

УДК 550.8

© А.А. Никитин, Е.Н. Черемисина

А.А. Никитин, Е.Н. Черемисина

# КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ АДЕКВАТНОСТИ ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ (ФГМ) РЕАЛЬНЫМ ОБЪЕКТАМ

## Введение

Построение ФГМ представляет многоцелевое и многокритериальное исследование. Реализация достоверных, адекватных физико-геологических моделей (ФГМ) реальным объектам по комплексу геофизических полей является неотъемлемой процедурой комплексной интерпретации данных. По своей сути, построение адекватных моделей имеет три основных составляющих: математическую постановку и обоснование, геологическую содержательность модели и использование модели в тех или иных геоинформационных системах.

## Математическая постановка задачи

С позиции математической постановки можно выделить необходимые и достаточные условия адекватности модели реальным объектам. Традиционным подходом при построении модели является достижение заданной невязки между расчетными (модельными) значениями и наблюдаемыми значениями поля. Достижение заданной невязки по отдельно взятому полю назовем необходимым условием адекватности. Однако по отдельно взятому полю практически всегда можно подобрать модель, удовлетворяющую заданной невязке. В то же время для другого поля та же модель может существенно превосходить невязку. Поэтому важно подобрать такую модель, которая грубо, но будет удовлетворять всем полям. В качестве достаточного условия адекватности модели реальным объектам назовем минимизацию обобщенного расстояния.

Обобщенное расстояние  $\mu$  для  $h$ -полей выражено как

$$\mu = \sum_l \sum_i^n h_l [f_{li}^M(\vec{\Theta}_K) - f_{li}^H]^2, \quad (1)$$

где  $f_{li}^H$  – наблюдаемое значение  $l$ -го поля в  $i$ -й точке;  $f_{li}^M(\vec{\Theta}_K)$  – теоретически рассчитанное (модельное) значение  $l$ -го поля в  $i$ -й точке для вектора параметров объекта (среды)  $\vec{\Theta}_K$ , под которыми понимаются как петрофизические, так и геометрические параметры;  $h_{li}$  – весовые коэффициенты (информативность) для  $l$ -го поля (метода) которой эти весовые коэффициенты представляют значения собственного вектора,

соответствующего максимальному собственному значению  $\lambda_{\max}$  для корреляционной матрицы, построенной по коэффициентам корреляции отклонений модельного и наблюдаемого полей. Физически  $\lambda_{\max}$  представляет энергетическое отношение сигнал/помеха в пространстве методов, т.е. это дисперсионная характеристика, отображающая основную часть дисперсии в многометодном пространстве. Соответственно, это и обеспечивает грубое приближение модели по всем полям одновременно. Рассчитывая обобщенное расстояние для разных моделей объектов, адекватной реальным объектам следует считать модель, для которой достигается минимум обобщенного расстояния.

Вычисление информативности  $h_p$  или, иначе, значений собственного вектора корреляционной матрицы, соответствующего максимальному значению этой матрицы, для трех полей включает:

- вычисление коэффициентов корреляции по отклонениям (невязкам) наблюдаемых значений поля от расчетных от модели значениями, т.е.  $r_{11}, r_{12}, r_{13}$ , причем  $r_{11} = r_{12} = r_{13} = 1$ ;
- построение корреляционной матрицы  $R$  для полученных коэффициентов корреляции, т.е.

$$R = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 & r_{13} \\ r_{31} & r_{32} & 1 \end{vmatrix};$$

- нахождение максимального собственного значения  $\lambda_{\max}$  для  $R$  путем приравнивания определителя матрицы  $R - \lambda I$  к нулю

$$|R - \lambda I| = \begin{vmatrix} 1 - \lambda & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 - \lambda & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1 - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрытие определителя приводит к линейному уравнению, корнями которого являются собственные значения матрицы  $R$ . В данном случае  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , из которых выбирается  $\lambda_{\max}$ ;

- нахождение значений собственного вектора  $h_1, h_2, h_3$ , соответствующего  $\lambda_{\max}$ , из решения следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} 1-\lambda_{\max} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1-\lambda_{\max} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1-\lambda_{\max} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Определенность решения такой системы линейных уравнений обеспечивается нормировкой весовых коэффициентов

$$h_1, h_2, h_3: \sum_{i=1}^3 h_i^2 = 1.$$

При использовании разных моделей изменяются значения весовых коэффициентов в формуле (1) и, соответственно, величина обобщенного расстояния  $\mu$ . Решение об адекватности модели реальному объекту принимается по минимуму  $\mu$ .

Описываемый подход позволяет сравнивать различные геологические гипотезы, которые были положены в основу построения моделей изучаемых объектов или изучаемой геосреды.

