

УДК 550.3

МЕСТО ГРАВИРАЗВЕДКИ В КОМПЛЕКСЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПОИСКА НЕФТИ И ГАЗА

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

Проведён анализ эффективности ведущих технологий интерпретации гравиметрических данных при решении задач построения моделей геологических сред. Используемые сегодня технологии и методики для построения моделей среды в большинстве своём основаны на корреляционном анализе сейсмогравиметрических данных. Выявлено несоответствие построенной по таким методикам модели наблюдаемому полю, что связано с тем, что корреляционно-статистические связи между гравитационным полем и геологической границей (плотностью) не отражают физической природы геологической среды. Показано, что при интерпретации геофизических данных не в полной мере используется информация, содержащаяся в гравитационном поле. Сделан вывод о том, что они не позволяют качественно решать задачу изучения сложнопостроенных образований типа осадочных бассейнов в условиях фрагментарности данных. В этой связи необходимо развитие специализированной методики, основанной на решении обратных задач в этой ситуации с вовлечением комплекса геофизических методов.

Ключевые слова: гравirazведка, сложнопостроенные среды, геолого-геофизические модели, геофизические методы, обратные задачи, критериальный подход

PLACE OF GRAVIMETRICS IN THE COMPLEX OF EXPLORATION WORKS WHILE SOLVING THE PROBLEMS OF OIL AND GAS EXPLORATION

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

The efficiency analysis of leading technologies interpretation of gravity data in solving problems of constructing models of the geological environment has been conducted. Up-to-date technologies and methods for environment modeling are mostly based on the correlation analysis of seismic and gravity data. The discrepancy between the model built on such techniques and the observed field is obvious, which is related to the fact that the correlation and statistical relationship between the gravitational field and geological boundary (density) does not reflect the physical nature of the geological environment. It is shown that while interpreting the geophysical data the information contained in a gravitational field is not fully utilized. The conclusion is that they do not allow to efficiently solve the problem of studying complex structures such as sedimentary basins in the conditions of fragmentary data. In this context we need to develop a specialized technique based on the solution of inverse problems in this situation. The involvement in the process of inverse problems solution of geophysical methods will allow to provide meaningful results.

Keywords: gravity prospecting, complex structure environment, geological and geophysical models, geophysical methods, inverse problems, criteria approach

Задачи прогнозирования нефтегазоносности всегда были актуальными, а в наше время, в сложных экономических условиях, качество их решения имеет особое значение. Они решаются на основе изучения геологического строения крупных регионов, динамических особенностей развития, построения моделей тектонического и геологического строения региона. Таким образом, важно наличие адекватных реальной среде геолого-геофизических моделей осадочных бассейнов и их фрагментов, построенных на основании комплексного анализа всей имеющейся геолого-геофизической информации.

Одним из главных факторов, определяющих эффективность использования геофизических методов для решения задач построения моделей геологических сред, является

заложенная в поле полезная информация об исследуемом объекте и возможность извлечения этой информации. Рассмотрим технологии реконструкции структурно-плотностных моделей по гравиметрическим данным [8]. Коснёмся некоторых, наиболее популярных и представляющих интерес в связи с поставленной проблемой.

Различные технологии интерпретации гравиметрических данных в своей основе содержат решение соответствующих обратных задач. Под решением обратной задачи [6] понимают нахождение распределения источников x (плотность $\sigma(v)$) или конфигурация границ $f(s)$ по заданным наблюдаемому полю U и оператору прямой задачи $A(x)$:

$$Ax = U. \quad (*)$$

Одна из технологий основана на призматическом подходе (Е.Г. Булах, С.В. Шалаев, В.И. Старостенко, П.И. Балк, В.И. Гольдшмидт, В.Н. Страхов и др.). Уступы, призмы, пирамиды, цилиндры, многоугольники – наиболее распространённые геометрические объекты, набором которых с подобранными геометрическими параметрами и плотностями моделируется реальный геометрический объект. Такой способ решения обратных задач – *метод подбора*, где в качестве модельного класса выбираются конструкции призматического типа. В рамках этих методов для решения обратных задач (*) рассматриваются:

1. Модельный класс k – множество возможных элементарных тел m , которыми аппроксимируется геологическая среда. Для каждого элементарного тела существует способ расчёта компонент гравитационного поля $u = A(x)$ и наблюдаемая компонента u^n .

2. Критерий подбора наблюдаемого и рассчитанного полей представлен минимизируемым функционалом $J(u^n, A(m))$, характеризующим степень согласия изучаемых компонент гравитационного поля.

