

Построение композиционных геолого-структурных моделей в рамках вариационно-сеточного метода геокартирования и объектно-иерархического подхода

Андрей Гарьевич Плавник^{1,2}, Андрей Андреевич Сидоров³✉

- ¹ Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия
- ² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
- ³ Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В. И. Шпилемана, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: darth@cggu.ru ✉

Аннотация. Вариационно-сеточный метод геокартирования базируется на аппроксимации бикубическими сплайнами, допустимый размер сетки которых ограничен объемом оперативной памяти компьютеров. В работе описывается подход к решению задач построения карт геологических параметров, применяемый в рамках этого метода при недостаточности ресурсов вычислительной техники и основанный на последовательном построении карт по отдельным частям области картирования.

Реализация подхода рассмотрена для двух вариантов. Первый — при достаточно высокой плотности расположения данных на значительных территориях, состоит в последовательном расчете по частично перекрывающимся полосам. При существенно неравномерном распределении данных реализуется второй вариант, заключающийся в расчете детализированной сетки по локальным участкам и ее гладкой вклейке в общую карту. Гладкость на границах полос и вклеек обеспечивается через условие равенства коэффициентов сплайна для совпадающих узлов, которое задается за счет корректировки системы линейных алгебраических уравнений при решении задачи картирования.

На основе этих подходов реализована многомасштабная структурно-геологическая модель осадочного чехла по территории Западной Сибири. Формирование

композиционной модели осуществляется на основе объектно-иерархического подхода, который обеспечивает согласованность расчетов всех ее элементов, а также автоматизацию построений.

Ключевые слова: геокартирование, вариационно-сеточный метод, бикубический сплайн, объектно-иерархический подход, цифровой структурный каркас, композиционные карты

Цитирование: Плавник А. Г., Сидоров А. А. 2024. Построение композиционных геолого-структурных моделей в рамках вариационно-сеточного метода геокартирования и объектно-иерархического подхода // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 88–103. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-88-103>

Поступила 19.02.2024; одобрена 26.04.2024; принята 24.05.2024

Construction of compositional geological models using the variational grid method of geomapping and the object-hierarchical approach

Andrey G. Plavnik^{1,2}, Andrei A. Sidorov³✉

¹ West Siberian Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

³ V. I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Russia

Corresponding author: darth@crru.ru ✉

Abstract. The variational grid method of geomapping is based on approximation by bicubic splines, the permissible grid size of which is limited by the amount of computer RAM. The paper describes an approach to solving problems of constructing maps of geological parameters, using this method, when computer resources are insufficient. The approach is based on the sequential mapping for a set of fragments of the entire mapping area.

The implementation of the approach is considered for two options. The first, if the data density is sufficiently high, consists of sequential calculations over partially overlapping “bands”. If the data distribution is significantly uneven, the second option is implemented, which consists in calculating a detailed grid for local areas and smoothly pasting it into the general map. Smoothness at the boundaries of bands and insets is ensured through the condition of equality of spline coefficients for

coinciding nodes, which is set by adjusting the system of linear algebraic equations when solving the mapping problem.

Based on these approaches, a multiscale structural-geological model of the sedimentary cover over the territory of Western Siberia was implemented. The formation of a compositional model is carried out on the basis of an object-hierarchical approach, which ensures consistency in the calculations of all its elements, as well as automation of constructions.

Keywords: geomapping, variational grid method, bicubic spline, object-hierarchical approach, digital structural framework, compositional maps

Citation: Plavnik, A. G., & Sidorov, A. A. (2024). Construction of compositional geological models using the variational grid method of geomapping and the object-hierarchical approach. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 88–103. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-88-103>

Received Feb. 19, 2024; Reviewed Apr. 26, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Термин «геокартирование» имеет множество вариантов интерпретации, однако здесь мы его будем рассматривать как восстановление поля геологического или физического параметра G в виде функции двух координат по данным измерений этого параметра в отдельных точках с учетом модельных представлений о его пространственном распределении. Вариационно-сеточный метод геокартирования (ВСМГ) является одним из направлений приложения методов сплайн-интерполяции и аппроксимации [Holladay, 1957; de Boor, 1962; Смоляк, 1971; Harder, Desmarais, 1972; Briggs, 1974; Arcangéli и др., 2004; Роженко, 2005]. ВСМГ во многом наследует идеи вариационного подхода, обеспечивает реализацию широкого класса модельных условий и имеет длительную историю развития [Сидоров, 1979; Волков, 1988; Сидоров, Плавник, 2009; Плавник, 2010; Sidorov и др., 2014]. На его основе решается широкий круг практических геологических задач [Плавник, Сидоров, 2012, 2018; Kurchikov и др., 2019; Плавник и др., 2021; Сидоров, 2022a], в том числе таких, которые другими методами решаются или частично, или с большими трудозатратами.

