

УДК 550.3:004.02

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

¹Мотрюк Е.Н., ¹Кобрунов А.И., ²Ломинский Д.О.

¹ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»,
Ухта, e-mail: akobrunov@ugtu.net;

²ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»,
Москва

Моделирование геологических сред по данным гравirazведки в условиях слабой изученности и сложного строения осадочных бассейнов требует особого подхода. В условиях эквивалентности одно из важных направлений повышения информационной мощности интерпретационных процедур есть развитие технологий извлечения информации из геолого-геофизических данных. Исследования информационной характеристики геологоразведочных работ показали, что в условиях недостаточной изученности сложнопостроенных сред технологические решения должны быть сконцентрированы на активном управлении вводимой дополнительной информацией об исходных данных и информацией, управляющей формированием модельных представлений, а также динамикой их трансформации. Активное использование в технологиях решения обратных задач априорной информации означает вовлечение в процесс решения обратных задач комплекса методов. Комплексирование геофизических методов нашло отражение в интегрированной пассивной и активной интерпретации информации, в результате применения которой построенная модель среды описана согласованными данными различных методов.

Ключевые слова: гравirazведка, сложнопостроенные среды, пассивная и активная комплексная интерпретация, информационная характеристика геологоразведочных работ

FEATURES OF TECHNOLOGY CONSTRUCTION OF MODELS OF COMPLEX GEOLOGICAL ENVIRONMENTS FOR GRAVIMETRIC DATA

¹Motryuk E.N., ¹Kobrunov A.I., ²Lominskiy D.O.

¹FGBOU VPO «Ukhta State Technical University», Ukhta, e-mail: akobrunov@ugtu.net;

²FGBOU VPO «Russian State University of Oil and Gas named after Gubkin», Moscow

Earth modeling of gravity data in a poor knowledge and the complex structure of sedimentary basins requires a special approach. Under the conditions of equivalence of input models one of the most important ways of increasing the power of information of interpretation procedures is the development of processes to extract information from geological and geophysical data. Research informational characteristics geological exploration works revealed that under the conditions of insufficient study of structurally complex environments technology solutions should be concentrated on the active management of the additional input information on the source data and the information on the formation of model representations as well as the dynamics of their transformation. Active use of technology in the solution of inverse problems of a priori information indicates involvement in the process of solution of inverse problems of the complex methods. Integration of geophysical methods is reflected in the integrated of passive and active integrated interpretation of information, as a result of which the constructed environment model describes the consistent data of various methods.

Keywords: gravity prospecting, complex structure environment, passive and active integrated interpretation, informational characteristic of geological exploration works

Для построения геолого-геофизических моделей осадочных бассейнов и их фрагментов эффективно применение ведущих современных технологий интерпретации гравиметрических данных. Для крупных плотностных структур типа осадочных бассейнов необходимо проводить постановку и решение интерпретационных задач с учётом условий слабой изученности и сложного строения среды. Это позволяет сделать технология, основанная на критерильном подходе к решению обратных задач гравirazведки [1–5, 7]. Она основана на комплексном анализе всей имеющейся гео-

лого-геофизической информации, где для построения отдельной модели среды используются данные других методов.

Рассмотрим подробно, что представляет собой слабая изученность и сложное строение геологической среды. Понятие слабая изученность территорий раскрывается как соотношение между объёмом требуемой информации для решения поставленной геологической задачи и реально имеющейся. Сложность объекта количественно характеризуется объёмом требуемой для его описания информации. Если соотношение требуемой и имеющейся информации

не в пользу первой, то говорят об условиях недостатка информации или, что то же самое, о слабой изученности данного объекта. Реально имеющаяся информация определена исходными данными, полученными в результатах геологоразведочных работ (ГРР). Если этих данных недостаточно, то говорят об условиях сложного строения, подразумеваемая соотношение между информационным уровнем, имеющимся в распоряжении геолога, и требуемым. Таким образом, сложность строения и недостаток информации – взаимозависимые и взаимопределяющие понятия.