3. Алгоритм решения обратной задачи представляет собой способ осуществления минимизации функционала $J(u^n, A(m))$, в результате чего определяется искомая плотностная модель m' .

В зависимости от задания гравитационного поля и его точности, наличия регионального фона, влияния пород, залегающих вне области поиска решения и т.п., принимается различный вид функционала $J(u^n, A(m))$.

В рамках методов подбора можно выделить также технологии, состоящие в нахождении некоторых формальных источников наблюдаемого гравитационного поля с последующим их эквивалентным перераспределением [12]. При описании сложнопостроенных сред число параметров значительно возрастает, и при решении обратной задачи методами подбора возникают проблемы устойчивости и единственности. Решение вопросов о корректности обратных задач занимает в теории интерпретации геофизических данных центральное место. Так, трудами А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.Н. Страхова и их последователей развита теория некорректных задач. В основе этой теории лежит идея привлечения в постановку обратной задачи дополнительной информации об искомом решении. Непосредственно поиск решения обратной задачи осуществляется с помощью регуляризирующих алгоритмов [1, 11]. Проблема неединственности обратной задачи сопровождается её неустойчивостью: малые из-

менения во входных данных порождают различные результаты решения. Снижение этого эффекта позволило осуществить методы регуляризирующих процедур. При решении обратных задач для сложнопостроенных сред возникает «эффект скрытой эквивалентности» [1, 2, 3, 5]. Для реально существующего распределения плотности $\sigma(v)$, характеризующего изучаемую среду, найдётся элемент m^* , такой что для достаточно малого $\varepsilon > 0 : \|m^* - \sigma(v)\| < \varepsilon$.

На исходном классе может найтись также некоторый бессмысленный с геологической точки зрения элемент $\sigma'(v)$, такой что $A(\sigma(v)) = A(\sigma'(v))$, который может быть аппроксимирован некоторым элементом m' из класса K лучше, чем m^* , аппроксимирует $\sigma(v)$ [2]. Возникает вопрос о том, какое решение из области эквивалентности получается при использовании метода подбора.

Особый интерес представляют технологии, развивающие методы решения обратных задач гравиметрии в рамках так называемого *критериального подхода*, разработанного А.И. Кобруновым [5]. Особенность данного подхода состоит в том, что на основе критерия качества решения, содержащего в свёрнутом виде априорную информацию о параметрах среды, из множества решений, удовлетворяющих наблюдаемому гравитационному полю формируются классы единственности, а полученные на них решения обратной задачи удовлетворяют условиям единственности и устойчивости [5]. Вопросы, связанные с такой постановкой обратной задачи, широко отражены в трудах В.Н. Страхова [15], А.И. Кобрунова [1], А.С. Маргулиса, М.В. Новоселицкого [7] и др. Подобная постановка известна в работах G. Backus и F. Gilbert [14], разработавших линейную теорию решения обратных задач при использовании ограниченного набора данных. Подробная характеристика этих методов дана в [13]. Основы данной технологии заложены в системе GCIS, разработанной А.И. Кобруновым, А.П. Петровским и др. [4], но все эти технологии – двумерные. В этой ситуации необходимо обеспечить увязку технологий профильного и объёмного моделирования.

Технологии, основанные на *спектральном анализе поля*, представлены в работах Л.Т. Бережной, М.А. Телепина, О.И. Журавлевой и др. Для нахождения плотности используется полиномиальная аппроксимация, а описание конфигурации плотностной границы производится отрезком ряда Фурье. Восстановление геометрии модели по полю проводилось при помощи сферических функций. В случае нескольких

контактных поверхностей возникает проблема выделения из суммарного поля гравитационных эффектов от каждой поверхности и изучения трансформации полей. Необходимо оценивать качество решения.

Одной из объёмных технологий построения пространственных моделей является технология *корреляционного прогнозирования* структур. Они были развиты в работах В.И. Шрайбмана, М.С. Жданова, О.В. Витвицкого, Г.И. Каратаева, Ф.М. Гольцмана, Т.Б. Калининой, А.А. Никитина и др. В общей схеме для расчётов выбираются эталонный и исследуемый участки, близкие по геологическому строению. По данным различных исследований на эталонном участке устанавливается корреляционная связь

между глубиной плотностной границы и какой-либо компонентой гравитационного поля. Составленное уравнение регрессии применяется к исследуемому участку. Результаты решений во многом зависят от степени соответствия эталонной и исследуемой площадей, от полученной тесноты связи на эталонной площади. Проблемным вопросом является выделение аномального гравитационного поля, наилучшим образом связанного с конкретной плотностной границей. На сегодняшний день корреляционно-статистическими методами интерпретировано большое количество данных. Например, на территории Тимано-Печорской провинции и Баренцево-моревого бассейна была проведена обработка данных С.П. Аплонным [10] и др.