Важная особенность метода заключается в возможности комплексования исходной геолого-геофизической информации [Плавник, 2010; Плавник и др., 2021; Сидоров, 2022b]. В рамках единого подхода в построении используются как прямые замеры моделируемого параметра, так и различные его трансформанты, косвенно связанные с картируемым полем. Другая особенность ВСМГ — использование полиномиальных сплайнов на регулярной сетке, не приуроченной к точкам расположения фактических данных. Это упрощает процесс расчетов и обеспечивает их вычислительную эффективность, однако не избавляет от всех трудностей, связанных с большой размерностью сетки. Вариационно-сеточный метод реализован в программном продукте GST¹; он показал

¹ GST — отечественное программное обеспечение. <http://www.geo-spline.ru/>

эффективность в решении сложных, нестандартных задач математической геологии [Сидоров, 1979, 2022а; Плавник, Сидоров, 2018], в частности в построении детальных региональных геологических моделей по обширным территориям, таким как Западная Сибирь.

Региональное геолого-математическое моделирование приобретает всё большую актуальность как в собственно научном, так и практическом аспекте. Цифровая геологическая модель в масштабе нефтегазоносного бассейна позволяет выявить закономерности формирования осадочного чехла, которые являются основой научных знаний о территории. С практической точки зрения региональные модели используются в планировании геологоразведочных работ для выявления перспективных в плане наличия полезных ископаемых областей. Ввиду высокой степени освоенности крупных Западно-Сибирских нефтегазовых месторождений начинают представлять интерес залежи меньшего порядка, находящиеся как на периферии провинции, так и на малоизученных территориях, на границах зон с выявленной нефтегазоносностью. Поэтому для решения практических задач, связанных с прогнозом наличия залежей углеводородов, региональность модели должна сочетаться с должной степенью детальности, которая обеспечивается наиболее полным учетом исходной геолого-геофизической информации.

Большая часть Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции покрыта плотной сетью сейсмических профилей и большим количеством данных бурения. При этом на этапе поиска проводится 2D-сейсморазведка, а в перспективных зонах и границах лицензионных участков недропользователей осуществляется покрытие высокодетальной 3D-сейсморазведкой. Плотность 2D-сейсморазведки исчисляется общей длиной профилей на квадратный километр; обычно она находится в диапазоне 1,6–2,2 км/км², но может быть и ниже. Этот параметр определяет минимальный размер структурного элемента, который с должной степенью надежности может быть закартирован на основе данной информации. Это следует из правила, согласно которому структура считается надежно определенной, если она подтверждена данными более чем одного профиля. Таким образом, для сетки профилей плотностью 2 минимальный размер надежно фиксируемых структур будет составлять ориентировочно 1 км, что, в свою очередь, определяет оптимальные размеры ячейки картирования, которые в зависимости от изменчивости структурного плана будут равны 0,5–1,0 км. Следовательно, для Западной Сибири размеры сетки картирования могут достигать 3 000 × 4 000 узлов или более.

Объем памяти, требуемый для решения задач картирования с помощью ВСМГ, в главной мере зависит от числа узлов расчетной сетки. Так, например, для расчета сетки 600 × 450 узлов только на решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) требуется около 950 Мбайт оперативной памяти, а при сгущении сетки в два раза объем требуемой памяти возрастает до 4,5 Гбайт. Итак, построение региональной карты высокой степени детальности посредством стандартного расчета выходит за рамки возможностей доступной современной вычислительной техники. Эта проблема сохраняется при построении карт на меньшую территорию с высокой плотностью исходной информации: для корректного учета данных 3D-сейсморазведки часто оптимальны сетки с размерами ячеек порядка нескольких десятков метров.

Очевидным решением для сеток большой размерности является построение серии согласованных на смежных границах зональных карт с последующим формированием итоговой композиционной карты. Проблематичность такого подхода заключается в сложности согласования зональных карт, в особенности при неравномерном пространственном распределении исходных данных. Эти проблемы характерны практически для всех методов картирования, однако аппроксимация бикубическими сплайнами, являющаяся основой ВСМГ, обеспечивает дополнительные возможности по обеспечению гладкого согласования зональных карт.

Методы

Значения картируемой поверхности в вариационно-сеточном подходе аппроксимируются функцией

$$G(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n s_{ij} g_{ij}(x, y),$$

$$g_{ij}(x, y) = B\left(\frac{x - x_i}{h_x}\right) B\left(\frac{y - y_j}{h_y}\right),$$

$$x_i = x_0 + ih_x,$$

$$y_j = y_0 + jh_y,$$

где s_{ij} — коэффициенты сплайна; g_{ij} — значения базисных функций в точке (x, y) ; h_x и h_y — шаги сетки по координатам x и y соответственно; B — кубический B -сплайн. Решение задачи картирования ищется в прямоугольной области Ω с угловыми точками (x_1, y_1) и (x_{m-1}, y_{n-1}) из условия минимизации некоторого квадратичного функционала. Здесь m и n определяют размерность сетки коэффициентов сплайна. Задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно вектора неизвестных коэффициентов сплайна s_{ij} . Детально постановка задачи геокартирования в рамках вариационно-сеточного метода представлена в других работах авторов [Плавник, 2010; Плавник и др., 2021]. Для рассматриваемых далее вопросов эти подробности имеют второстепенное значение.

Выделим внутри области Ω подобласти Ω_k , такие, что выполняется условие полноты их объединения:

$$\Omega = \bigcup \Omega_k.$$

Для каждой подобласти Ω_k рассчитываются сплайны $G_k(x, y)$, участвующие в определении композиционного сплайна $G(x, y)$ в виде некоторой зависимости, которую здесь формально запишем в виде

$$G(x, y) = f(G_1, G_2, \dots, G_K),$$

где K — общее число подобластей.

