



**А.А. Сидоров**  
канд. физ.-мат. наук  
Нац РН им. В.И. Шпильмана<sup>1</sup>  
отделение математического моделирования геологических  
объектов  
заведующий лабораторией математического моделирования  
[darth@crru.ru](mailto:darth@crru.ru)

# Цифровая модель геологического строения осадочного чехла центральной части Западной Сибири

<sup>1</sup>Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана. Россия, 625026, Тюмень, ул. Малыгина 75, а/я 286.

Цифровой структурный каркас представляет собой совокупность математических алгоритмов с предопределенными параметрами и связями, в результате работы которых получают набор согласованных карт – структурных, изохрон, скоростей, толщин пластов и комплексов, карт свойств. Новая информация (разбивки, сейсмическая корреляция), загружаемая в базу данных, передается в модель, обновление которой происходит в автоматическом режиме. Специалисты, курирующие соответствующие геологические объекты, имеют интерактивный доступ к результатам построений непосредственно со своего рабочего места и могут оперативно принимать решения относительно правильности внесенных изменений. На текущий момент ЦСК покрывает центральную часть Западно-Сибирской НГП, включая ХМАО, прилегающие районы ЯНАО, юга Тюменской и Томской областей и характеризует юрскую и меловую части разреза. Существует также территориальное дополнение цифровой модели юрской толщи для центральных и северных частей ЯНАО, включая Таймыр

**Ключевые слова:** цифровые модели; гекарттирование; вариационный метод; цифровой структурный каркас; попластовые карты свойств

**С** момента основания НАЦ РН перед отделением математического моделирования стояла задача разработки и практической реализации технологий создания численных моделей геологических объектов и процессов, частным случаем чего является гекарттирование. В основу был положен многолетний опыт, наработанный специалистами отделения с середины 1970-х гг., в результате чего появился ряд решений, основанных на мощном и гибком вариационном методе геологического картирования (ВГМК), реализованных в специализированном программном продукте *GST (GeoSpline Technology)*.

В настоящее время существует множество интерполяционных или аппроксимационных методов приближения. Не вдаваясь в их подробный анализ, отметим, что большинство из них не содержит принципиально новых идей, поскольку задача картостроения рассматри-

вается как формальное приближение исходных данных некоторыми функциями.

