

ГЕОСПЛАЙН: ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНОПОСТРОЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

*Г.А. Максимов, В.А. Ларичев, Д.Н. Лесонен, А.В. Деров
(Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва,
e-mail: gamaximov@gmail.com)*

GEOSPLINE: HIERARCHICAL MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX GEOLOGICAL MEDIUM

*Maximov G.A., Larichev V.A., Lesonen D.N., Derov A.V.
(N.N. Andreyev Acoustical Institute, Moscow,
e-mail: gamaximov@gmail.com)*

Аннотация. Разработан оригинальный подход и реализующий его программный комплекс ГЕОСплайн для моделирования сложнопостроенных трехмерных геологических структур. Совместное использование параметрических В-сплайнов, для аппроксимации произвольно распределенных в пространстве данных при построении отдельной геофизической поверхности и объемных сплайнов для аппроксимации непрерывных объемных свойств среды в сочетании с иерархической структурой типа дерева для упорядочения отдельных поверхностей в общей модели и удаления их пересекающихся частей, являются оригинальными подходами данной разработки. Развитая математическая модель построения трехмерных геологических структур с разломами позволяет создавать сложные геологические структуры на основе реальных данных с их трехмерной визуализацией, строить адаптивные сетки для конечно-разностного и конечно-элементного моделирования, а также рассчитывать сейсмические и другие поля в реальных геологических структурах.

Abstract. The original approach and releasing software GEOSpline for modeling of complex 3D geological structures are developed. The joint use of parametric b-spline for approximation of arbitrary distributed in space data, to build single geophysical surface, and volume splines for approximation of continuous volume properties together with special tree-hierarchy structure for ordering of separate surfaces in the model and cutting of their intersecting parts are the original approaches of the development. The developed mathematical model for construction of 3D geological structures with faults allows to create complex geological structures by real data with their 3d visualization, to build adoptive grids for finite-difference and finite element modeling, as well as to make calculations of seismic and other fields in real geological structures.

Современный уровень детальности и точности описания геологической среды, необходимый для поиска и выделения перспективных нефтяных и газовых горизонтов, требует использования трехмерных моделей геологических структур для решения как прямой, так и обратной задач сейсмического профилирования. Таким образом, моделирование сложнопостроенных трехмерных геологических структур с внутренними границами по реальным произвольно распределенным данным для их дальнейшей трехмерной визуализации и расчета геофизических полей в таких структурах является актуальной задачей.

Математическая модель геологической среды может быть построена на основе информации о границах раздела областей с более-менее однородными или плавно меняющимися свойствами, а также информации о самих этих свойствах. Возникающие в таком подходе слои сами определяются как пространство между последовательными границами. Тогда определение свойств в таком подходе сводится к определению принадлежности данной точки тому или иному слою. Таким образом, можно сформулировать достаточно общие требования, которым должны удовлетворять математические модели геологических сред:

Требования к модели среды

- Модель должна описывать блочно-непрерывную, преимущественно слоистую среду, но, возможно, с неровными границами и разрывами, допуская неоднозначность их проекцией на горизонтальную плоскость.

- Модель должна на логическом уровне учитывать пространственно-структурную иерархию геологических слоев.

- Входными данными модели являются положения границ геологических слоев, заданные на некотором наборе произвольно расположенных в пространстве точек (возможно с некоторой погрешностью), а также, также объемные свойства, заданные на некотором наборе произвольно расположенных в пространстве точек.

- Сама модель должна, по возможности, описываться минимальным количеством параметров, зависящим от сложности описываемой структуры и иметь возможность быстрой адаптации к дополнительно появляющейся информации.

Геологическая аналитическая модель (ГАМ)

Предлагаемая геологическая аналитическая модель (ГАМ), удовлетворяющая этим требованиям, представляет собой набор в общем случае неплоских границ вместе с ассоциированными с этими границами объемными свойствами среды, такими как скорости продольных и поперечных волн, плотностью, и другими параметрами. Геологические слои определяются как области пространства между соответствующими поверхностями, которым приписываются ассоциированные с

поверхностями объемные свойства. Данная концепция суммирует более чем 10-летний разработки [1-2].

Как видно, в предлагаемом подходе используется структура преимущественно слоистой модели среды, но при этом границы слоев представляют собой в целом гладкие искривленные поверхности, в общем случае с разрывами и с неоднозначной проекцией на горизонтальную плоскость.