Недостаток информации порожден двумя причинами: первая является объективной компонентой, состоящей в нехватке кондиционных данных, вторая характеризуется технико-экономической целесообразностью их наращивания за счет проведения дополнительных ГРР. Этот недостаток может быть устранен за счет усовершенствования используемых технологий извлечения информации из имеющегося объема данных. В этой связи становится очевидной значимость исследований по наращиванию информационной мощности используемых технологий, которая, в свою очередь, имеет и объективное ограничение. В конечном итоге мы приходим к ситуации, когда между информацией, поданной на вход обрабатывающей интерпретационной технологии, и той, в терминах которой описывается требуемый результат, имеется существенный разрыв.

Информационной характеристикой комплекса ГРР [2, 5] служит соотношение объективной информации J_0 , заложенной в получаемых данных, объема информации J_1 , извлекаемой из J_0 с помощью используемой обрабатывающей интерпретационной технологии, и объема информации J_2 , содержащейся в построенной модели объекта за счет преобразования данных предшествующего этапа. Для обработки информации используются две технологии. Во-первых, это технология преобразования первичных данных J_0 в некоторые подлежащие последующей геологической интерпретации геофизические параметры J_1 . Во-вторых, это технологии преобразования геофизических параметров, составляющих содержание информации J_1 , в некоторую геологическую модель, характеризующуюся объемом информации J_2 . По сути J_2 – это тот объем информации, который достигается выполненными с требуемой детальностью построениями.

Величина J_1 является функцией J_0 и многокомпонентного параметра ξ , характеризующего особенности всего цикла извлечения

информации J_0 . Очевидно, что $J_0 \geq J_1(J_0, \xi)$. Воспользовавшись терминологией, используемой при характеристике информационной модели геофизических исследований, можно утверждать, что переход от J_0 к J_1 реализуется за счет процедур геофизической интерпретации – перехода от наблюдаемых к геофизическим параметрам. Переход от информационного уровня J_1 к J_2 обеспечивается, прежде всего, процедурами геологической интерпретации и состоит в переходе от геофизических к геологическим параметрам. Характеристику перехода технологии можно записать в виде многокомпонентного параметра η : $J_1(J_0, \xi) \geq J_2(J_1, \eta)$. Переход от наблюдаемых к геофизическим параметрам включает в себя процедурную часть – фильтрацию и решение обратных задач и, кроме того, введение некоторой дополнительной к J_1 , как принято говорить, априорной информации ΔJ_1 . Эта часть информации, присутствующая в результатах геофизической интерпретации, может вводиться явно внешним образом либо присутствовать скрыто в параметрах используемых вычислительных процедур. Будем обозначать $J'_1 = J_1 + \Delta J_1$. В этом случае J'_1 может превышать J_0 . Аналогичная ситуация с объемом информации на втором шаге – построении геологической модели. Наряду с информацией J_2 , получаемой за счет применения технологии η к информации J'_1 , присутствует компонента ΔJ_2 , реализующая дополнение J_2 до требуемого объема J'_2 . Тогда

$$\delta = \frac{\partial J_2(J_1, \eta)}{\partial J_1} \cdot \left(\frac{\partial J_1(J_0, \xi)}{\partial J_0} \cdot \Delta J_0 + \Delta J_1 \right) + \Delta J_2.$$

Мультипликативная компонента

$$\frac{\partial J_2(J_1, \eta)}{\partial J_1} \cdot \left(\frac{\partial J_1(J_0, \xi)}{\partial J_0} \cdot \Delta J_0 + \Delta J_1 \right)$$

может быть встроена в технологию переработки информации. Аддитивная компонента ΔJ_2 стоит вне технологий извлечения информации, смысл которой состоит в явном привнесении опыта, интуиции интерпретатора, его неформализованных знаний. Величина ΔJ_2 – это и фантазии интерпретатора, навеянные размышлениями над генезисом изучаемых объектов, соображениями подобия с чем-то ему хорошо знакомым и прочими. Как только они найдут своё обоснование, эта часть тут же войдет в технологическую мультипликативную компоненту. Поэтому основным направлением развития технологий извлечения информации при изучении сложнопостроенных, слабоизученных сред является минимизация компоненты ΔJ_2 , развитие технологий, обеспечивающих ак-

тивное управление той частью объективно необходимой дополнительной информации, которая входит в мультипликативную компоненту. В этой связи необходимо определить те методы и принципы, которые могут лежать в основе такой схемы.