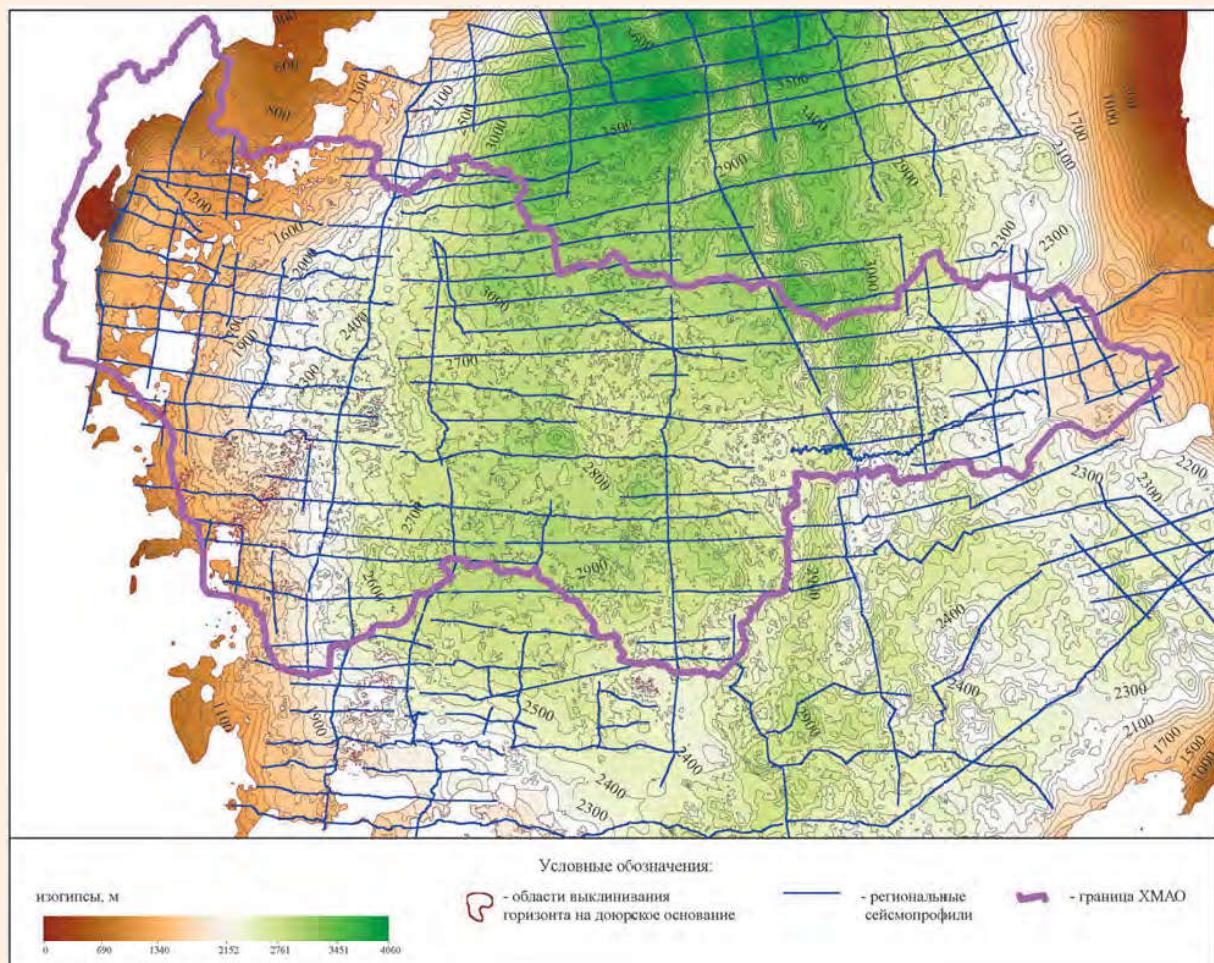
Принципиально иной подход к проблеме гекарттирования подразумевает использование априорной информации о свойствах восстанавливаемой поверхности. В кригингах это делается с помощью вариограмм, являющихся оценкой автокорреляционной функции некоторого случайного поля. В вариационном методе картирования в качестве априорной информации задаются линейные операторы, описывающие свойства картируемой поверхности, и соответствующие им функционалы. Вариационная постановка задачи записывается следующим образом:

$$\rho \|Lu + Np - \tilde{z}\|_{L_2}^2 + \alpha \cdot S + \beta \|Au - Bv\|_{L_2(\Omega)}^2 = \min_{u \in H, \lambda, \mu},$$

где  $u$  – картируемое поле,  $\tilde{z}$  – реальные измерения геологического параметра или его трансфор-

Рис. 1.

Структурная карта отражающего горизонта Б (подошвы баженовской свиты и ее возрастных аналогов) по центральной части Западно-Сибирской НГП



