УДК 550.3: 004.02

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

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

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

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

Для условий слабой изученности и сложного строения осадочных бассейнов выработаны модельные представления геологических сред по данным гравиразведки. При решении задач реконструкции геологической среды построенная модель распределения физического параметра должна соответствовать с заданной степенью приближения наблюдаемым физическим полям. При этом возникают три взаимоувязанных элемента, составляющих содержание понятия модели задачи: *модель среды, модель поля и модель физического явления*. Рассмотрены постановки прямой и обратной задач гравиразведки. Прямая задача состоит в нахождении модели поля по известным моделям среды и физического явления. Обратная задача заключается в реконструкции модели среды по модели поля и явления. Представлены различные способы представления информационной модели: одномерные объекты, двухмерные объекты и трёхмерные наблюдения, для которых применяются различные способы интерпретации данных.

Ключевые слова: гравиразведка, сложнопостроенные среды, модели среды, модели поля, прямые задачи гравиразведки, обратные задачи гравиразведки

CONSTRUCTION OF MODELS OF COMPLEX GEOLOGICAL ENVIRONMENTS OF GRAVIMETRIC DATA

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

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

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

Model representations of geological environments according to the gravity prospecting for conditions and little knowledge of the complex structure of sedimentary basins are developed. In solving the problems of reconstruction of the geological environment constructed physical parameter distribution model must comply with the specified degree of approximation the observed physical fields. Thus there are three interrelated elements that make up the content of the concept model of the problem: a model of the environment, the model fields and model of a physical phenomenon. Consider the formulation of direct and inverse gravity. The direct problem consists in finding the model field from the known models of the environment and physical phenomena. The inverse problem is the reconstruction model on model fields and event. We present different ways of presenting the information model: one-dimensional objects, two-dimensional objects, and three-dimensional observation, for which there are different ways to interpret the data.

Keywords: gravity prospecting, complex structure environment, model of environment, model of the field, direct gravity problem, inverse problem of gravity

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 критериальном подходе к решению обратных задач гравиразведки [1–5, 7]. Она основана на комплексном анализе всей имеющейся геолого-геофизической информации. Возникает проблема выбора модели среды, которая должна быть положена в основу изучения имеющихся в осадочных бассейнах образований.

При решении задач реконструкции геологической среды построенная модель распределения физического параметра должна соответствовать с заданной степенью приближения наблюдаемым физическим полям. Три взаимоувязанных элемента, составляющих содержание понятия модели задачи: *модель среды, модель поля* и *модель физического явления*. Выделяются прямая и обратная задачи геофизики. Во введённых терминах прямая задача состоит в нахождении модели поля по известным моделям среды и физического явления. Обратная задача заключается в реконструкции модели среды по модели поля и явления. Исходную информацию, имеющуюся для изучения геологической среды, можно представить в виде совокупности трёх компонент [2, 5, 6, 8]:

одномерные объекты, например данные скважин; двухмерные объекты, т.е. некие профильные наблюдения, и трёхмерные наблюдения, в частности наблюдаемые геофизические поля.

Наиболее общей и полной в смысле количества априорной информации моделью среды является *модель распределения плотности,* или *плотностная модель*. Она может быть использована для решения задач локального прогнозирования, т.е. оценки локальных изменений физических свойств, в пределах отдельных блоков, пластов и разреза в целом. Эта модель является математической основой схем интерпретации на классе непрерывных функций или прогнозирования непрерывного геолого-геофизического разреза. Структурная геолого-геофизическая модель является упрощённым вариантом. Введение данной модели необходимо для решения задач, где априори вводится предположение о слоистом строении среды. В рамки таких предположений укладываются как классические структурные задачи – изучение поверхности кристаллического фундамента, структур синклинального и антисинклинального типов, надвиговых структур, так и задачи соляно-купольной тектоники.

