

А. П. Золоторенко¹✉, В. В. Лапковский^{1,2}

Разработка алгоритма построения 3D моделей геологических объектов с использованием адаптивной реструктуризации сеток

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Аннотация. Детальные трехмерные модели осадочных комплексов позволяют существенно повысить эффективность поисков, разведки и освоения месторождений углеводородов. Существует большое количество методов создания таких моделей на основе данных бурения и сейсморазведки. Одним из передовых подходов является метод потенциального поля, в котором пластопересечения различных стратиграфических границ представляются как точки с известными значениями потенциала трехмерного поля. Эти данные аппроксимируются трехмерной функцией и геологические границы представляются как набор изоповерхностей аппроксимирующей функции. Для сложных геологических объектов возникают трудности, прежде всего, связанные с необходимостью учитывать существующие разрывные нарушения. Решению задачи эффективного включения в модель разрывных нарушений посвящено данное исследование. Предлагается усовершенствование методов потенциального поля, а именно, изменить способ вычисления расстояния между точками пространства, которые находятся по разные стороны от разрывов. Это решение можно использовать для модификации процедуры трехмерного кригинга. В статье представлен алгоритм реструктуризации трехмерной сетки для моделирования разломов. Алгоритм может быть интегрирован в программное обеспечение интерпретации сейсмических и скважинных данных, позволяя повысить точность моделирования недр.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, геологические модели, метод потенциального поля, кригинг, реструктуризация сетки, разлом

A. P. Zolotorenko¹✉, V. V. Lapkovskiy^{1,2}

Development of an algorithm for constructing 3D models of geological objects using adaptive grid restructuring

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Abstract. Detailed three-dimensional models of sedimentary complexes can significantly improve the efficiency of hydrocarbon exploration, development, and production. There are various methods for creating such models based on drilling and seismic data. One of the advanced approaches is the potential field method, where the intersection points of different stratigraphic boundaries are represented as points with known values of the three-dimensional potential field. These data are approximated by a three-dimensional function, and the geological boundaries are represented as a set of isosurfaces of the approximating function. However, there are challenges associated with complex geological structures, particularly when it comes to incorporating existing faults into the model. This study aims to address the issue of effectively incorporating faults into the model. The proposed

solution involves improving the potential field method by modifying the way the distance between points in space is calculated. This solution can be used to modify the three-dimensional kriging procedure. The article presents an algorithm for restructuring the three-dimensional grid to model faults. This algorithm can be integrated into seismic and well data interpretation software, enhancing the accuracy of subsurface modeling.

Keywords: three-dimensional modeling, geological models, potential field method, kriging, grid restructuring, fault

Введение

Современное освоение недр базируется на точных трёхмерных геологических моделях, которые служат основой для понимания строения недр, оценки ресурсов, прогнозирования рисков и оптимизации инженерных решений. Перспективным инструментом их построения является метод потенциального поля, представляющий геологическое пространство как непрерывное скалярное поле, где границы тел соответствуют изоповерхностям [1]. Однако стандартный метод не позволяет моделировать разломы - нарушения сплошности пород со смещением блоков, что критически важно для создания качественных моделей сложных объектов. Цель работы - разработать и апробировать модифицированный метод потенциального поля с реструктуризацией сетки для автоматизированной генерации разломов в 2D и 3D моделях. В статье представлены теоретические основы, алгоритм (включающий динамическую сетку и модификацию кригинга с добавлением расстояния обхода разлома), представлены результаты 2D и 3D случаев.

Методы и материалы

Согласно методу потенциального поля, геологическое пространство моделируется непрерывным трёхмерным скалярным полем. Потенциальное поле известно лишь по дискретным или бесконечно малым приращениям. В связи с этим для интерполяции данных фиксируется произвольное начало отсчета x_0 , и в любой точке x выполняется кригинг приращения потенциала $T^*(x) - T^*(x_0)$:

$$T^*(x) - T^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^M \mu_{\alpha} (T(x_{\alpha}) - T(x'_{\alpha})) + \sum_{\beta=1}^N v_{\beta} \frac{dT}{du_{\beta}}(x_{\beta}) \quad (1)$$

где веса μ_{α} и v_{β} , являющиеся решением системы кригинга, по сути, представляют собой функции от x и x_0 .

Для моделирования разлома предлагается модифицировать кригинг путём введения дополнительного расстояния обхода разлома в метрику пространства. Идея заключается в том, чтобы существенно ослабить взаимное влияние данных, лежащих по разные стороны от разлома.

Пусть x_a и x_b - две точки, между которыми вычисляется расстояние. Если отрезок (x_a, x_b) пересекает поверхность разлома, то вместо евклидова расстояния используется модифицированное расстояние:

$$d_{\text{mod}}(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b) = \|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b\| + \lambda \cdot d_{\text{bypass}}(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b) \quad (2)$$

где λ - коэффициент, управляющий степенью разрыва; d_{bypass} - дополнительное расстояние обхода, например, путь вдоль поверхности разлома.