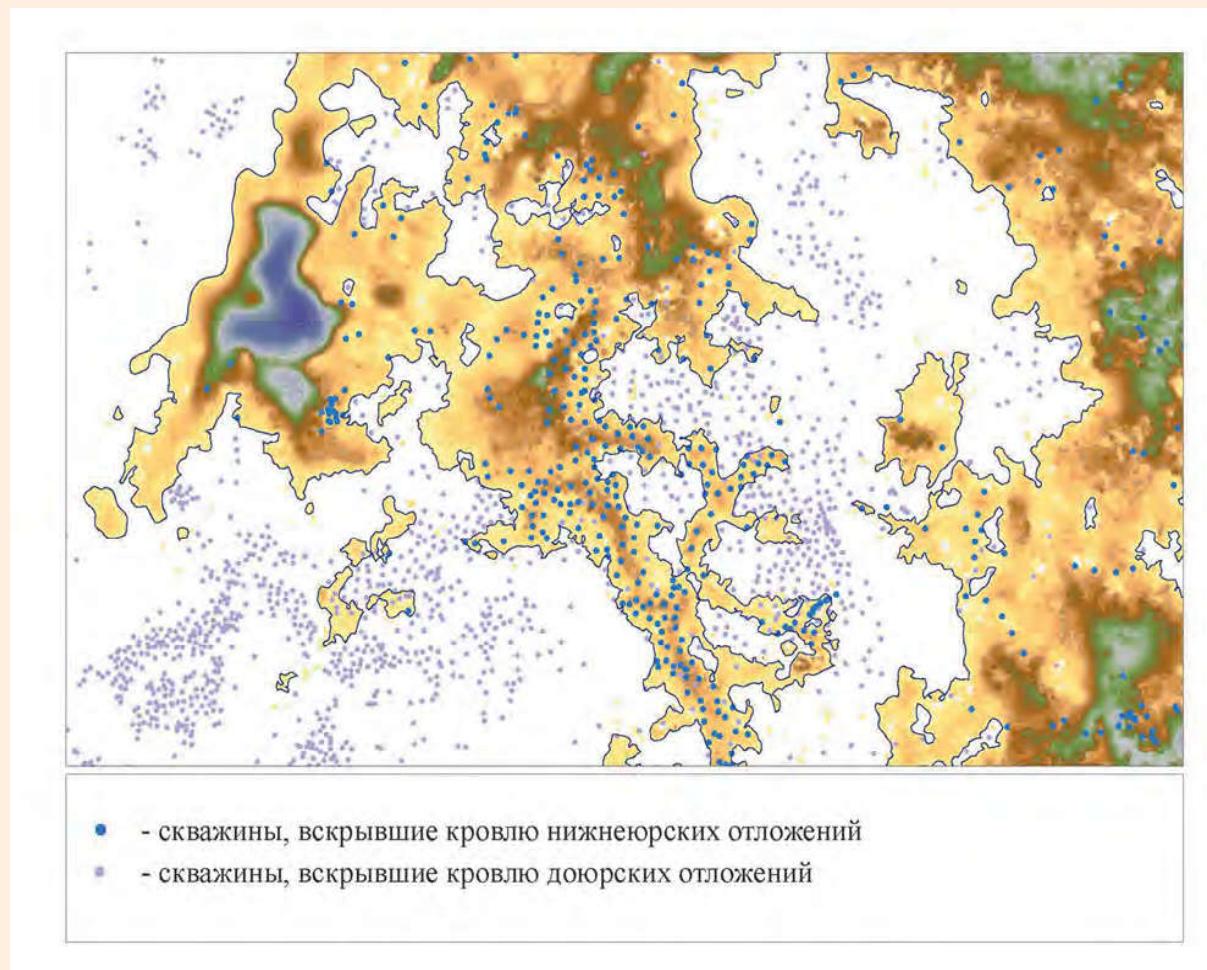
мант,  $p$ ,  $\nu$  – известные поля, косвенно связанные с картируемым,  $A$ ,  $B$ ,  $L$ ,  $N$  – дифференциальные линейные операторы, в общем случае, второго порядка,  $S$  – стабилизирующий функционал,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$  – неотрицательные весовые функции. Первое слагаемое определяет значения картируемого поля в заданных точках, следующие два, выражающиеся дифференциальными уравнениями второго порядка, характеризуют интегральное поведение поля, т.е. определяют его в областях интерполяции и экстраполяции. В этом и заключается принципиальное отличие ВМГК от кrigингов – представления о природе картируемого поля задаются в задаче напрямую, с помощью дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих тот или иной физический процесс. Это позволяет расширить область применения метода от структурного картирования к моделированию полей давления, температур, концентраций и других параметров, распределение которых возмож-