Границы раздела

Каждая поверхность строится независимо, по соответствующим ей данным с учетом их погрешностей, и представляет собой параметрический бикубический сплайн, получаемый как решение вариационной задачи о минимизации отклонения от входных данных. Это позволяет удовлетворить различным дополнительным условиям, в частности разнообразным граничным условиям и ограничениям на кривизну. В таком подходе границы и их дифференциальные характеристики описываются аналитически посредством сравнительно небольшого числа сплайновых коэффициентов, что является важным преимуществом при решении, например, акустических и сейсмических задач, связанных с лучевым трассированием.

Требования к сплайновому описанию границ раздела слоев в предлагаемом подходе вытекают как из необходимости адекватно описывать реальные геологические структуры, так и из особенностей методов расчета волновых полей. Несмотря на то, что в целом осадочные породы имеют преимущественно слоистую структуру, однако вследствие сложных деформаций, границы геологических слоев могут иметь достаточно сложную конфигурацию и, в частности, образовывать складки. Кроме упругих или упруго-пластических деформаций отдельных границ могут встречаться внутренние разломы и сдвиги, приводящие к разрывам отдельных границ. Удобным математическим инструментом, для восстановления поверхности, обладающей отмеченными свойствами, является параметрический бикубический сплайн.

Иерархия границ и объемные свойства среды

При построении модели все сплайны рассчитываются независимо по соответствующим исходным данным нерегулярно заданным в пространстве. Чтобы объединить независимые представления отдельных границ и свойств, они упорядочиваются в иерархическую модель среды. Иерархическая модель позволяет описывать геологические структуры со сложной топологией, состоящие из слоёв сложной трёхмерной геометрии и локализованных объектов. Иерархическое упорядочивание позволяет описать вложенные структуры и реализовать операции над множествами для областей (вычитание, пересечение, объединение). Иерархическая

модель позволяет логически учесть взаимные пересечения сплайнов, не решая задачу о поиске линии пересечения.

Следует отметить, что объемные свойства среды, ассоциированные с отдельной поверхностью, описываются в общем случае объемным сплайном (см. рис.1), который строится по известной информации об этих свойствах в отдельных произвольно расположенных в пространстве точках. Такое описание включает в себя как простейшие случаи градиентные и однородные свойства.

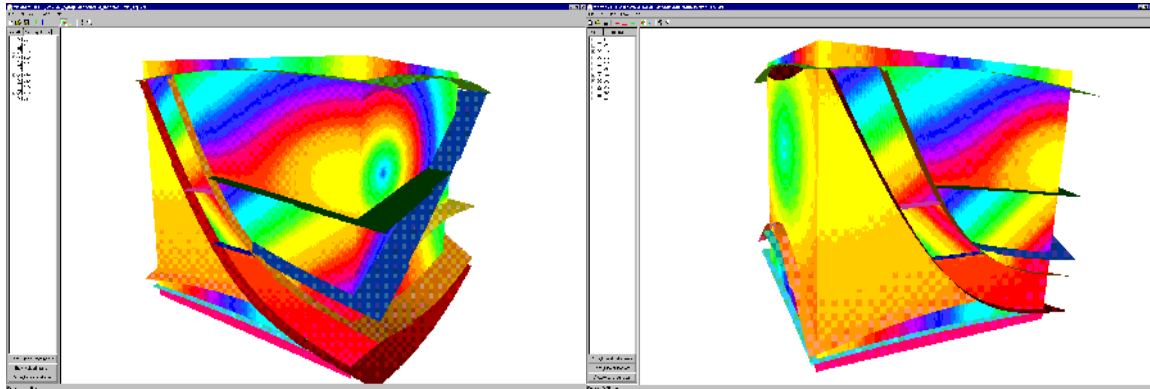


Рис.1 Сплайновое описание границ и объемных свойств среды

В своей исходной форме ГАМ модель трехмерной геологической среды позволяет вычислить, а значит и визуализировать как ее отдельные структурные элементы, которыми являются отдельные границы вместе с исходными данными, по которым они построены, так и всю совокупность иерархически упорядоченных границ вместе с объемными свойствами слоев.