Тогда в системе кригинга вместо стандартной ковариационной функции $C(h)$ используется функция $C_{\text{mod}}(d_{\text{mod}})$. В результате кригинг остаётся формально тем же самым, но веса μ_α и ν_β вычисляются с учётом модифицированных расстояний, что автоматически создаёт разрыв поля вдоль поверхности разлома без нефизичного сглаживания. Работу алгоритма генерации разломов можно представить в виде схемы (рис. 1).

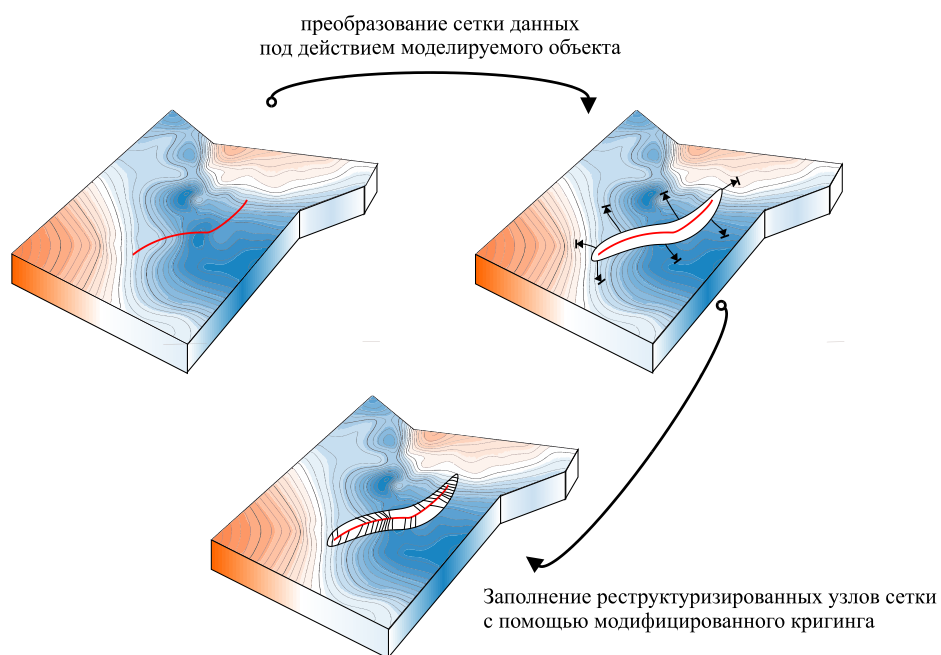


Рис. 1. Схема работы алгоритма генерации сложных структур

Результаты

Алгоритм был реализован для 2D и 3D сеток. В 2D случае разлом вносится в существующую сетку путём раздвигания узлов сетки по контуру [2]. Алгоритм проверяет пересечение отрезка между двумя точками с линией разлома и при наличии пересечения добавляет дополнительное расстояние до границы разлома. В результате поле разрывается вдоль линии разлома без нефизичного сглаживания (рис. 2).