Для описания моделей среды используются различные варианты задания данных и соответствующие им постановки прямых задач гравиразведки для *двухмерного и трёхмерного случая*. Суть двухмерной постановки состоит в следующем [2, 5, 6]. Часто при интерпретации гравиразведочных данных аномалии гравитационного поля носят ярко выраженный линейный характер. Тогда естественно ввести предположение о том, что источник поля имеет бесконечную протяжённость по какому-то направлению, а в каждой вертикальной плоскости, перпендикулярной к этому направлению, сечение носителя и распределение масс по этому сечению одни и те же. Такие тела принято называть двухмерными, а соответствующие им поля – двухмерными или плоскими.

Плотностная двухмерная модель (модель распределения плотности). Задание исходной информации производится по профилю. Используем прямоугольную систему координат с осью Oz, направленной вниз к массам, и осью Ox, совмещённой с дневной поверхностью и направленной вдоль линии задания данных. Модель среды конструируется в области S, лежащей в нижнем полупространстве. Для каждой точки (x, z) ставим в соответствие значения параметра плотности $\sigma = \sigma(x, z)$.

Структурная двухмерная модель. Для представления *структурной модели* каждой точке x сопоставляется глубина залегания $z = f_k(x)$ соответствующей границы $k = 0, 1, ..., N$, лежащей в области S, ограниченной горизонтальной полосой П. Каждый из пластов характеризуется своим неизменным по вертикали параметром плотности $\sigma_k(x)$.

Аппроксимационные двухмерные модели, являясь тоже разновидностью плотностных, представляют собой разбиение области S сеткой на ячейки S_j с плотностью σ_j так, что $\cup S_j = S$; $S_i \cap S_i = 0$; $j = 1, ..., J$ конфигурация которых подбирается таким образом, чтобы изучаемый объект можно было ими хорошо приблизить.

Исходные данные в условиях недоопределенности задаются системой профилей Г, $\Gamma = \{\Gamma_l\}$, $l = 1, ..., P$, l – геолого-геофизические разрезы. Систему координат рассматриваем с осью Oz, направленной вниз и плоскостью xOy – совмещённой с дневной поверхностью. Модель среды конструируется в области V, лежащей в нижнем полупространстве. Для всех разрезов имеются координаты начала и конца в общей системе координат.

Плотностная объёмная модель. Для представления модели данного вида каждой точке $v = (x, y, z)$ пространства V сопоставляется значение параметра плотности $\sigma = \sigma(v)$.

Структурная объёмная модель. Каждой точке $s = \{x, y\}$ пространства V, ограниченного полосой П, сопоставляется глубина залегания $z = f_k(s)$ границы $k = 0, 1, ..., N$. Каждый из пластов характеризуется своим параметром плотности $\sigma_k(s)$, неизменным по вертикали в пределах каждого из пластов. Среди структурных моделей можно выделить:

1) модели, где плотность $\sigma_k(s) = \sigma_k$ постоянна в пределах каждого из $N + 1$ пластов;

2) модели, где плотность $\sigma_{k,q}(s)$ может меняться не только в пределах k-го пласта, но и в пределах q блоков, находящихся в составе данного пласта.

Модель первого вида является идеализированной, поэтому наибольший интерес представляет модель, где $\sigma_k(s) \neq \sigma_k$, т.е. плотность пласта не является постоянной. В этом случае модель представляет собой следующее:

- границы, ограничивающие пласты, представляют собой однозначные функции пространственных координат $z_k = f_k(s)$, $k = 0, 1, ..., N + 1$;
- плотность пласта, заключённого между k-й и $k + 1$-й границами, есть функция горизонтальных координат $\sigma_{k+1} = \sigma_{k+1}(s)$, $k = 0, 1, ..., N$;
- нулевая граница есть горизонтальная пластина с глубиной f_0 и плотностью пласта σ_0;
- плотность среды ниже границы с номером N есть σ_{N+1};

● величины f_0, σ_{N+1}, σ_0 считаются постоянными;

● объёмная модель $\{\vec{f}, \Delta\vec{\sigma}\}$ имеет в качестве своего следа на поверхности $\{l\}$ – проходящей через линию Γ_l нормально к дневной поверхности двухмерную модель $\{\vec{f}, \Delta\vec{\sigma}\}\{l\}$.