Вариантов деления исходной прямоугольной области картирования может быть много — наиболее простым является «разрезание» ее на отдельные полосы. Независимый расчет карт по полосам с последующей сборкой единого сплайна позволяет существенно снизить требования к объему оперативной памяти и сократить время вычислений. Действительно, необходимые ресурсы и временные затраты для расчета карты при условии $t < n$ пропорциональны соотношению tn^2 . При разделении области картирования вдоль более длинной стороны на K полос затраты для расчета снижаются приблизительно в K раз по сравнению с решением задачи в рамках единого сплайна. Благодаря кратному снижению объема используемой памяти и времени вычислений возможно построение больших детальных карт, однако качество этих карт непосредственным образом зависит от технологии сопряжения фрагментов.

Анализ и многочисленные эксперименты, проведенные на этапе отработки технологии, показали, что ни один из очевидных способов сопряжения фрагментов после их построения, таких как варьирование ширины полосы перекрытия зональных карт, применение разных методов усреднения решений, не дают однозначно приемлемого результата. Не приводит к улучшению ситуации и прямое использование значений в узлах сетки одной зональной карты при построении соседней: часто имеет место нарушение гладкости карты, которое проявляется в виде изломов изолиний на границе состыковки полос. Применение аппарата аппроксимации на основе B -сплайнов позволяет снять ряд перечисленных выше вопросов. Общая идея заключается в сопряжении решений по отдельным полосам на уровне коэффициентов сплайна.

Рассмотрим следующую постановку задачи для двух соседних полос (рис. 1). Решение ищется для прямоугольной области определения сплайна $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$. Необходимо определить коэффициенты аппроксимирующего сплайна s_{ij} по сетке узлов $\{x_i, y_j\}$, $i = (0, \dots, m + 1)$, $j = (0, \dots, n + 1)$.

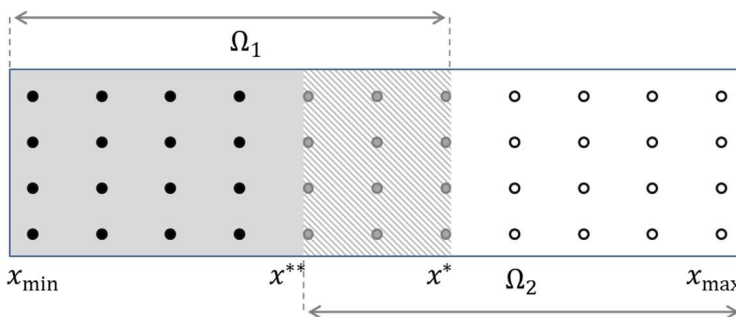


Рис. 1. Пример композиционной сетки с сопряжением двух полос

Fig. 1. An example of a composition mesh with two overlapping bands

Пусть $G_1(x, y)$ и $G_2(x, y)$ — два сплайна, первый из которых определяется в интервале $[x_{\min}, x^*]$, а второй — $[x^{**}, x_{\max}]$. По оси y интервал общий: $[y_{\min}, y_{\max}]$. Значения x^* и x^{**} удобно связывать с координатами узлов сплайна. Обозначим через m_1 и m_2 соответствующие номера: $x^* = x_{m_1}$, $x^{**} = x_{m_2}$. Для выполнения условия перекрытия полос необходимо

потребовать, чтобы соблюдалось неравенство $x^* > x^{**}$ или $m_1 > m_2$. Набор коэффициентов сплайна по первой полосе обозначим как s_{ij}^1 , где i изменяется от 0 до $m_1 + 1$. Аналогично для коэффициентов второй полосы введем обозначения s_{ij}^2 , с нумерацией от $m_2 - 1$ до $m + 1$.

Важным свойством кубических B -сплайнов является компактность носителя, т. е. ограниченность области определения: $g_{ij}(x, y) = 0$ при $x \geq x_{i+2}$ или $x \leq x_{i-2}$. Это означает, что изменение коэффициента сплайна для узла x_i не влияет на вычисляемые значения функции для ячеек с координатами $x \geq x_{i+2}$ и $x \leq x_{i-2}$. Таким образом, для второй полосы можно сформулировать условие согласованности коэффициентов сплайна в области перекрытия (штрихованная область на рис. 1):

$$s_{ij}^2 = s_{ij}^1, \\ i = m_2 - 1, m_2, m_2 + 1. \quad (1)$$

Исходя из свойства компактности носителя, данное условие ограничивает влияние значения коэффициентов сплайна первой полосы на значения картируемой функции во второй полосе двумя граничными узлами. В остальной части второй полосы, для которой $x \geq x_{m_1+2}$, значения искомой функции будут в точности равны результатам решения $G_2(x, y)$. При этом на стыке полос в силу свойств сплайнов обеспечивается условие неразрывности значений искомой функции, а также ее первых и вторых производных.

Стоит отметить, что условие сопряжения ($s_{ij}^2 = s_{ij}^1$) в зоне перекрытия полос, обеспечивающее неразрывность значений и производных картируемой поверхности, автоматически не гарантирует отсутствие видимых артефактов на линии стыка. Если условие сопряжения будет обеспечено искусственно, путем приравнивания коэффициентов сплайна после решения задачи картирования для второй полосы, то велика вероятность появления в окрестности линии стыка высокоградиентных зон и локальных экстремумов, не подтвержденных исходными данными. Важно, чтобы решение задачи картирования для сетки сплайнов $G_2(x, y)$ было произведено с учетом условия сопряжения коэффициентов.