Прежде всего, необходимо определить понятие интегрированной интерпретации, которая использует для построения модели среды в переинтерпретированной форме данные других методов. Синонимом термина интегрированная интерпретация, принятого в зарубежных публикациях, в отечественной литературе служит понятие комплексная интерпретация. Рассматривая модели интегрированной интерпретации [2, 5, 8], ограничимся лишь теми из них, которые основаны на принципах решения обратных задач в детерминированной постановке и направлены на реконструкцию физико-геологической модели изучаемой территории. Это соответствует введению понятия обратных задач интегрированной интерпретации как дальнейшему развитию понятия обратных задач геофизики.

В постановке обратных задач комплексной интерпретации выделяются её пассивная и активная формы. *Пассивная форма* состоит в том, что данные других методов вводятся в процедуры решения обратных задач гравиметрии – построения плотностной модели среды – в уже проинтерпретированной форме. В этом есть как положительные стороны: использование существующих наработок из инструментария анализа данных других методов – так и отрицательные: невозможность оперативного критического пересмотра введённых данных в процессе построения плотностной модели. *Активная форма* основана на создании методов и технологий совместного решения нескольких обратных задач, например совместного решения обратных задач сейсморазведки и гравиразведки. Здесь также есть свои положительные стороны (возможность динамической корректировки результатов нескольких методов) и отрицательные (сложности с введением самого понятия решения и согласованных модельных представлений).

Типичным примером модели пассивной комплексной интерпретации служит схема, состоящая в нахождении оптимальной относительно вводимого критерия плотностной модели среди множества других, удовлетворяющих тому же полю.

Рассмотрим особенности получения решения задачи сначала в классе распределения плотности. Вертикальная производная гравитационного потенциала $u_z(v_0)$, где $v_0 = (x_0, y_0, z_0)$ и точка $(x_0, y_0) = s_0 \in E_0$ регистрируется на поверхности в $E_+(z > 0)$ с уравнением $z_0 = \psi(s_0)$ для плотностной модели, задана следующим соотношением между $u_z(v_0)$ и $\sigma = \sigma(v)$:

$$A(\sigma(v)) = u_z(s_0, z_0 = \psi(s_0)) = \iiint_V \frac{\gamma \sigma(v) (z - \psi(s_0)) dx dy dz}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - \psi(s_0))^2]^{3/2}}. \quad (1)$$

Весь комплекс априорных данных об искомом распределении плотности может быть выражен в виде принятия критерия оптимальности [1, 2] относительно $\sigma(v)$, имеющего вид требования минимума некоторого функционала $J(\sigma(v))$:

$$J(\sigma(v)) = \|F(\sigma(v) - \sigma^0(v))\| = \int_V |F(\sigma(v) - \sigma^0(v))|^2 dv \rightarrow \min. \quad (2)$$

Решение задачи (1), (2):

$$\sigma(v) = \sigma^0(v) + F^{-1} F^{*-1} A^* \zeta(s_0). \quad (3)$$

Здесь $\zeta(s_0)$ – функция, параметризующая класс оптимальных решений уравнения (3); F – линейный замкнутый оператор, имеющий обратный; $\mu(s_0)$ – мера на поверхности задания поля, учитывающая способ его задания.

Подставив (3) в (1) и решив соответствующее уравнение относительно $\zeta(s_0)$, легко построить искомое оптимальное распределение. Однако есть более простой и вычислительно эффективный путь. Введём итерационный процесс:

$$\sigma^{n+1}(v) = \sigma^n(v) + \alpha_n K \varphi^n(s_0), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \sigma^0(v) = \sigma_0(v); \quad (4)$$

$$K \varphi^n(s_0) = F^{-1} F^{*-1} \iiint_{E_0} \varphi^n(s_0) \frac{(z - \psi(s_0)) d\mu(s_0)}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - \psi(s_0))^2]^{3/2}}; \quad (5)$$

$$\varphi^n(s_0) = \iiint_V \frac{(z - \psi(s_0)) \sigma^n(v) dv}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - \psi(s_0))^2]^{3/2}} - \frac{u_z(s_0)}{\gamma}; \quad (6)$$

$$\alpha_n = - \frac{\int_{E_0} \varphi^n(s_0) A K \varphi^n(s_0) d\mu(s_0)}{\int_{E_0} (A K \varphi^n(s_0))^2 d\mu(s_0)}. \quad (7)$$