Для объёмной структурной модели введём краткое обозначение:

$$\{\vec{f}, \Delta\vec{\sigma}\}, \quad \vec{f} = \{f_0, f_1, \ldots f_N\},$$

$$\Delta\vec{\sigma} = \{\Delta\sigma_0, \Delta\sigma_1, \ldots \Delta\sigma_N\},$$

$$\Delta\sigma_k = \sigma_k - \sigma_{k+1}, \; \sigma_0 = \sigma_{N+1} = 0,$$

где $\Delta\sigma_k$ – контрастность k-го пласта.

Аппроксимационные объемные модели представляют собой разбиение области V сеткой на подобласти V_j с плотностью σ_j так, что $\cup V_j = V$; $V_i \cap V_i = 0$; $j = 1, \ldots, J$.

Классические аппроксимационные модели характеризуются призматическим видом подобластей. Модели этого вида могут иметь в качестве аппроксимирующих тел также и другие тела: шар, пирамиду и др. Такие конструкции ориентированы на задачи типа рудных.

Иерархическая схема объёмных моделей среды, используемых гравиразведкой и в дальнейшем обозначаемых $x(v)$, приведена на рис. 1.

В зависимости от вида модели среды модель явления, которая суть оператор прямой задачи A, может описывать плотностные и структурные задачи гравиразведки.

$$Ax = U. \tag{1}$$

Моделью поля в этих задачах можно считать значения вертикальной составляющей гравитационного потенциала в конечном числе точек. В случае двухмерных задач это будет двухмерный массив (x_0, u_z), в случае трёхмерной – трёхмерный (x_0, y_0, u_z). Под решением обратной задачи [1, 2, 8] понимают нахождение распределения источников x (плотность $\sigma(v)$ либо конфигурация границ $f(s)$) при введённых о них модельных представлениях по заданным наблюдаемому полю U и оператору прямой задачи $A(x)$.

Оператор прямой двухмерной плотностной задачи гравиразведки. Вертикальная производная гравитационного потенциала $u_z(x_0, z_0)$, где точка (x_0) регистрируется на поверхности в $E_+(z > 0)$ с уравнением $z_0 = \psi(x_0)$, задана следующим соотношением между $u_z(x_0, z_0)$ и $\sigma = \sigma(x, z)$:

$$A\big(\sigma(x,z)\big) = u_z\big(x_0, z_0 = \psi(x_0)\big) = 2\iint_S \frac{\gamma\sigma\big(z - \psi(x_0)\big)dxdz}{\Big[\big(x - x_0\big)^2 + \big(z - \psi(x_0)\big)^2\Big]}, \tag{2}$$

где $\gamma = 6{,}673 \cdot 10^{-5}$ (поле в миллигалах, расстояния в метрах, плотность в г/см^3) – гравитационная постоянная.