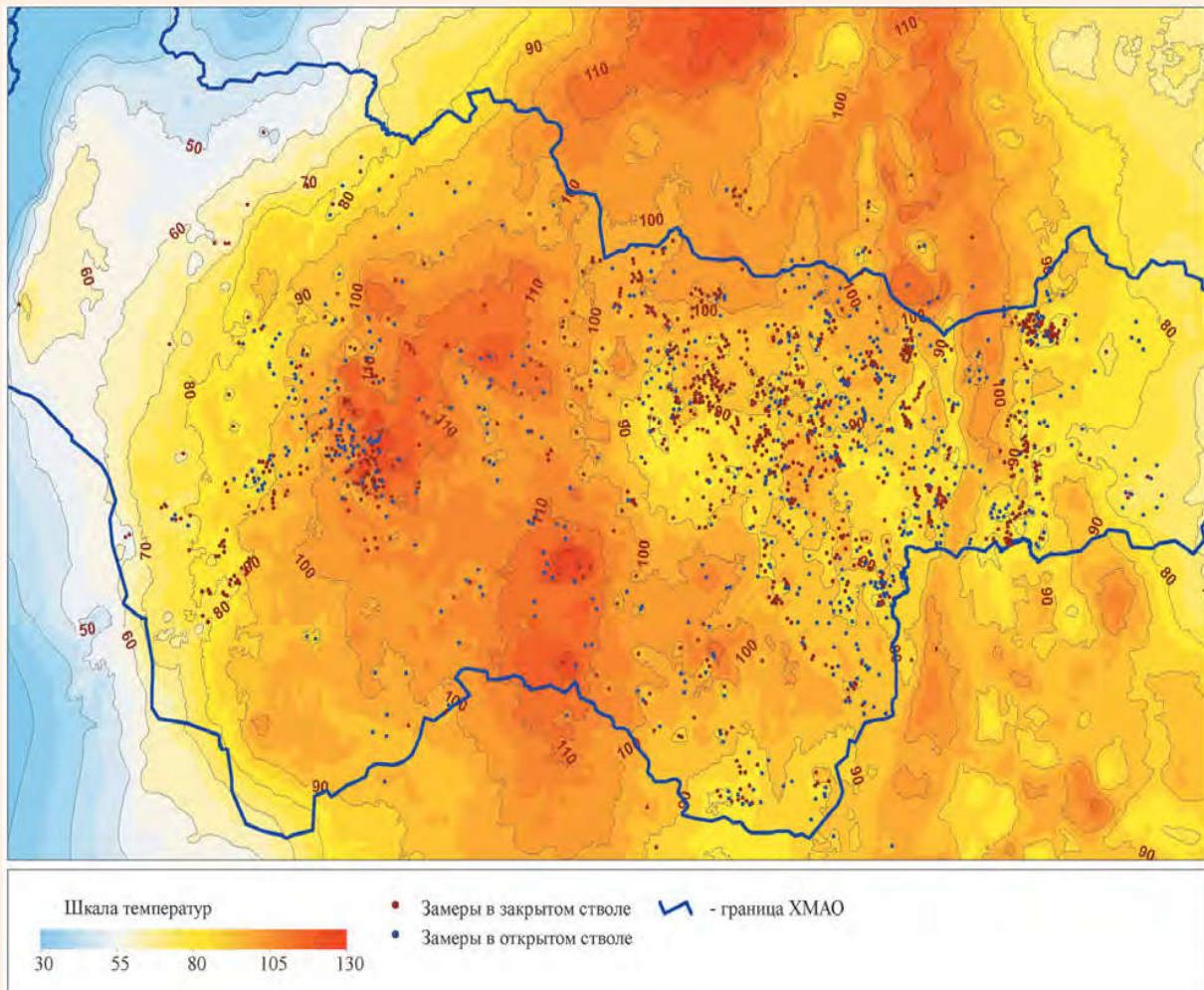
но записать в форме физико-математической модели. Так, например, в рамках этого подхода нами было произведено моделирование температурной истории по территории Речицкого месторождения (Беларусь).

Бесспорное преимущество ВМГК заключается в малой чувствительности этого метода к числу точек исходных данных. Иными словами, увеличение их количества с тысячи до миллиона не приведет к существенному повышению требований к вычислительным ресурсам. Этот аспект открывает принципиально новые возможности в математическом моделировании геологических объектов, а именно – позволяет строить детальные карты на большие территории с использованием широкого спектра исходных данных: стратиграфических разбивок, сейсмической корреляции, трендов, результатов оцифровки изолиний или фрагментов других карт, карт потенциальных полей и т.д. Под большой территорией в данном случае понимается,

**Рис. 2.**

Фрагмент карты общих толщин нижнеюрских отложений – район Красноленинского свода; рисунок иллюстрирует модель выклинивания пластов на фундамент





**Рис. 3.**  
*Карта пластовых температур баженовской свиты*

например, Западно-Сибирская НГП, а под деятельностью – возможность выделения структур размерами порядка 0,5–1 км.