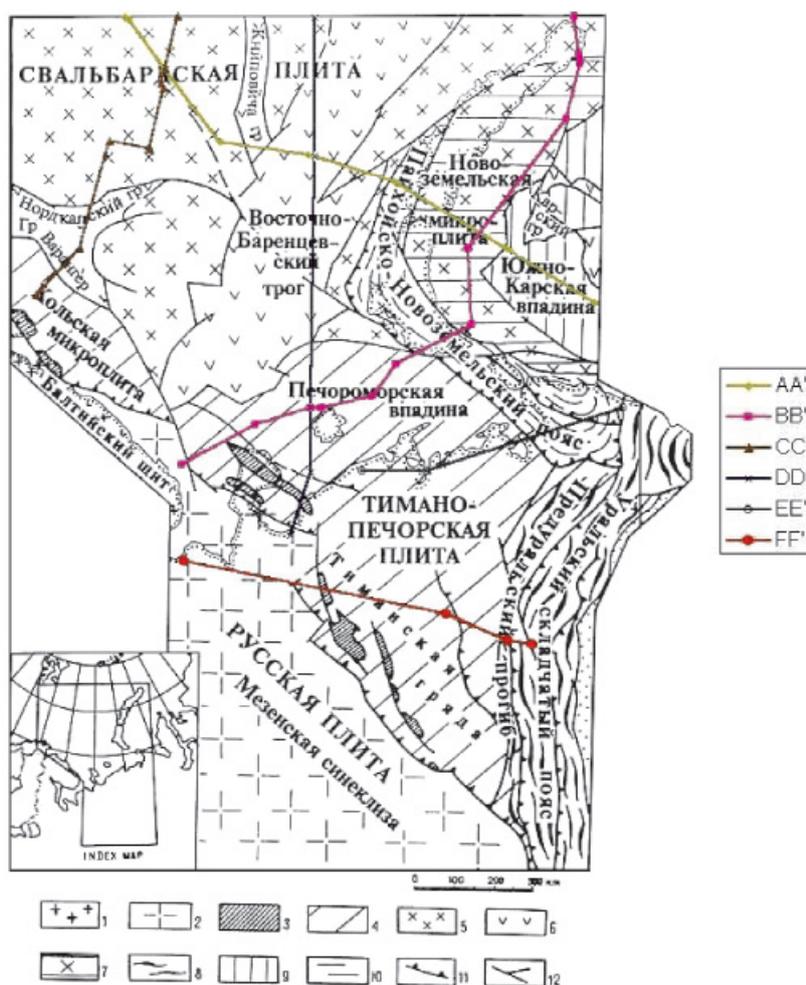


Рис. 1. Тектоническая карта района исследований (Выкопировка из тектонической схемы севера Европейской части России и прилегающих акваторий [10]):
 1 – фундамент Балтийского щита; 2 – протерозойский фундамент, перекрытый чехлом Русской плиты; 3 – складчатые рифейско-вендские отложения; 4 – эпибайкальские плиты; 5 – эпигренвильская плита; 6 – трого с субокеанической корой; 7 – эпигренвильская плита с элементами киммерийской складчатости; 8 – герцинские складчатые структуры; 9 – эпигерцинская плита; 10 – раннекиммерийские складчатые структуры; 11 – надвиги; 12 – сбросы, сдвиги

Результаты такого анализа являются приближенными. Объясняется это тем, что физическая информация в уравнениях, описывающих модель, просто не используется. Поэтому итоговая модель зависит от того, в какой последовательности и какие профили были взяты за эталон, какие из них были взяты для проверки. При замене одних другими может получиться другая структура, и доказательством тому является сопоставление результатов построения Тимано-Печорской провинции и Баренцевоморского бассейна (рис. 1) при различных подходах к представлению априорной информации.

На рис. 2 и 3 представлены результаты построения рельефа фундамента одной и той же территории различных авторов [9, 10]. Расхождения достигают 8000 м, что приводит к выводу о необходимости пересмотра выполненных построений, проверки их на

соответствие гравитационному полю и корректировки. Необходимо вернуться к изучению строения осадочных бассейнов, даже там, где были проведены исследования и составлены структурные карты.