### Геологическая содержательность модели

Другая сторона адекватности модели связана с ее геологическим содержанием. При этом в качестве необходимого условия следует считать непротиворечивость модели современным представлениям о строении конкретного региона. В качестве достаточных условий можно принять совпадение плотностных (скоростных) границ моделей в местах пересечения профилей по исследуемой площади. Это представлено на рис. 1 и рис. 2 при построении 2D

моделей. При построении 3D моделей таким условием следует считать совпадение пространственного положения объектов в разных полях (рис. 3). На рисунке 3 подложкой служит плотностная модель, где более темные тона отражают повышенную плотность, а на вертикальных разрезах желто-красными цветами представлена модель электропроводности. Такое совмещение определяет возможности комплексной интерпретации.

Кроме того, для прогноза полезных ископаемых анализируется пространственная прослеживаемость зон с пониженной плотностью с глубины на поверхность по результатам трансформации потенциальных полей [2]. Особое значение такие зоны приобретают тогда, когда они приурочены к местам пересечения разнонаправленных тектонических нарушений на поверхности и прослеживаемые в нижележащих толщах. Для каждого конкретного региона в качестве достаточных условий адекватности могут быть свои специфические признаки. В частности, такими признаками являются критерии локального прогноза углеводородов.

### Использование геоинформационных систем для решения данной задачи

С позиции использования геоинформационных систем в качестве критериев их сравнения и отбора служат количественные критерии системного анализа [3]. При этом в качестве необходимого условия адекватности применения той или иной

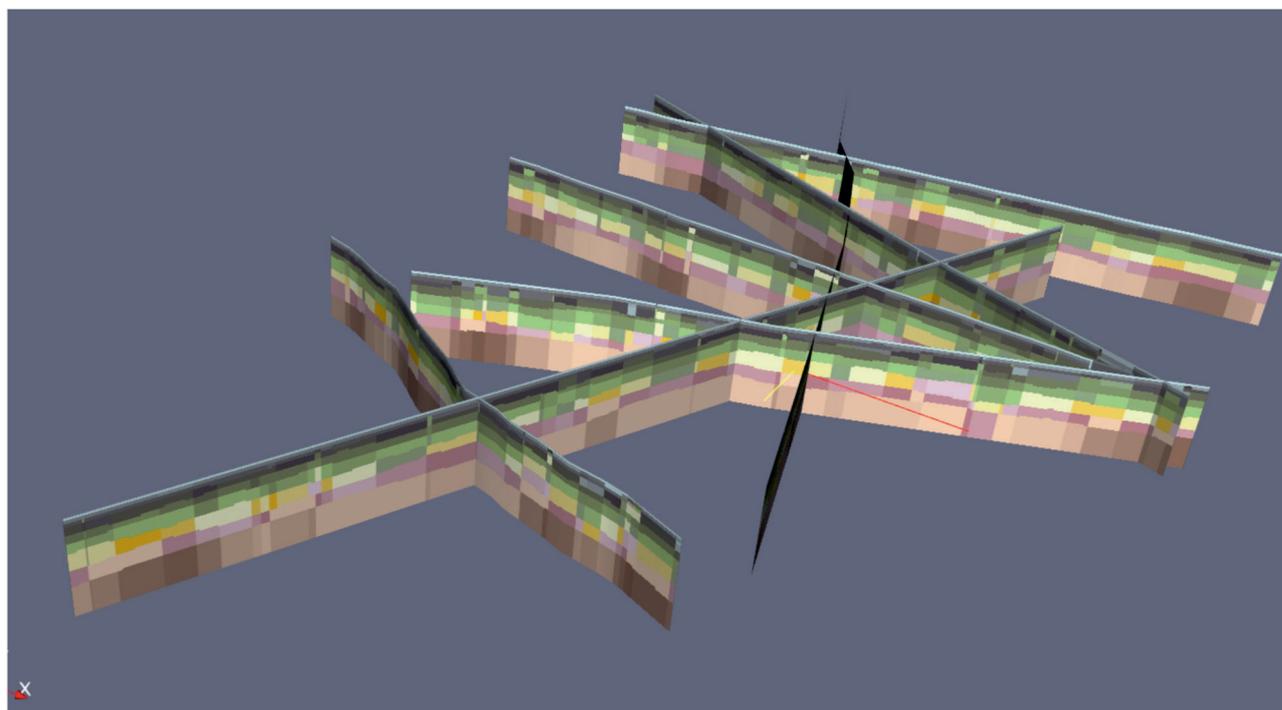


Рис. 1. Плотностные разрезы по региональным профилям Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции [5]