Поскольку вектор коэффициентов сплайна есть результат решения системы линейных алгебраических уравнений, к которой сводится задача картирования, условие сопряжения ($s_{ij}^2 = s_{ij}^1$) вводится непосредственно в СЛАУ путем замены некоторых элементов вектора правой части на значения известных коэффициентов сплайна первой полосы и соответствующей корректировки коэффициентов матрицы. При таком подходе сопряжение полос будет происходить непосредственно на этапе решения задачи картирования для второй полосы с выполнением требования минимума отклонений как от исходных данных, так и от модельных условий.

Условие «сшивки» накладывается на значения коэффициентов сплайна, расположенных вдоль одной из сторон картируемой подобласти. Однако сам по себе подход не ограничивает конфигурацию зоны сопряжения решений — он может быть применен к произвольному набору узлов. Значит, для искомых коэффициентов сплайна s_{ij} в области картирования Ω возможно выполнить условие сопряжения: $s_{ij} = s_{ij}^*$, если $(x_j, y_i) \in \Omega^*$, где s_{ij}^* — набор известных коэффициентов сплайна узлов сетки внутри области $\Omega^* \in \Omega$.

Таким образом, данный подход может использоваться для привлечения в виде данных особого типа фрагментов других сеток по областям произвольной формы, что имеет важное практическое значение. Стоит отметить, что добавление в задачу картирования значений искомой функции в узлах в виде точечных данных, пусть даже с высоким весом, не будет эквивалентным решением, потому что эти данные будут аппроксимироваться в среднеквадратичном приближении. Обсуждаемый же подход не только обеспечивает абсолютно точное совпадение сеток в пределах заданной области, но и позволяет уменьшить размерность СЛАУ.

Алгоритм сопряжения решений реализован в программе GST, на его основе происходят расчеты детальных региональных структурных моделей. Например, при построении карт по территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции рабочая сетка имеет ячейки 500×500 м. Для ее построения область картирования разбивается на 25 полос, каждая из которых имеет размеры $2\,000 \times 100$ км или $4\,000 \times 200$ узлов. Территории месторождений, как правило, охарактеризованы плотной сетью данных 3D-сейсморазведки и эксплуатационного бурения, поэтому в пределах этих областей необходимо использовать в разы более детальную сетку. При этом, если оставаться в рамках картирования по полосам, дальнейшая детализация возможна только за счет сужения полос и уменьшения объема информации, используемой в расчете каждой из них. Это обстоятельство порождает объективные ограничения возможности детализации сетки, которые главным образом зависят от степени неоднородности расположения исходных данных в плане.

При существенной неравномерности плотности пространственного распределения исходных данных более целесообразным представляется подход, когда сперва строится карта по сетке базовой детальности, а далее в пределах зон требуемой детализации рассчитываются карты по более густой сетке с условием сопряжения решений на внешней границе. Во многом эта задача аналогична расчету по полосам с тем лишь исключением, что область $\Omega_2 \in \Omega_1$, а сплайн $G_2(x, y)$ в общем случае построен на более детальной сетке, чем сплайн $G_1(x, y)$. Для выполнения процедуры сопряжения необходимо задать коэффициенты сплайна s_{ij}^2 для всех узлов, расположенных на границе области Ω_2 .

В этой ситуации оказывается очень важным известное свойство полиномиальных сплайнов — возможность аналитического пересчета значений коэффициентов сплайна на более мелкую сетку: $s_{ij}^g = F(s_{ij}^1)$. Для всей области определения сплайна выполняется условие $G_1(x, y) = G_g(x, y)$, а шаг h сетки сплайна G_g связан с шагом H сплайна G_1 соотношением

$$h = H/2^n, \quad (2)$$

где $n = (0, 1, 2, \dots, N)$. Это свойство сплайнов легло в основу мультисеточного подхода, который реализован в GST в виде технологии гладких вклеек. По сути, вклейка представляет собой самостоятельную задачу картирования по некоторой прямоугольной области, входящей в область базовой карты. Шаг сетки вклейки связан с шагом базовой карты правилом (2), а на ее границах выполняется условие сопряжения коэффициентов сплайна.

С помощью аппарата вклеек решается несколько видов практических задач. В первую очередь это детализация карт по отдельным областям. Также этот подход может быть применен для локального перестроения карты при добавлении или изменении исходных данных. Кроме прочего, это инструмент, позволяющий выделить локальные построения в отдельные задачи и сформировать технологическую цепочку расчета модели с распределением зон ответственности между несколькими специалистами. Логическое разделение региональной и локальных моделей оправдано как с научной точки зрения, потому что на разных пространственных масштабах могут использоваться разные модельные условия, так и с практической позиции, поскольку это позволяет оптимизировать процесс расчетов. Действительно, требующие уточнения локальные модели строятся на основе плотной сети исходных данных, как правило, избыточно детальной для регионального масштаба. По этой причине нет необходимости загружать в региональную модель базовой детальности полный объем 3D-сеймики или эксплуатационного бурения. В свою очередь, при построении вклейки используются только данные, находящиеся внутри области детализации, а увязка с региональным планом происходит на основе коэффициентов сплайна по ограниченному набору узлов базовой сетки.