Таким образом, существующие сегодня технологии анализа гравиметрических данных не позволяют качественно решать задачу изучения сложнопостроенных образований типа осадочных бассейнов в условиях фрагментарности данных. Это связано либо с недостаточностью возможности комплексирования, либо недостатками, скрытыми в технологии гравитационного анализа при решении обратных задач. Проведенный анализ эффективности применения гравиметрии при решении задач поиска нефти и газа показал, что при интерпретации геофизических данных не в полной мере используется информация, содержащаяся в гравитационном поле.

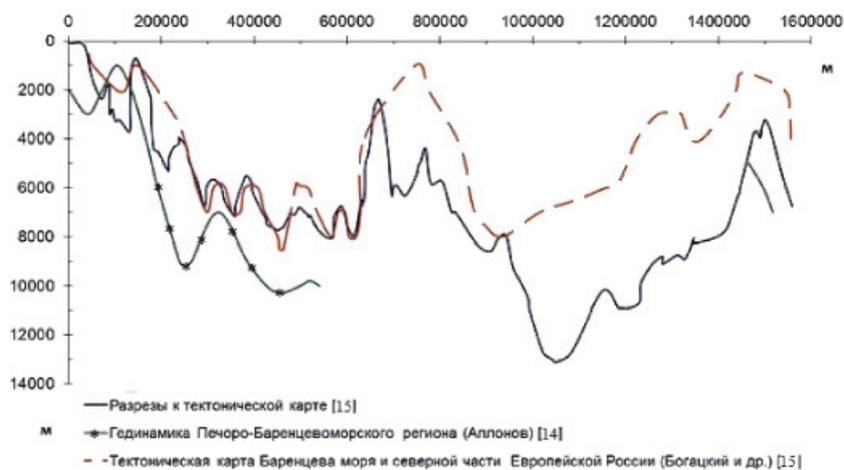


Рис. 2. Сопоставление рельефа поверхности фундамента по профилю BB'

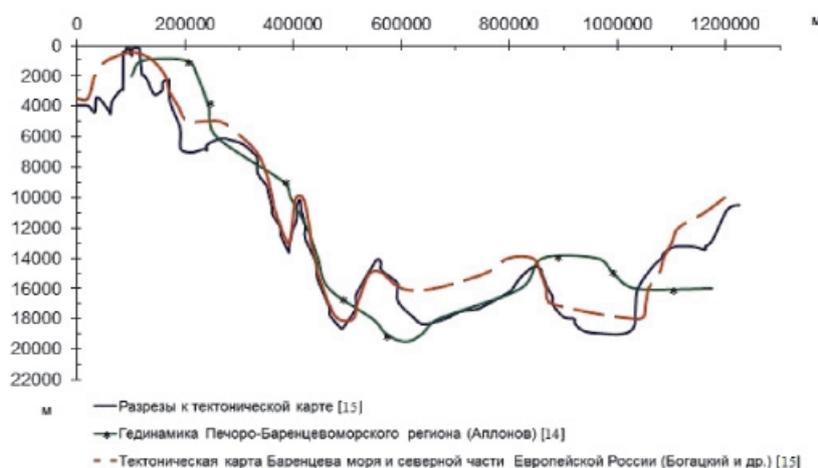


Рис. 3. Сопоставление рельефа поверхности фундамента по профилю DD'

В этой связи необходимо развитие специализированной методики, основанной на решении обратных задач в условиях фрагментарности данных. Активное использование априорной информации в технологиях решения обеспечит управление процессом получения единственного элемента из класса эквивалентности, а также технологичность процедур и содержательность результатов.