Приложения модели

Кроме основной задачи – создания и визуализации – разработанная математическая модель среды позволяет без значительных затрат создавать сеточные модели с заданными в узлах свойствами, адаптированные под геологические структуры. В дальнейшем эти сетки могут использоваться для конечно-разностных или конечно-элементных расчетов интересующих геофизических полей.

Кроме того, для предлагаемой модели разработаны алгоритмы расчета волнового поля в лучевом приближении. При этом расчет траектории отдельного луча производится в динамическом режиме, что позволяет визуально анализировать его детали (см. рис.2). Сами лучи могут иметь различную сигнатуру (отражение или преломление) и менять свой тип (продольный или поперечный) при пересечении с границей. Вдоль лучей рассчитывается амплитуда и фаза, а также поляризация. На базе тех же алгоритмов решена задача лучевой трассировки от источника к

приемнику, а также задача вычисления волнового поля вдоль лучей. Для иллюстрации, на рис.2 показан процесс поиска трассы от источника у приемнику.

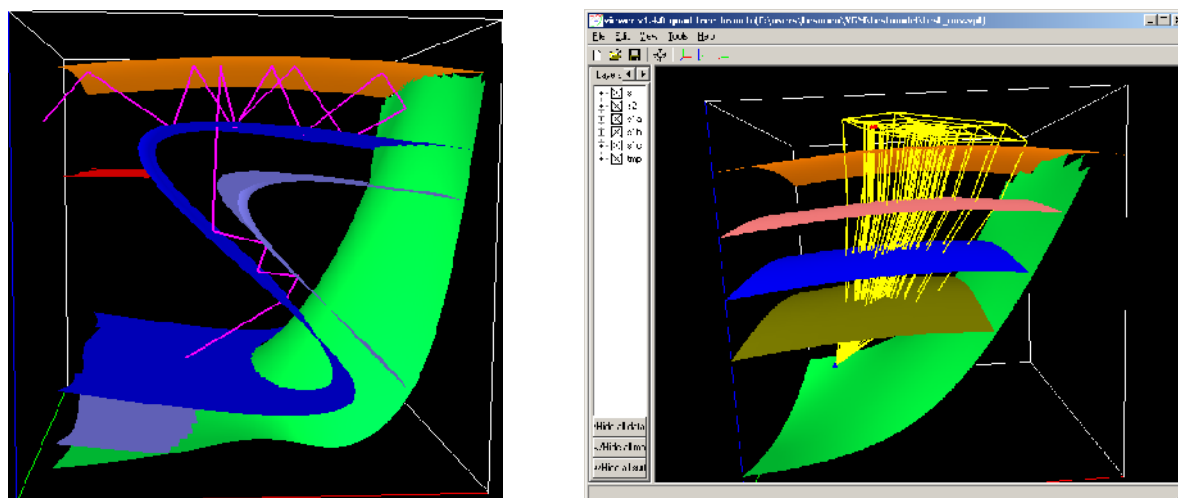


Рис.2. Расчет траектории луча в трехмерной модели среды (слева) и визуализация процесса поиска трассы «источник-приемник» (справа).

В целом, разработанный комплекс подходов, который реализован в виде программного модуля компанией ГЕОСлайн, позволяет:

1. строить модель, сложность и детальность которой адекватна сложности и детальности имеющихся данных, в отличие от сеточных моделей, где детальность описания всей среды, в значительной мере определяется детальностью описания наиболее мелкомасштабного структурного элемента;
2. автоматизировано адаптировать модель под экспериментальные данные, на основе математических процедур решения обратных задач, минимизируя или вовсе исключая ручной труд, тем самым минимизируя требования к ресурсам: людским (компетенции) и аппаратным (процессорные мощности).

Литература

1. Максимов Г.А., Ларичев В.А., Лесонен Д.Н., Подъячев Е.В., Деров А.В. Математическая модель трехмерной геологической среды с разломами для решения прямых и обратных задач геофизики. // Вестник ЦКР Роснедра, 2010, №2, с.38-43, ISSN 2074-5966
2. Ларичев В.А., Лесонен Д.Н., Максимов Г.А., Подъячев Е.В., Деров А.В. О подходе к трехмерному математическому моделированию сложной геологической среды с разрывами для визуализации и решения прямых и обратных задач геофизики. // Электронный журнал «Научная визуализация»:2010 Т.2 № 2 с:20 – 33. <http://sv-journal.com/2010-2/02/index.html> ISSN 2079-3537