На рис. 2 представлена общая схема построения композиционной карты с одной уточняющей вклейкой. Она характеризует два рабочих потока: построение большой региональной карты и детальное картирование хорошо изученного участка. Эти работы могут быть разделены между разными специалистами, если обеспечена синхронизация обмена информацией между процессами. Следует также учесть, что реальные геологические модели осадочного чехла могут содержать большое количество (несколько десятков) структурных поверхностей, карт толщин и других параметров; областей, требующих детализации, также может быть множество. Масштабирование представленной схемы будет означать кратное усложнение внутренней логики композиционной модели, и для качественного выполнения всех расчетов потребуется максимальный уровень алгоритмизации и автоматизации технологической цепочки.

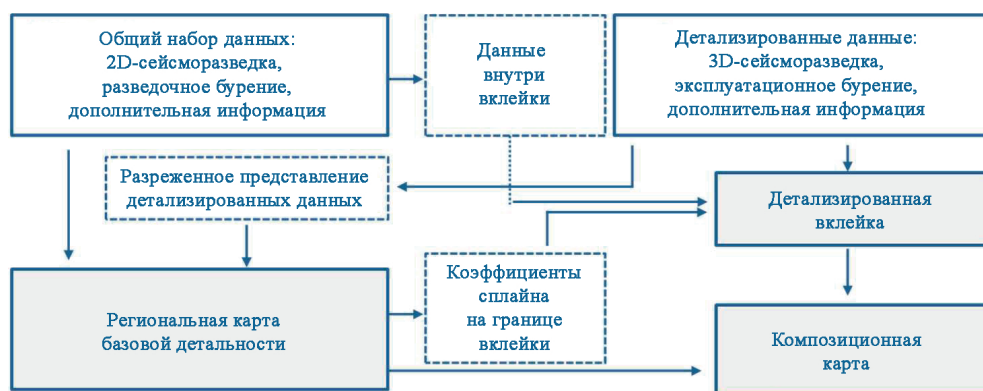


Рис. 2. Схема построения композиционной карты

Fig. 2. Scheme for constructing a compositional map

Методические подходы к формальному описанию некоторого технологического процесса, в частности геолого-математического моделирования, с целью его автоматизации обобщены в понятие workflow-методы. Не вдаваясь подробно в их обзор, отметим, что наиболее популярными способами представления некоторого процесса являются скриптовые языки, ориентированные ациклические графы, в том числе сети Петри, а также смешанные подходы. В настоящее время большая часть специализированного геологического программного обеспечения в той или иной мере использует workflow-технологии. Они позволяют структурировать элементы геологической модели, представлять процесс ее расчета в виде последовательности действий и выполнять их в автоматическом режиме, минимизировав таким образом фактор случайной ошибки.

В GST структуризация и автоматизация рабочего процесса реализована в виде объектно-иерархического подхода [Сидоров, 2022б]. Как следует из названия, в основе подхода лежит иерархия объектов, представляющих собой различные элементы геологической модели: от исходных данных до конечных результатов. Схематично иерархию можно выразить в виде совокупности двух наборов элементов: $H = (O, R)$, где $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ — множество объектов-данных, а $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ — множество объектов-ссылок. Каждый объект O_i представляет отдельный элемент модели: фрагмент исходных данных, структурную карту, геологическую границу и т. п. Каждый элемент из множества ссылок R_j определяет отношение зависимости двух элементов из O . Эту иерархию легко можно представить в виде ориентированного двудольного графа, пример которого приведен на рис. 3. Результирующий элемент модели (узел O_5) строится на основе исходных данных, представленных узлами O_1, O_2 . Узлы O_3, O_4 хранят промежуточные результаты вычислений. Каждый узел R_{ij} , представляющий объект-ссылку, фактически устанавливает правила передачи данных от объекта O_i объекту O_j в процессе исполнения расчетов.

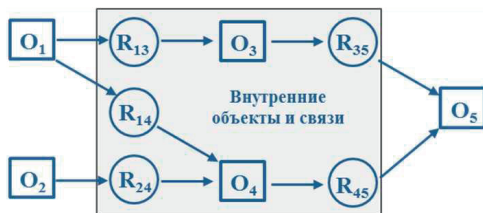


Рис. 3. Представление геолого-математической модели в виде ориентированного двудольного графа

Fig. 3. Representation of a geological model in the form of a directed graph

Объектно-иерархический подход позволяет алгоритмизировать процесс построения геолого-математической модели и автоматизировать расчет, т. к. иерархия объектов однозначно устанавливает последовательность действий. Его практическая ценность явно проявляется при построении региональных структурных каркасов, где число объектов данных исчисляется сотнями, а структура графа существенно более громоздка, чем изображенная на рис. 3. В этой связи стоит упомянуть еще одно достоинство подхода — это возможность конструирования модели из макроэлементов

путем копирования и модифицирования фрагментов графа. Под макроэлементом $M = (O^R, O^{En}, O^{Int}, R^{En}, R^{Int})$ подразумевается фрагмент иерархии, описывающий логически очерченную часть модели или задачи, где O^R — множество результирующих объектов, O^{En}, R^{En} — объекты и ссылочные связи, обозначающие точки входа, а O^{Int}, R^{Int} — внутренние объекты и ссылки, не имеющие связей вне макроэлемента M . Набор результирующих объектов определяется исходя из логического смысла макроэлемента; входные объекты определяются по формальным признакам: они не имеют входящих ссылочных связей с объектами внутри макроэлемента.