Технология, методика картирования, а также программное обеспечение совершенствовались в ходе выполнения работ, в том числе и федеральных заказов, по территории ХМАО и прилегающим областям Западно-Сибирской НГП. Так, в 2002 г. мы приступили к созданию цифровой структурной карты по кровле доюрского основания, в ходе чего была отработана схема корректного использования разнородной, неравномерно распределенной сейсмической информации. Эта методика позволила использовать весь объем сейсмической корреляции, на тот момент это порядка 1000 площадных сейсмопрофилей, с автоматическим нивелированием невязок в крестах профилей. Ее смысл заключается в использовании в качестве картируемого признака не самих значений  $t_0$ , а их

производных в направлении сейсмического профиля, т.е. формы следа сейсмической границы.

Следующий этап развития наших подходов к картированию начался в 2007 г. в рамках выполнения федерального заказа по созданию структурной модели юрской части разреза осадочного чехла по территории ЗС НГП. Была успешно применена технология построения структурных карт пластов юрской толщи, опробованная до этого на относительно небольших территориях. Очевидно, что для картирования стратиграфических границ, не обеспеченных достаточно плотной сейсмической информацией, необходимо использовать различные модели конформности с подстилающими или вышележащими горизонтами. Иногда в западных пакетах это называется трендами. В нашем случае для построения согласованного каркаса юрских отложений в качестве модели априорных знаний мы выбираем следующие уравнения:

$$\frac{\partial H_i}{\partial x} = \lambda \frac{\partial H_{a-b}}{\partial x} + C_1, \quad \frac{\partial H_i}{\partial y} = \lambda \frac{\partial H_{a-b}}{\partial y} + C_2.$$

В данном случае  $H_i$  – мощность между картируемой поверхностью и кровлей доюрских отложений,  $H_{a-b}$  – общая мощность юрского чехла. Коэффициент  $\lambda$  имеет смысл коэффициента конформности мощности. Его величина может варьироваться от 0 до 1. Случай  $\lambda=0$  имеет место, когда картируемая поверхность  $U_i$  наследует только форму кровли доюрских отложений;  $\lambda=1$ , если поверхность полностью наследует форму верхней опорной границы. Коэффициенты  $C_1, C_2$  описывают региональный тренд мощности; они и коэффициент конформности  $\lambda$  определяются автоматически в ходе выполнения счетной процедуры. Предложенная модель относительно проста, однако она весьма качественно описывает геометрию пластов, их выклинивание и обладает хорошими прогнозирующими свойствами.

В 2016 г. при выполнении работ по оценке генерационного потенциала баженовской свиты мы получили опыт по построению региональных карт физических свойств пластов, таких как температура, давление, геохимические кинетические параметры. Важно отметить, что это была не формальная интерполяция между точками наблюдений, учитывались зависимости картируемых величин от глубины залегания, геометрии

выступов фундамента, пластовой температуры и т.д.

По мереобретения опыта мы пришли к пониманию того, что строить набор карт «с нуля» каждый раз по случаю начала новых работ не только малоэффективно, но и неверно. Новые построения должны в той или иной мере опираться на результаты предыдущих расчетов и, в свою очередь, дополнять имеющуюся модель. Из этого и родилось понятие «Цифровой структурный каркас региона».

Цифровой структурный каркас (ЦСК) – это больше чем просто набор карт – структурных, изохрон, скоростей, толщин пластов и комплексов, карт свойств. Он представляет собой совокупность математических алгоритмов с предопределенными параметрами и связями, в результате работы которых мы и получаем указанный набор согласованных карт. Технологический цикл устроен таким образом, что вся новая информация (разбивки, сейсмическая корреляция), загружаемая в базу данных Центра, передается в модель, обновление которой происходит в автоматическом режиме. Специалисты Центра, курирующие соответствующие геологические объекты, имеют интерактивный доступ к результатам построений непосредственно со своего рабочего места и могут оперативно принимать решения относительно правильности внесенных изменений.