Критерий оптимальности, в определённом смысле эквивалентный (2):

$$\text{sup} \left| K^{-1} [\sigma(v) - \sigma_0(v)] \right| \rightarrow \min, \quad v \in V. \quad (8)$$

Формирование критерия основано на выборе его компонент: аддитивной – нулевого приближения, имеющего смысл модели среды, к которой ищется наилучшее приближение; мультипликативной – оператора K , определяющего смысл понятия минимального уклонения. Этот оператор многокомпонентен, имеет вид свёртки и включает в себя информацию о степени достоверности построения различных компонент нулевого приближения, данные о корреляционной связи между различными компонентами.

В операторной форме приведенная задача, как и множество подобных, может быть записана в виде *унифицированной схемы*: искомая модель среды $x_1(v)$ должна соответствовать наблюдаемому полю $u_1(s)$, что выражается в операторном равенстве $A(x_1) = u_1(s)$, и среди множества таких моделей должна обеспечивать оптимальность критерию, выражаемому в виде требования минимума уклонения от заданного фиксированного элемента x_0 , т.е. $J(x_1 - x_0) \rightarrow \min$.

Переход к активной форме задачи комплексной интерпретации обеспечивается введением дополнительного требования на модель x_2 , состоящую в её соответствии некоторому другому полю $u_2(s)$: $B(x_2) = u_2(s)$. Нулевое приближение из фиксированного параметра превращается в подбираемый, и сама задача трансформируется в подбор пары распределений, каждое из которых удовлетворяет своему полю, а сами эти распределения – ближайшие друг к другу среди всех иных, допускаемых полями пар:

$$\begin{cases} A(x_1) = u_1(s), \\ B(x_2) = u_2(s), \\ J(x_2 - x_1) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (9)$$

Решать эту задачу с учётом приближённости задания правых частей можно итерационным процессом. Для унификации записи введём обозначения: $A = A_1$; $B = A_2$.

Тогда процедура решения состоит в следующем:

$$\begin{cases} x_1^{n+1} = x_1^n + \alpha_1^n K_1(x_1^n, x_2^{n-1}) \varphi_1^n, \\ \varphi_1^n = A_1(x_1^n) - u_1, \\ x_1^0 = x_2^{n-1}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_2^{n+1} = x_2^n + \alpha_2^n K_2(x_2^n, x_1^n) \varphi_2^n, \\ \varphi_2^n = A_2(x_2^n) - u_2, \\ x_2^0 = x_1^n; \end{cases} \quad (10)$$

$$\alpha_i^n = - \frac{\langle \varphi_i^n | A_i'(x_i^n) K_i(x_i^n, x_j^n) \varphi_i^n \rangle}{\| A_i'(x_i^n) K_i(x_i^n, x_j^n) \varphi_i^n \|^2}.$$

Здесь K_i – должным образом подобранные операторы, обеспечивающие выполнение условия оптимальности в (9).

В приведённой модели активной комплексной интерпретации на этапе постановки задачи происходит отказ от попыток построения единой физической модели, соответствующей различным физическим полям. Вместо этого для каждого поля вводится своя модель, а интегрирующим фактором служит требование их наибольшей близости в заданном смысле. Модель активной комплексной интерпретации для двух методов разделяется на взаимосвязанные сопряжённые схемы. Это две схемы пассивной комплексной интерпретации с динамически меняющейся в процессе счета аддитивной и неизменной мультипликативной компонентами критерия оптимальности. В пассивных схемах неизменны и аддитивная, и мультипликативная компоненты. После завершения цикла вычислений и анализа полученного результата параметры модели и критерия оптимальности, включая его аддитивную и мультипликативную части, могут быть изменены и весь процесс повторен, но это уже другой вычислительный цикл. Для вышеизложенных основных принципов активной комплексной интерпретации геофизических данных разработаны вычислительные схемы. Решение обратных задач пассивной комплексной интерпретации реализовано в постоянно совершенствующемся программном комплексе GCIS. Применением такого подхода к анализу геофизических данных может служить работа А.П. Петровского и коллектива авторов [6] по Карпатскому региону Украины.