Результаты

Возвращаясь к проблеме построения композиционных карт, еще раз отметим, что вклейка, по сути, есть локализованный аналог большой карты, который, как правило, строится по схожему сценарию с некоторыми вариациями в исходных данных. Иначе говоря, для создания детализированного структурного каркаса по заданной области внутри региональной модели конструируется граф решения со структурой, которая аналогична структуре графа для каркаса базовой детальности.

На рис. 4 представлена общая схема построения композиционной структурной модели в терминах объектно-иерархического подхода, где индексом 0 обозначены элементы, относящиеся к модели базовой детальности, а индекс 1 относится к локальной детализированной модели. Макроэлементы M_{Data}^0 представляют собой совокупность объектов, содержащих исходные данные для моделирования, макроэлементы M_{Mod}^0 — фрагменты иерархии, отвечающие за расчет элементов структурного каркаса: структурных поверхностей, толщин, границ распространения пластов. Результирующая композиционная модель создается на основе базовой и детализированной модели, определенных внутри прямоугольников картирования, представленных отдельными объектами дерева иерархии R_i .

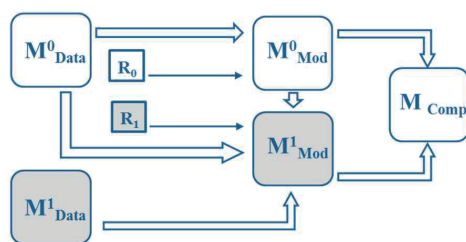


Рис. 4. Схема композитной структурной модели в терминах объектно-иерархического подхода

Fig. 4. Scheme of a composite structural model in terms of the object-hierarchical approach

Дополнение композиционной модели новым детализирующим фрагментом в рамках данного подхода решается довольно просто и технологично. Копирование всех элементов схемы с индексом 1 создает дубликат детализирующей модели с сохранением всех

связей между объектами (входными, результирующими и внутренними) и параметров моделирования. В большинстве случаев достаточно ввести нужные координаты для нового прямоугольника картирования R_i , чтобы все процедуры построения локальной детализированной модели были применены в заданных границах.

Алгоритмы и подходы, описанные в данной статье, на практике воплощены в постоянно действующей цифровой модели «Структурный каркас Западной Сибири», разработанной в Научно-аналитическом центре рационального недропользования (НАЦРН) им. В. И. Шпилемана. Модель описывает основные стратиграфические границы осадочного чехла и учитывает широкий спектр исходной информации, как сейсмической, так и данных бурения. В расчетах применяются все способы сопряжения решений: деление на полосы, вклейки, вставка фрагментов других сеток. На рис. 5 показана общая схема разбиения области моделирования. Исходя из специфики задач НАЦРН, а также частоты поступления и изменения исходной информации, выделяются два основных блока: южный, включающий территорию ХМАО, и северный. Для областей с наибольшей плотностью исходных данных созданы детализирующие подмодели, вклейки. Каждый блок или вклейка представляют собой отдельную цифровую структурную модель осадочного чехла, сопряженную на границах с базовой моделью, а при картировании в пределах блоков или вклеек также применяется процедура построения карт по полосам. Размер ячейки сетки базовой детальности (для северного и южного блока) составляет 500 м; по отдельным территориям, характеризующимся резкими структурными формами и обеспеченным данными 3D-сейсморазведки, использовалась сетка с шагом 125 м.

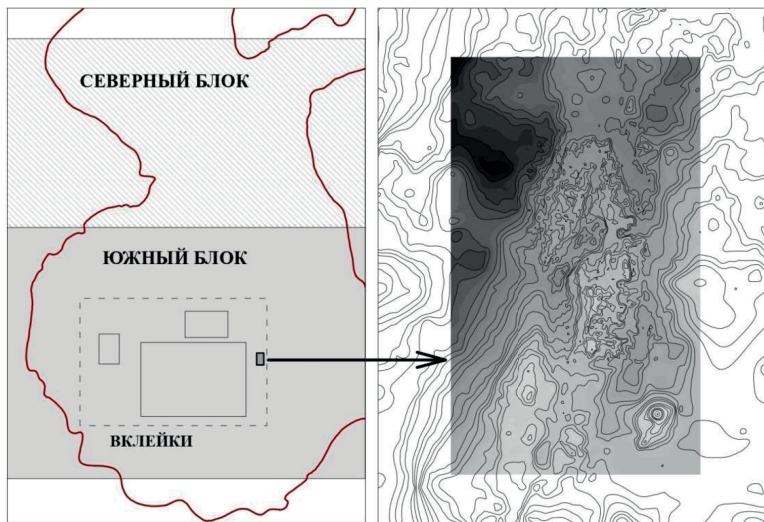


Рис. 5. Схема региональной композиционной структурно-геологической модели по территории Западной Сибири (слева); детализирующая вклейка для региональной структурной карты по доюрскому основанию (справа)

Fig. 5. Scheme of the regional compositional structural-geological model for the territory of Western Siberia (left); detailing insert for the regional structural map of the pre-Jurassic surface (right)

В правой части рис. 5 показано сопряжение базовой карты по доюрскому основанию (изолинии без заливки) и детализирующей вклейки по Аригольско-Максимкинскому участку. Можно увидеть, что изолинии композитной карты на границе вклейки не прерываются ни скачков, ни изломов, что свидетельствует о гладкости сопряжения карт. Это условие соблюдается для всех структурных элементов модели.