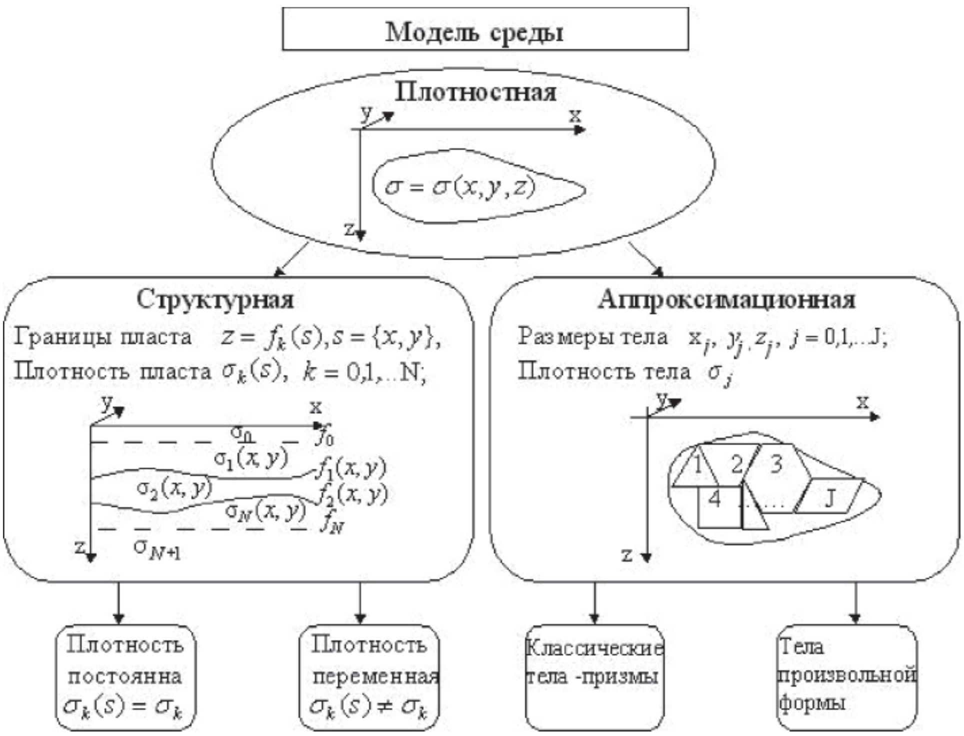

Рис. 1. Иерархическая схема объёмных моделей среды

Оператор прямой двухмерной структурной задачи гравиразведки. Для структурной модели среды, где система границ $\vec{f}(x)=\{f_i(x)\}$ имеет плотности $\vec{\sigma}(x)=\{\sigma_i(x)\}$, связь с вертикальной производной гравитационного поля $u_z(x_0, z_0)$ определена соотношением

$$A\left(\vec{f}(x),\vec{\sigma}(x)\right)=u_z(x_0,z_0=\psi(x_0))=$$

$$=\sum_{i=0}^{N}\int\frac{\gamma\Delta\sigma_i(x)\,dx}{\left[(x-x_0)^2+\left(f_i(x)-\psi(x_0)\right)^2\right]^{1/2}}. \quad (3)$$

Оператор прямой трёхмерной плотностной задачи гравиразведки. Вертикальная производная гравитационного потенциала $u_z(v_0)$, где $v_0 = (x_0, y_0, z0)$ и точка $(x_0, y_0) = s_0 \in E_0$ регистрируется на поверхности с уравнением $z_0 = \psi(s_0)$, задана следующим соотношением между $u_z(v_0)$ и $\sigma = \sigma(v)$:

$$A\left(\sigma(v)\right)=u_z\left(s_0,z_0=\psi(s_0)\right)=$$

$$=\iiint\limits_V\frac{\gamma\sigma(v)\left(z-\psi(s_0)\right)dxdydz}{\left[\left(x-x_0\right)^2+\left(y-y_0\right)^2+\left(z-\psi(s_0)\right)^2\right]^{3/2}}. \quad (4)$$

Оператор прямой трёхмерной структурной задачи гравиразведки. Для структурной модели среды для простоты плотность каждого пласта примем постоянной. Вертикальная производная гравитационного потенциала $U_z(v_0)$, в точке $A(v_0)$, вычисляется по формуле:

$$U_z(v_0)=A\left(\{\vec{f},\vec{\sigma}\}\right)=\iiint\limits_V\frac{\gamma\sigma\left(f(s)-z_0\right)dxdydz}{\left[\left(x-x_0\right)^2+\left(y-y_0\right)^2+\left(f(s)-z_0\right)^2\right]^{3/2}}. \quad (5a)$$

