // Программные системы: теория и приложения. 2017. Т. 8. № 4(35). С. 209–220.
6. Mukundan R., Ramakrishnan K.R. An iterative solution for object pose parameters using image moments // Pattern Recognition Letters. 1996. V. 17. N 12. P. 1279–1284. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(96\)00099-2](https://doi.org/10.1016/0167-8655(96)00099-2)
7. Flusser J. On the independence of rotation moment invariants // Pattern Recognition. 2000. V. 33. N 9. P. 1405–1410. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00127-2)
8. Zitova B., Flusser J. Image registration methods: a survey // Image and Vision Computing. 2003. V. 21. N 11. P. 977–1000. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9)
9. Sadjadi F.A., Hall E.L. Three-dimensional moment invariants // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1980. V. 2. N 2. P. 127–136. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1980.4766990>
10. Thakare N.M., Thakare V.M. A Supervised Hybrid Methodology for Pose and Illumination Invariant 3D Face Recognition // International Journal of Computer Applications. 2012. V. 47. N 25. P. 24–29. <https://doi.org/10.5120/7537-474>
11. Sommer I., Muller O., Domingues F.S., Sander O., Weickert J., Lengauer T. Moment invariants as shape recognition technique for comparing protein binding sites // Bioinformatics. 2007. V. 23. N 23. P. 3139–3146. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btm503>
12. Xu D., Li H. 3-D affine moment invariants generated by geometric primitives // Proc. of the 18th International Conference on Pattern

References

1. Bilibin S.I., Diakonova T.F., Isakova T.G., Istomin S.B., Iukanova E.A. A three-dimensional geological model is a necessary and mandatory stage in studying an oil and gas field. *Nedra* 21, 2007, no. 4, pp. 38–42. (in Russian)
2. Grigorev Yu.M., Kharbanov M.V. The development of a program module for creating simplified structural 3d oil reservoirs model. *Mathematical notes of Yakutsk State University*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 246–255. (in Russian)
3. Hu M.-K. Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Transactions on Information Theory*. 1962. vol. 8, no. 2, pp. 179–187. <https://doi.org/10.1109/Tit.1962.1057692>
4. Boyce J.F., Hossack W.J. Moment invariants for pattern recognition. *Pattern Recognition Letters*, 1983, vol. 1, no. 5-6, pp. 451–456. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(83\)90085-5](https://doi.org/10.1016/0167-8655(83)90085-5)
5. Nguyen D.T., Khacumov M.V. The method of comparing a 3d object model with a 2d image based on invariant moments. *Program Systems: Theory and Applications*, 2017, vol. 8, no. 4(35), pp. 209–220. (in Russian)
6. Mukundan R., Ramakrishnan K.R. An iterative solution for object pose parameters using image moments. *Pattern Recognition Letters*, 1996, vol. 17, no. 12, pp. 1279–1284. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(96\)00099-2](https://doi.org/10.1016/0167-8655(96)00099-2)
7. Flusser J. On the independence of rotation moment invariants. *Pattern Recognition*, 2000, vol. 33, no. 9, pp. 1405–1410. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00127-2)
8. Zitova B., Flusser J. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 2003, vol. 21, no. 11, pp. 977–1000. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9)
9. Sadjadi F.A., Hall E.L. Three-dimensional moment invariants. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, vol. 2, no. 2, pp. 127–136. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1980.4766990>
10. Thakare N.M., Thakare V.M. A Supervised Hybrid Methodology for Pose and Illumination Invariant 3D Face Recognition. *International Journal of Computer Applications*, 2012, vol. 47, no. 25, pp. 24–29. <https://doi.org/10.5120/7537-474>
11. Sommer I., Muller O., Domingues F.S., Sander O., Weickert J., Lengauer T. Moment invariants as shape recognition technique for comparing protein binding sites. *Bioinformatics*, 2007, vol. 23, no. 23, pp. 3139–3146. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btm503>

- Recognition (ICPR'06). 2006. P. 544–547. <https://doi.org/10.1109/icpr.2006.21>
13. Suk T., Flusser J., Boldyš J. 3D rotation invariants by complex moments // *Pattern Recognition*. 2015. V. 48. N 11. P. 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.05.007>
 14. Mamistvalov A.G. n-Dimensional moment invariants and conceptual mathematical Theory of recognition n-Dimensional solids // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1998. V. 20. N 8. P. 819–831. <https://doi.org/10.1109/34.709598>
 15. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // *International Journal of Computer Vision*. 2004. V. 60. N 2. P. 91–110. <https://doi.org/10.1023/b:visi.0000029664.99615.94>
 16. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded up robust features // *Lecture Notes in Computer Science*. 2006. V. 3951. P. 404–417. https://doi.org/10.1007/11744023_32
 12. Xu D., Li H. 3-D affine moment invariants generated by geometric primitives. *Proc. of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*, 2006, pp. 544–547. <https://doi.org/10.1109/icpr.2006.21>
 13. Suk T., Flusser J., Boldyš J. 3D rotation invariants by complex moments. *Pattern Recognition*, 2015, vol. 48, no. 11, pp. 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.05.007>
 14. Mamistvalov A.G. n-Dimensional moment invariants and conceptual mathematical Theory of recognition n-Dimensional solids. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, no. 8, pp. 819–831. <https://doi.org/10.1109/34.709598>
 15. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 60, no. 2, pp. 91–110. <https://doi.org/10.1023/b:visi.0000029664.99615.94>
 16. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded up robust features. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, vol. 3951, pp. 404–417. https://doi.org/10.1007/11744023_32

Авторы

Литвинов Павел Александрович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>, p.litvinov7@gmail.com

Бессмертный Игорь Александрович — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 36661767800](https://orcid.org/0000-0001-6711-6399), <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>, bessmertny@itmo.ru

Authors

Pavel A. Litvinov — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>, p.litvinov7@gmail.com

Igor A. Bessmertny — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 36661767800](https://orcid.org/0000-0001-6711-6399), <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>, bessmertny@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2024
Одобрена после рецензирования 26.02.2025
Принята к печати 26.03.2025

Received 30.09.2024
Approved after reviewing 26.02.2025
Accepted 26.03.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»