Список литературы

1. Аминов Л.З., Кобрунов А.И., Моисеевкова С.В., Мотрюк Е.Н., Шилова С.В., Мужикова А.В. Методика интегрированной интерпретации гравиметрических данных в условиях слабой изученности с целью построения объемных региональных плотностных моделей седиментационных бассейнов // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-востока России: материалы XIV геологического съезда Республики Коми.– Т. IV. – Сыктывкар: Геопринт, 2004. – С. 79–81

2. Кобрунов А.И. Математические методы моделирования в прикладной геофизике (избранные главы) в 2-х частях. Ч.1 Функционально – аналитические основы // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 11. – 78 с. Ч. 2 Системный анализ и моделирование в условиях неопределенности. – Ухта: УГТУ, 2014. – 154 с.

3. Кобрунов А.И. Скрытая эквивалентность и эффективность интерпретации гравиметрических данных // Изв. РАН сер Физика земли. – 2014. – № 2. – С. 53–62.

4. Кобрунов А.И., Урбан А.В. О проблеме скрытой эквивалентности при реконструкции моделей геологических сред // Журнал Геофизика. – 2009. – № 3. – С. 41–48.

5. Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных: учеб. пособие. – Ухта: УГТУ, 2007. – 286 с.: ил.

6. Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравиразведка. – М., 1992. – 357 с.

7. Мотрюк Е.Н. Разработка технологии и методики моделирования глубинного строения земной коры на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38 сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. – Пермь, 2011. – С. 201–204.

8. Петровский А.П. Информационное обеспечение и модельные представления интегральной интерпретации геолого-геофизических данных при изучении нефтегазовых структур // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 5. – № 3. – С. 12–13.

References

1. Aminov L.Z., Kobrunov A.I., Moiseenkova S.V., Motryuk E.N., Shilova S.V., Muzhikova A.V. Metodika integrovannoj interpretacii gravimetricheskikh dannyh v uslovijah

slaboj izuchennosti s celju postroeniya obemnyh regionalnyh plotnostnyh modelej sedimentacionnyh bassejnov // Geologija i mineralnye resursy Evropejskogo Severo-vostoka Rossii: materialy XIV geologicheskogo s#ezda Respubliki Komi.– Т. IV. Syktyvkar: Geoprint, 2004. pp. 79–81

2. Kobrunov A.I. Matematicheskie metody modelirovanija v prikladnoj geofizike (izbrannye glavy) v 2-h chastjah. Ch.1 Funkcionalno analiticheskie osnovy // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimentalnogo obrazovanija. 2014. no. 11. 78 p. Ch. 2 Sistemyj analiz i modelirovanie v uslovijah neopredelennosti. Uhta: UGTU, 2014. 154 p.

3. Kobrunov A.I. Skrytaja jekvivalentnost i jeffektivnost interpretacii gravimetricheskikh dannyh // Izv. RAN ser Fizika zemli. 2014. no. 2. pp. 53–62.

4. Kobrunov A.I., Urban A.V. O probleme skrytoj jekvivalentnosti pri rekonstrukcii modelej geologicheskikh sred // Zhurnal Geofizika. 2009. no. 3. pp. 41–48.

5. Kobrunov A.I. Matematicheskie osnovy teorii interpretacii geofizicheskikh dannyh: uceb. posobie. Uhta: UGTU, 2007. 286 p.: il.

6. Malovichko A.K., Kosticyn V.I. Gravirazvedka. M., 1992. 357 p.

7. Motryuk E.N. Razrabotka tehnologii i metodiki modelirovanija glubinnogo stroeniya zemnoj kory na osnove kompleksnoj interpretacii geologo-geofizicheskikh dannyh // Voprosy teorii i praktiki geologicheskoi interpretacii geofizicheskikh polej: materialy 38 sessii Mezhdunarodnogo seminarina im. D. G. Uspenskogo. Perm, 2011. pp. 201–204.

8. Petrovskij A.P. Informacionnoe obespechenie i modelnye predstavlenija integralnoj interpretacii geologo-geofizicheskikh dannyh pri izuchenii neftegazonosnyh struktur // Geofizicheskij zhurnal. 2004. T. 5. no. 3. pp. 12–13.

Рецензенты:

Бурмистрова О.Н., д.т.н., заведующая кафедрой технологии и машин лесозаготовок, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта;

Андронов И.Н., д.т.н., заведующий кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.