Формула (5a) для объёмной структурной модели среды в случае, когда $z_0 = \psi(s_0)$:

$$U_z(s_0,z_0=\psi(s_0))=A\left(\{\vec{f},\vec{\sigma}\}\right)=\iiint\limits_V\frac{\gamma\sigma\left(f(s)-\psi(s_0)\right)dxdydz}{\left[\left(x-x_0\right)^2+\left(y-y_0\right)^2+\left(f(s)-\psi(s_0)\right)^2\right]^{3/2}}. \quad (5b)$$

Вычислив в (5b) интеграл по переменной z и представив результат в виде суммы по $N + 1$ границе, получаем

$$U_z(s_0,z_0=\psi(s_0))=A\left(\{\vec{f},\Delta\vec{\sigma}\}\right)=\sum_{i=0}^{N}\iint\limits_S\frac{\gamma\Delta\sigma_i(s)\,dxdy}{\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+\left(f_i(s)-\psi(s_0)\right)^2\right]^{1/2}}. \quad (5c)$$

Рис. 2. Оператор объёмной прямой задачи гравиразведки для разных видов моделей среды

Оператор прямой трёхмерной задачи гравиразведки для аппроксимационной модели. Для каждого элемента V_j задаётся значение плотности $\vec{\sigma}_j$, а гравитационное поле рассчитывается по формуле

$$U_z\left(s_0,\overline{\sigma}\right)=\sum_{j=1}^{J}U_z^j\left(s_0,\vec{\sigma}_j\right),$$

где

$$A\left(\vec{\sigma}_j\right)=U_z^j\left(s_0,\vec{\sigma}_j\right)=\iiint_{V_j}\frac{\gamma\sigma_j(\nu)\left(z-\psi(s_0)\right)dxdydz}{\left[\left(x-x_0\right)^2+\left(y-y_0\right)^2+\left(z-\psi(s_0)\right)^2\right]^{3/2}}. \qquad (6)$$

Виды модели явления для прямой задачи гравиразведки можно представить в виде схемы (рис. 2).

Наиболее полной и общей моделью среды, используемой гравиразведкой и позволяющей описывать любые неоднородности, является модель функции плотности как функции пространственных координат, однако она обладает серьёзными недостатками. Объясняется это тем, что по гравиметрическим данным не может быть восстановлено распределение плотности в нижнем полупространстве. Поэтому для изучения строения осадочных бассейнов следует использовать модели структурного типа.

Список литературы

1. Аминов Л.З., Кобрунов А.И., Моисеенкова 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. – Том 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 // 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: ГИ УрО РАН, 2011. – С. 201–204.

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

References

1. Aminov L.Z., Kobrunov A.I., Moiseenkova S.V., Motrjuk E.N., Shilova S.V., Muzhikova A.V. Metodika integrirovannoj interpretacii gravimetricheskih dannyh v uslovijah slaboj izuchennosti s celju postroenija ob#emnyh regionalnyh plotnostnyh modelej sedimentacionnyh bassejnov // Geologija i mineralnye resursy Evropejskogo Severo-vostoka Rossii: materialy XIV geologicheskogo s#ezda Respubliki Komi. Tom 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 Sistemnyj analiz i modelirovanie v uslovijah neopredelennosti. Uhta: UGTU, 2014. 154 p.

3. Kobrunov A.I. Skrytaja jekvivalentnost i jeffektivnost interpretacii gravimetricheskih 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 geologicheskih sred // Geofizika. 2009. –no. 3. pp. 41–48.

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

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

7. Motrjuk E.N. Razrabotka tehnologii i metodiki modelirovanija glubinnogo stroenija zemnoj kory na osnove kompleksnoj interpretacii geologo-geofizicheskih dannyh // Voprosy teorii i praktiki geologicheskoj interpretacii geofizicheskih polej: materialy 38 sessii Mezhdunarodnogo seminara im. D.G. Uspenskogo. Perm: GI UrO RAN, 2011. pp. 201–204.

8. Petrovskij A.P. Informacionnoe obespechenie i modelnye predstavlenija integralnoj interpretacii geologo-geofizicheskih 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.