Заключение

Возможности методов компьютерного картирования ограничиваются объемом оперативной памяти и быстродействием вычислительной техники. Особую актуальность эта проблема приобретает при расчетах сеток большой размерности, характерных для сверхдетальных либо региональных задач картопостроения. В рамках рассматриваемых в данной работе методов решение этой проблемы осуществляется через разбиение области моделирования на ряд подобластей (полос) и последовательный расчет каждой из них с помощью вариационно-сеточного метода с условием гладкой склейки решений на границах подобластей. Принцип гладкого согласования сеток основан на условии равенства коэффициентов сплайна для совпадающих узлов в области перекрытия соседних полос, что достигается подстановкой известных значений коэффициентов сплайна в СЛАУ. Склейка двух решений по произвольному набору узлов дает возможность установить строгое равенство двух сеток внутри некоторого полигона, что имеет важное практическое значение при необходимости учета в задаче картирования других карт по заданной области. Аналитическая зависимость между значениями коэффициентов сплайнов, определенных на сетках, шаги которых связаны соотношением (2), обеспечивает реализацию мультисеточных технологий для гладкого согласования карт разной детальности.

Описанные выше алгоритмы реализованы в программном комплексе GST. В сочетании с объектно-иерархическим подходом мультисеточные технологии, базирующиеся на вариационно-сеточном подходе, позволяют создавать сложные многомасштабные автоматизированные геолого-структурные модели, состоящие из десятков или сотен элементов. Примером практического применения технологии вклеек и последовательного расчета по полосам является созданный в НАЦРН им. В. И. Шпильмана цифровой структурный каркас по территории Западной Сибири с детализирующими подмоделями в наиболее изученных областях.

Список источников

- Волков А. М. 1988. Геологическое картирование нефтегазоносных территорий с помощью ЭВМ. М.: Недра. 222 с.
- Плавник А. Г. 2010. Обобщенная сплайн-аппроксимационная постановка задачи картирования свойств геологических объектов // Геология и геофизика. Том 51. № 7. С. 1027–1037.
- Плавник А. Г., Сидоров А. Н. 2012. К оценке достоверности картирования свойств геологических объектов в рамках сплайн-аппроксимационного подхода // Сибирский журнал индустриальной математики. Том 15. № 1 (49). С. 66–76.

- Плавник А. Г., Сидоров А. Н. 2018. Картирование свойств геологических объектов с учетом анизотропии на основе моделирования деформационного преобразования // Математическое моделирование. Том 30. № 3. С. 19–36.
- Плавник А. Г., Сидоров А. Н., Сидоров А. А., Торопов Э. С. 2021. Геокартирование на основе сплайн-аппроксимационного подхода. Тюмень: ТИУ. 188 с.
- Роженко А. И. 2005. Теория и алгоритмы вариационной сплайн-аппроксимации. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. 243 с.
- Сидоров А. Н. 1979. Метод оптимального построения карт геологических параметров с точки зрения интерполирующих и сглаживающих сплайнов // Проблемы нефти и газа Тюмени. № 44. С. 12–24.
- Сидоров А. А. 2022а. Вариационно-сеточный подход к построению литологических моделей клиноформных отложений // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 8. № 1 (29). С. 109–125. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-109-125>
- Сидоров А. А. 2022б. Объектно-иерархический подход к созданию Workflow для задач геологического моделирования // Информационные технологии и вычислительные системы. № 4. С. 103–114. <https://doi.org/10.14357/20718632210410>
- Сидоров А. А. 2022в. О формировании цифровой постоянно действующей структурной модели осадочного чехла Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. Том 63. № 8. С. 1153–1166. <https://doi.org/10.15372/GiG2021140>
- Сидоров А. Н., Плавник А. Г. 2009. Определение и учет интегральных показателей в задачах геокартирования // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. № 5. С. 16–20.
- Смоляк С. А. 1971. Сплайны и их применение // Экономика и математические методы. Том 7. № 3. С. 419–431.
- Arcangéli R., Silanes M. C. L., Torrens J. J. 2004. Multidimensional Minimizing Splines: Theory and Applications. New York: Springer New York. XV, 263 pp. <https://doi.org/10.1007/b130045>
- Briggs I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature // Geophysics. Vol. 39. No. 1. Pp. 39–48. <https://doi.org/10.1190/1.1440410>
- de Boor C. 1962. Bicubic spline interpolation // Journal of Mathematics and Physics. Vol. 41. No. 3. Pp. 212–218.
- Harder R. L., Desmarais R. N. 1972. Interpolation using surface splines // Journal of Aircraft. Vol. 9. No. 2. Pp. 189–191. <https://doi.org/10.2514/3.44330>
- Holladay J. C. 1957. A smoothest curve approximation // Mathematical Tables and Other Aids to Computation. Vol. 11. No. 60. Pp. 233–243. <https://doi.org/10.2307/2001941>
- Kurchikov A. R., Plavnik A. G., Itskovich M. V. 2019. Quasi-three-dimensional modelling of the Jurassic-Cretaceous sediments hydrogeochemical conditions in the central part of the West Siberian megabasin // Applied Geochemistry. Vol. 110. Article 104433. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104433>
- Sidorov A. N., Plavnik A. G., Sidorov A. A., Shutov M. S. 2014. Use of variational methods in geological mapping // Mathematics of Planet Earth. Lecture Notes in Earth System Sciences / E. Pardo-Igúzquiza, C. Guardiola-Albert, J. Heredia, L. Moreno-Merino, J. Durán, J. Vargas-Guzmán (eds.). Berlin; Heidelberg: Springer. Pp. 325–328. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32408-6_72