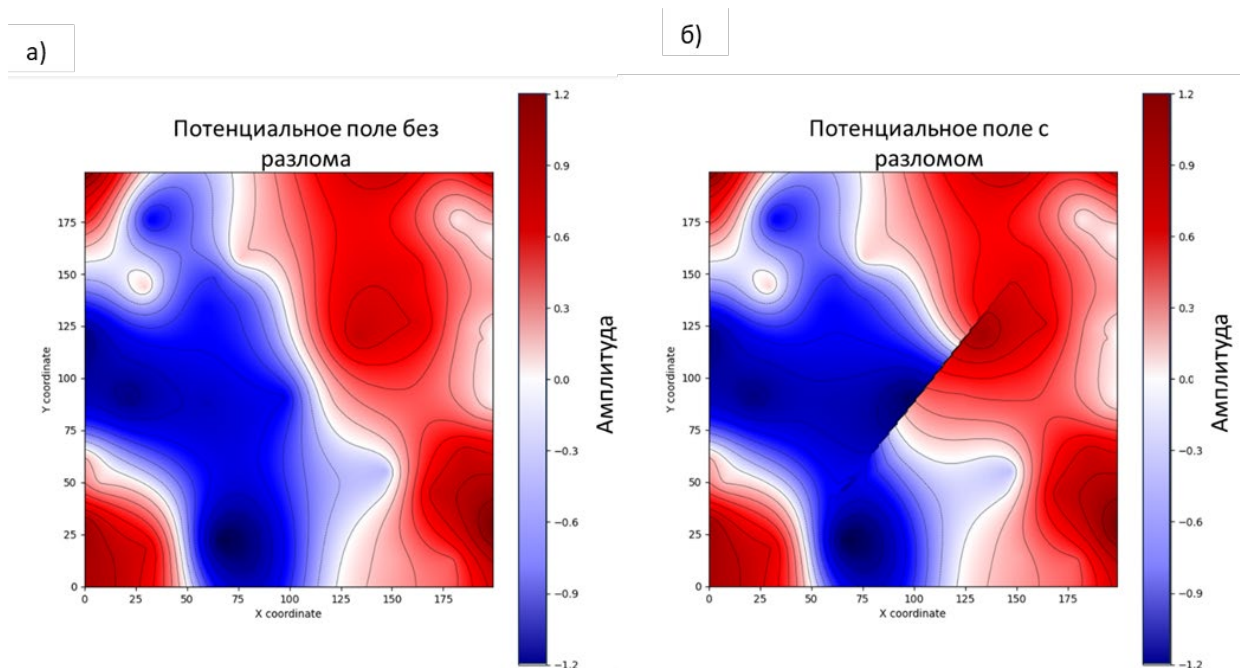


Рис. 2. а) Сетка без разлома, б) Сетка с разломом

В 3D случае разлом задаётся плоскостью, алгоритм проверяет пересечение отрезка с плоскостью разлома и добавляет дополнительное расстояние обхода вдоль плоскости, что обеспечивает корректный разрыв поля в трёхмерном пространстве (рис. 3).

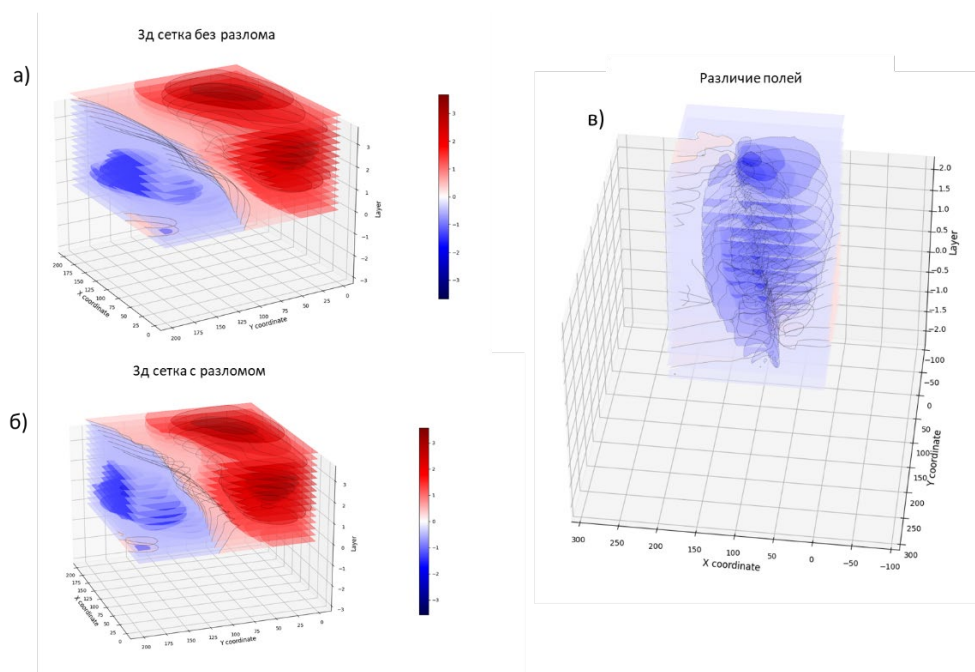


Рис. 3. а) 3D сетка без разлома, б) 3D сетка с разломом, в) Разница между модифицированным полем (с разломом) и изначальным полем (без разлома)

Обсуждение

Модифицированный метод потенциального поля с реструктуризацией сетки успешно решает задачу автоматизированной генерации разломов в 2D и 3D. Ключевым результатом является то, что введение дополнительного расстояния обхода разлома в кригинг позволяет создавать разрыв поля строго вдоль заданной линии (2D) или плоскости (3D) без нефизичного сглаживания. При этом вдали от разлома поле остаётся неизменным (разница близка к нулю). Это подтверждает, что алгоритм вносит искажения исключительно там, где это необходимо, и не нарушает общую структуру поля.

Заключение

В ходе выполнения данной работы были реализованы 2D и 3D прототипы модифицированного метода потенциального поля с реструктуризацией сетки для автоматизированной генерации разломов. На текущем этапе алгоритм успешно работает для простых видов разломов: отрезка в 2D и прямоугольной плоскости в 3D. Было показано, что введение дополнительного расстояния обхода разлома в кригинг позволяет создавать корректный разрыв поля вдоль заданной линии или плоскости без нефизичного сглаживания и без искажений в удалённых от разлома областях. В дальнейшем планируется расширить работу алгоритма для криволинейных поверхностей разломов. Кроме того, планируется интегрировать разработанный алгоритм в промышленное программное обеспечение для интерпретации сейсмических и скважинных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chilès J. P. et al. Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: the potential-field method : Proceedings of international symposium on orebody modelling and strategic mine planning, Perth, Australia, 2004. – Т. 22. – С. 24.
2. Lie K. A. An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). – Cambridge University Press, 2019.

© А. П. Золоторенко, В. В. Лапковский, 2026