**Таблица 1.**  
Цифровая модель осадочного чехла

|           |  |
|-----------|--|
|           | <b>Картирование опорных горизонтов</b>   |
| 1 уровень | Карты изохрон по опорным отражающим горизонтам   |
|           | Скоростная модель (согласованный набор карт средних скоростей)                                   |
|           | Структурные карты по опорным отражающим горизонтам   |
| 2 уровень | <b>Наполнение разреза</b>  |
|           | Структурные карты и карты общих толщин пластов, заключенных между опорными отражающими границами |
|           | Границы распространения пластов и комплексов   |
| 3 уровень | <b>Моделирование свойств</b>   |
|           | Попластовые карты геологических, физических и геохимических свойств                              |

На текущий момент ЦСК покрывает центральную часть Западно-Сибирской НГП, включая ХМАО, прилегающие районы ЯНАО, юга Тюменской и Томской областей, и характеризует юрскую и меловую части разреза. Существует также территориальное дополнение цифровой модели юрской толщи для центральных и северных частей ЯНАО, включая Таймыр. Нагляд-

## На текущий момент ЦСК покрывает центральную часть Западно-Сибирской НГП, включая ХМАО, прилегающие районы ЯНАО, юга Тюменской и Томской областей, и характеризует юрскую и меловую части разреза

но внутреннюю иерархию структурного каркаса можно представить в виде схемы, приведенной в **табл. 1**.

На первом уровне рассчитываются структурные карты по опорным отражающим горизонтам, формирующие каркас модели. В качестве опорных горизонтов выбираются границы, наиболее полно обеспеченные исходными данными, прежде всего, сейсмической корреляцией. То есть построения осуществляются в первую очередь на основе данных прямых наблюде-

ний с минимальным привнесением в модель априорных представлений. Далее, на втором уровне, происходит детализация цифрового каркаса по разрезу: картируются пласти, заключенные между опорными границами. Поскольку эти внутренние границы, как правило, значительно хуже обеспечены детальной сейсмической корреляцией, в расчетах используются различные модели конформности, гарантирующие должную степень согласованности стратиграфических поверхностей.

Из представленной выше схемы следует, что каждый последующий уровень построений основывается на элементах модели, рассчитанных на уровне предыдущем – это основа внутренней иерархии цифрового каркаса региона. Наличие иерархии позволяет автоматизировать процесс построения и, что особенно важно, обновления модели при изменении исходных данных, таким образом, существенно экономя рабочее время специалистов.

Построение попластовых карт свойств (третий уровень) – это первый шаг к объемной модели осадочного чехла. Здесь следует отметить, что мы находимся в начале пути. Недавно модель пополнилась картами температур, вещественного состава и геохимических параметров пачек баженовской свиты, однако дальнейшее развитие этого направления требует как совершенствования программного обеспечения, так и более полного изучения имеющихся возможностей вариационного метода геологического картирования. <sup>10</sup>

**UDC 553.983: 550.8.05 (550.8.013)**

**A.A. Sidorov**, PhD, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Department of Mathematical Modeling of Geological Objects. Autonomous Institution of Khanty–Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra “V.I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil”<sup>1</sup>, [darth@crru.ru](mailto:darth@crru.ru)

<sup>1</sup>PO box 286, 75 Malygin street, Tyumen, 625026, Russia

## A Digital Model of the Geological Structure of the Sedimentary Cover of the Central Part of Western Siberia

**Abstract.** A digital structural framework is a collection of mathematical algorithms with predefined parameters and relationships, resulting in a set of matched maps – structural, isochron, velocities, thicknesses of seams and complexes, property maps. The new information (breakdowns, seismic correlation) loaded into the database is transferred to the model, which is updated automatically. Specialists who supervise the relevant geological objects have interactive access to the results of the construction directly from their workplace and can make quick decisions about the correctness of the changes made. At the moment, the digital structural framework covers the central part of the West Siberian oil and gas province, including the Khanty–Mansiysk Autonomous Okrug, adjacent areas of the Yamal–Nenets Autonomous District, the south of the Tyumen and Tomsk regions, and characterizes the Jurassic and Cretaceous parts of the section. There is also a territorial addition of the Jurassic digital model for the central and northern parts of the Yamal–Nenets Autonomous District, including Taimyr.

**Keywords:** digital models; geo-mapping; variational method; digital structural framework; plastic properties maps.