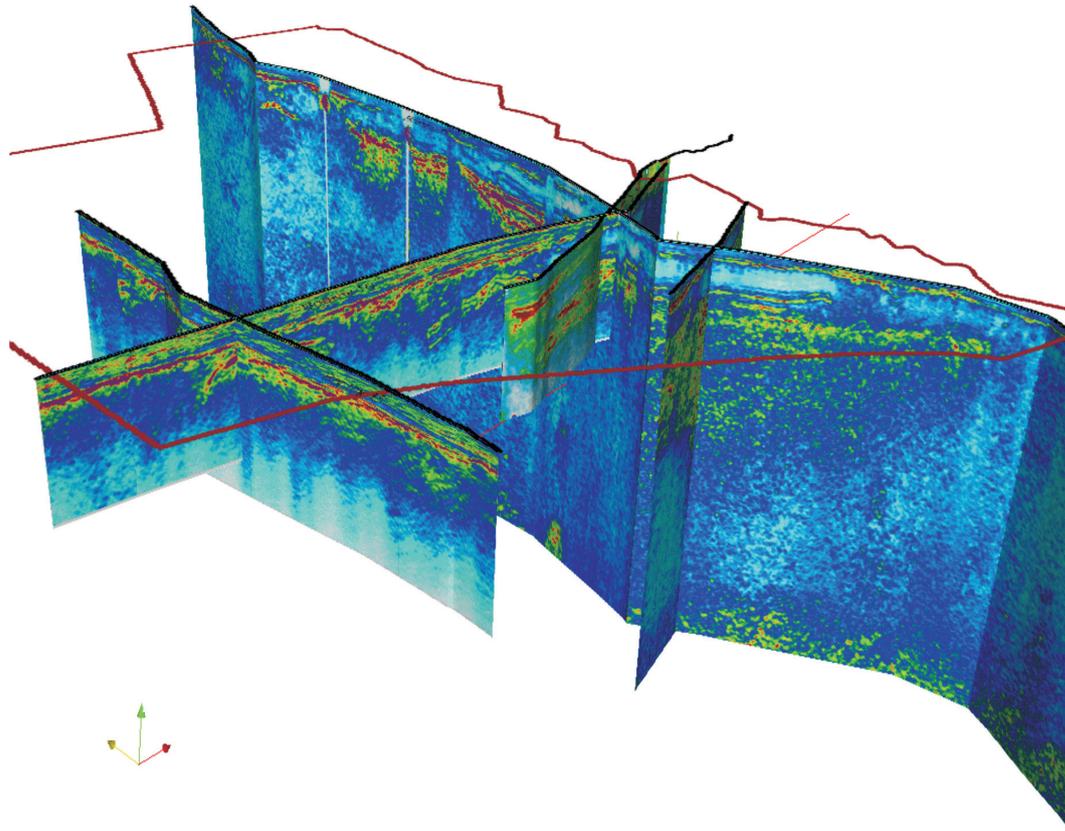


Рис. 2. Пространственно увязанные сейсмоэнергетические профили по Каскому блоку (Западная Сибирь) [5]