Список литературы

1. 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. – С. 199–3947. 78 с.; Ч.2 Системный анализ и моделирование в условиях неопределенности. – Ухта: УГТУ, 2014. – 154 с.
2. Кобрунов А.И. Скрытая эквивалентность и эффективность интерпретации гравиметрических данных // Изв. РАН сер Физика земли. – 2014. – № 2. – С. 53–62.
3. Кобрунов А.И., Урбан А.В. О проблеме скрытой эквивалентности при реконструкции моделей геологических сред // Журнал Геофизика. – 2009. – № 3. – С. 41–48.
4. Кобрунов А.И., Петровский А.П., Моисеев С.В. Автоматизированная система комплексной интерпретации сейсмогравиметрических данных // Международная геофизическая конференция. – СПб., 2000. – С. 534–535.
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. Маргулис А.С., Новоселицкий В.М. Фурье-аналогия в обратных задачах гравиметрии для некоторых «нефтяных» и «планетарных» плотностных моделей // Изв. АН СССР Физика Земли. – 1982. – № 4. – С. 242–246.
8. Мотрюк Е.Н., Вельтистова О.М. Современные отечественные программные комплексы интерпретации гравиметрических данных // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2013. – Вып. № 3 (15). – С. 70–80.
9. Объяснительная записка к тектонической карте Баренцева моря и северной части Европейской России масштаба 1:2500000. – М.: Институт литосферы РАН, 1996. – 94 с. (Карта и разрезы к ней на 2 листах.) «Нефтегазоносность и геолого-геофизическая изученность Тимано-Печорской провинции: история, современность, перспективы»: монография. – Ухта: УГТУ, 1999. – 1062 с.
10. Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Баренц регион / кол. авт. под ред. Ф.П. Митрофанова, Н.В. Шарова. – Апатиты: Изд.-во КНЦ РАН, 1998. – Ч. 1 – 237 с.; Ч. 2 – 205 с.
11. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – К.: Наукова думка, 1978. – 228 с.
12. Тихонов А.Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
13. Яновская Т. Б., Порохова Л.Н. Обратные задачи геофизики. – Л.: ЛГУ, 1983. – 209 с.
14. Backus G., Gilbert F. The resolving power of gross earth data // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1968. – Vol. 16. – P. 169–205.
15. Strakhov V.N. Main directions of development of the theory and methods for interpretation of geophysical data to-

wards the beginning of the 21st century, PART1 // Geofizika. – 1995. – № 3. – P. 9.

References

1. Kobrunov A.I. Matematicheskie metody modelirovaniya v prikladnoj geofizike (izbrannye glavy) v 2-h chastyah. Ch.1 Funkcionalno-analiticheskie osnovy // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimentalnogo obrazovanija. 2014. no. 11. pp. 199–3947. 78 p.; Ch.2 Sistemnyj analiz i modelirovanie v uslovijah neopredelennosti. Uhta: UGTU, 2014. 154 p.
2. Kobrunov A.I. Skrytaja jekvivalentnost i jeffektivnost interpretacii gravimetricheskikh dannyh // Izv. RAN ser Fizika zemli. 2014. no. 2. pp. 53–62.
3. Kobrunov A.I., Urban A.V. O probleme skrytoj jekvivalentnosti pri rekonstrukcii modelej geologicheskikh sred // Zhurnal Geofizika. 2009. no. 3. pp. 41–48.
4. Kobrunov A.I., Petrovskij A.P., Moiseenkova S.V. Avtomatizirovannaja sistema kompleksnoj interpretacii sejsmogravimetricheskikh dannyh // Mezhdunarodnaja geofizicheskaja konferencija. SPb., 2000. pp. 534–535.
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. Margulis A.S., Novoselickij V.M. Fure-analogija v obratnyh zadachah gravimetrii dlja nekotoryh «neftjanyh» i «planetarnyh» plotnostnyh modelej // Izv. AN SSSR Fizika Zemli. 1982. no. 4. pp. 242–246.
8. Motrjuk E.N., Veltistova O.M. Sovremennye otechestvennye programmnye komplekсы interpretacii gravimagnitnyh dannyh // Izvestija Komi nauchnogo centra UrO RAN. 2013. Vyp. no. 3 (15). pp. 70–80.
9. Objasnitelnaja zapiska k tektonicheskoj karte Barenceva morja i severnoj chasti Evropejskoj Rossii masshtaba 1:2500000. M.: Institut litosfery RAN, 1996. 94 p. (Karta i razrezy k nej na 2 listah.) «Neftegazonosnost i geologo-geofizicheskaja izuchenost Timano-Pechorskoj provincii: istorija, sovremennost, perspektivy»: monografija. Uhta: UGTU, 1999. 1062 p.
10. Sejsmogeologicheskaja model litosfery Severnoj Evropy: Barenec region / kol. avt. pod red. F.P. Mitrofanova, N.V. Sharova. Apatity: Izd.-vo KNC RAN, 1998. Ch. 1 237 p.; Ch. 2 205 p.
11. Starostenko V.I. Ustojchivye chislennye metody v zadachah gravimetrii. K.: Naukova dumka, 1978. 228 p.
12. Tihonov A.N., Arsenin V. Ja. Metody reshenija nekorrektnyh zadach. M.: Nauka, 1979. 288 p.
13. Janovskaja T. B., Porohova L.N. Obratnye zadachi geofiziki. L.: LGU, 1983. 209 p.
14. Backus G., Gilbert F. The resolving power of gross earth data // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1968. Vol. 16. pp. 169–205.
15. Strakhov V.N. Main directions of development of the theory and methods for interpretation of geophysical data towards the beginning of the 21st century, PART1 // Geofizika. 1995. no. 3. pp. 9.

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.