References

- Volkov, A. M. (1988). *Geological mapping of oil and gas bearing areas using a computer*. Nedra. [In Russian]
- Plavnik, A. G. (2010). Generalized spline-approximation problem formulation for spatial data modeling in geosciences. *Russian Geology and Geophysics*, 51(7), 801–807. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.06.008>
- Plavnik, A. G., & Sidorov, A. N. (2012). About estimation of the certainty of plotting the properties of geological objects in the framework of the spline approximation approach. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki*, 15(1), 66–76. [In Russian]
- Plavnik, A. G., & Sidorov, A. N. (2018). Mapping the properties of geological objects with allowance for anisotropy based on the simulation of the deformation transformation. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 10(5), 629–638. <https://doi.org/10.1134/S2070048218050095>
- Plavnik, A. G., Sidorov, A. N., Sidorov, A. A., & Toropov, E. S. (2021). *Geo-mapping based on spline approximation approach*. Industrial University of Tyumen. [In Russian]
- Rozhenko, A. I. (2005). *Theory and algorithms of variational spline approximation*. The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. [In Russian]
- Sidorov, A. N. (1979). Method of optimal mapping of geological parameters in terms of interpolating and smoothing splines. *Problemy nefti i gaza Tyumeni*, (44), 12–24. [In Russian]
- Sidorov, A. A. (2022a). Variational gridding approach to the lithological modeling of clinof orm-type deposits. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 8(1), 109–125. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-109-125> [In Russian]
- Sidorov, A. A. (2022b). Object-hierarchical approach for creating workflows in geo-modeling. *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, (4), 103–114. <https://doi.org/10.14357/20718632210410> [In Russian]
- Sidorov, A. A. (2022c). On the creation of a digital permanently operating structural model for the sedimentary cover of the West Siberian petroleum province. *Russian Geology and Geophysics*, 63(8), 1153–1166. <https://doi.org/10.15372/GiG2021140> [In Russian]
- Sidorov, A. N., & Plavnik, A. G. (2009). Use and calculation of integral values in geological gridding. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex*, (5), 16–20. [In Russian]
- Smolyak, S. A. (1971). Splines and their applications. *Economics and Mathematical Methods*, 7(3), 419–431. [In Russian]
- Arcangéli, R., Silanes, M. C. L., & Torrens, J. J. (2004). *Multidimensional minimizing splines: Theory and applications*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/b130045>
- Briggs, I. C. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1), 39–48. <https://doi.org/10.1190/1.14440410>
- de Boor, C. (1962). Bicubic spline interpolation. *Journal of Mathematics and Physics*, 41(3), 212–218.
- Harder, R. L., & Desmarais, R. N. (1972). Interpolation using surface splines. *Journal of Aircraft*, 9(2), 189–191. <https://doi.org/10.2514/3.44330>
- Holladay, J. C. (1957). A smoothest curve approximation. *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, 11(60), 233–243. <https://doi.org/10.2307/2001941>

Kurchikov, A. R., Plavnik, A. G., & Itskovich, M. V. (2019). Quasi-three-dimensional modeling of the Jurassic-Cretaceous sediments hydrogeochemical conditions in the central part of the West Siberian megabasin. *Applied Geochemistry*, 110, Article 104433. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104433>

Sidorov, A. N., Plavnik, A. G., Sidorov, A. A., & Shutov, M. S. (2014). Use of variational methods in geological mapping. In E. Pardo-Igúzquiza, C. Guardiola-Albert, J. Heredia, L. Moreno-Merino, J. Durán, & J. Vargas-Guzmán (Eds.), *Mathematics of Planet Earth. Lecture Notes in Earth System Sciences* (pp. 325–328). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32408-6_72

Информация об авторах

Андрей Гарьевич Плавник, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия; профессор кафедры геологии месторождений нефти и газа, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
plavnikag@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8099-4874>

Андрей Андреевич Сидоров, кандидат физико-математических наук, заведующий отделением математического моделирования геологических объектов, Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В. И. Шпилмана, Тюмень, Россия
darth@cr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8639-2644>

Information about the authors

Andrey G. Plavnik, Dr. Sci. (Tech.), Chief Researcher, West Siberian Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia; Professor, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
plavnikag@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8099-4874>

Andrei A. Sidorov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department of the Mathematical Modeling of Geological Objects, V. I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Russia
darth@cr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8639-2644>