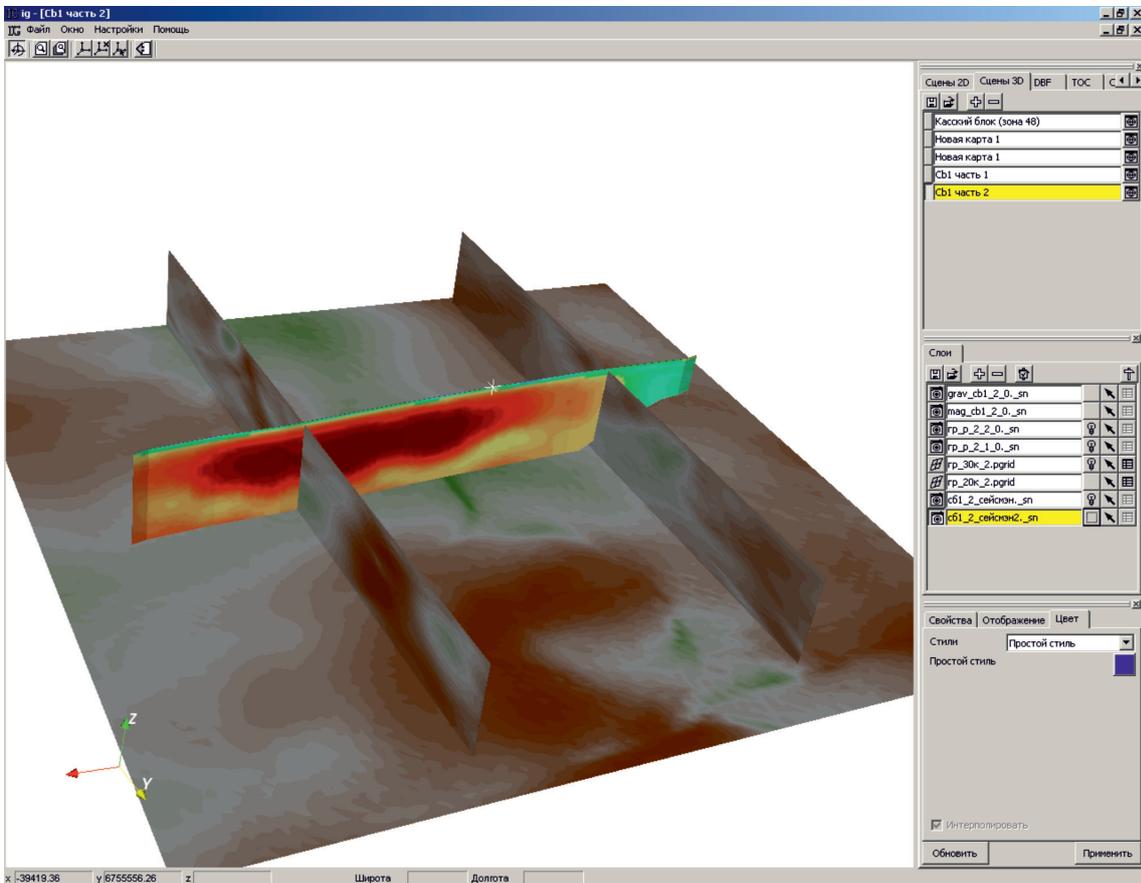


Рис. 3. Совмещение плотностной модели и модели электропроводности по Юрубчено-Тохомской нефтегазоносной зоне Восточной Сибири [1]

системы можно принять критерий гарантированного результата, а в качестве достаточных условий – использование более сложных, но имеющих более строгое математическое обоснование, таких критериев, как критерий максимума среднего выигрыша, критерий Гурвица [3, 4]. Во всех критериях строится матрица ранжировок по целям (задачам) и решениям в виде геосистем. Решения оцениваются лицом, принимающим решение (ЛПР) в количественной или балльной шкалах. Критерий гарантированного результата состоит в том, что ЛПР рассчитывает на наименее благоприятную ситуацию и в такой наименее благоприятной ситуации выбирает наиболее предпочтительное решение т.е.

$$\max_i \min_j f_{ij} \Rightarrow Y^*$$

Следовательно, оптимальное решение определяется путем нахождения наихудшей оценки функции предпочтения по имеющимся геоинформационным системам (в табл. 1 это столбец  $\min_j$ ) с последующим выбором среди таких наихудших оценок наилучшей (в табл. 1 – это столбец  $\max_i$ ).

В качестве гипотетического примера приведем матрицу ранжировок по задачам и решениям в виде использования геоинформационных систем. Матрица представлена в виде таблицы, в которой, согласно критерию гарантированного результата, наиболее предпочтительным решением оказываются системы ГИС ИНТЕГРО [4].

**Заключение**

Критериальный подход к оценке адекватности ФГМ реальным объектам целесообразно распространить на другие аспекты построения ФГМ, при рассмотрении которых возникают свои необходимые и достаточные условия адекватности, в частности на критерии регионального и локального прогноза углеводородного сырья. Критериальный подход к построению ФГМ обеспечивает более однозначные решения обратных задач геофизики.

**Ключевые слова:** физико-геологическая модель, построение ФГМ, обобщенное расстояние.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Галуев В.И., Никитин А.А., Пиманова Н.Н. О стандартном графе обработки и интерпретации гравимагнитных полей при построении плотностных и магнитных моделей земной коры // Геофизика – 2015. – № 6. – С. 74-80.
2. Никитин А.А. Энергетическая фильтрация геофизических полей // Геофизика – 2014. – № 3. – С. 2-13.
3. Черемисина Е.Н., Никитин А.А. Системный анализ в природопользовании. – М. : ВНИИгеосистем, 2014. – 116 с.
4. Черемисина Е.Н., Никитин А.А. Геоинформационные системы и технологии. – М. : ВНИИгеосистем, 2011. – 375 с.
5. Черемисина Е.Н., Никитин А.А. Системный анализ процесса физико-геологического моделирования на основе геоинформационных систем // Геоинформатика – 2012. – № 4. – С. 1-7.

Таблица 1

**Матрица ранжировок решений по геоинформационным системам и целям геологического содержания**

Решения	Цели					
	Построение модели глубинного строения земной коры	Построение модели осадочного чехла	Построение модели кристаллического фундамента	Структурно-тектоническое районирование	$\min_j$	$\max_i$
У1 ГИС ИНТЕГРО	3	3	3	4	3	3
У2 ГИС ПАРК	1	1	3	3	1	
У3 СИГМ-3D	1	1	4	2	1	
У4 Пангея	2	3	3	3	2	

**Примечание:** снижение баллов по альтернативным целям связано со стоимостью приобретения соответствующих геоинформационных систем.