



Submission ID: 43834

The Approach to Parametric Multidimensional Inversion of Marine Electrical Prospecting Data Considering Bathymetry

M.G. Persova* (Novosibirsk State Technical University), Y.G. Soloveichik (Novosibirsk State Technical University), D.V. Vagin (Novosibirsk State Technical University), D.S. Kiselev (Novosibirsk State Technical University), Y.I. Koshkina (Novosibirsk State Technical University), D.N. Kurskiya (Novosibirsk State Technical University)

SUMMARY

This paper proposes the approach to multidimensional inversion of the marine electrical prospecting data in the time-domain, which are obtained using the Differential Normalized Method of Electrical Investigation (DNME). This approach is based on the parametric (model-based) nonlinear multidimensional inversion with the simultaneous recovery of the borders coordinates of the 3D inhomogeneities and their electrophysical properties (electrical conductivity and polarizability). The solution of forward problems and calculation of the field of the impact of geoelectrical model parameters are performed with the use of the finite element method. The inversion is carried out in two stages including the division of measured signals into the electrodynamic component and signals of the induced polarization field. The subhorizontal borders of structural parts of the geoelectrical model can be either fixed (for example, according to the sea depth variations or borders, obtained by seismic methods) or recovered. The possibilities of the proposed approach are shown with the use of synthetic data for the generalized geoelectrical model which was constructed on the basis of the results of the DNME data interpretation obtained in several sea areas.





О подходе к геометрической многомерной инверсии данных морской электроразведки с учетом данных батиметрии

М.Г. Персова* (НГТУ), Ю.Г. Соловейчик (НГТУ), Д.В. Вагин (НГТУ), Д.С. Киселев (НГТУ), Ю.И. Кошкина (НГТУ), Д.Н. Курский (НГТУ)

Введение

Одной из технологий морской электроразведки, нацеленной на поиск углеводородов, является дифференциально-нормированный метод электроразведки (ДНМЭ) (Flekkøy et al. 2013, Maver et al. 2015, Veeken et al. 2009), который основан на изучении электромагнитного поля во временной области. При использовании этой технологии основной предпосылкой обнаружения месторождений углеводородов является наличие ореолов повышенной поляризуемости, образующихся вследствие миграции углеводородов над залежами в верхнюю часть геологического разреза и ограниченных сверху геохимическим барьером.

Наиболее распространенным методом обработки данных на сегодняшний день является 1D-инверсия. Однако в присутствии значимых изменений рельефа дна и трехмерного влияния локальных объектов (к ним, например, относится наличие в геологической среде соляных диапиров), 1D подходы к обработке данных могут давать сильные искажения в восстанавливаемой модели и, как следствие, приводить к выявлению ложных аномалий и ошибок в прогнозе. В этом случае необходимо применение многомерной (2D или 3D) инверсии.

Для рассматриваемой технологии необходим подбор как параметров удельной проводимости, так и поляризуемости. Вместе с тем одновременный подбор параметров проводимости и поляризуемости при работе в проводящих средах зачастую приводит к сильной неоднозначности решения соответствующих обратных задач. В данной работе рассматривается подход к многомерной (2D и 3D) геометрической (Abubakar et al. 2006, Mogilatov et al. 2016, Persova et al. 2013, Persova et al. 2016, Singh et al. 2014) инверсии данных ДНМЭ, в котором минимизируемый функционал предлагается конструировать специальным образом. В результате становится возможным разделять измеряемые сигналы на сигналы становления поля (СП) и вызванной поляризации (ВП), что позволит снизить области эквивалентности и более уверенно выделять зоны аномальной поляризуемости.

Метод геометрической многомерной инверсии с разделением измеренного сигнала на электродинамическую составляющую и сигналы поля вызванной поляризации

Метод геометрической инверсии основан на совместном подборе координат границ многомерных (2D и 3D) неоднородностей и их электрофизических параметров. Он включает в себя два этапа. На первом этапе ищется распределение проводимости и выполняется разделение измеренного сигнала на сигналы СП и ВП. На втором этапе с учетом найденного распределения проводимости ищется распределение поляризуемости. Минимизируемый функционал на первом этапе многомерной инверсии имеет вид:

$$\Phi^{\alpha}\left(\mathbf{b}\right) = \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \left(v_{lk} \left(\delta \mathcal{E}_{lk} \left(\mathbf{b} \right) - \sum_{p=1}^{P} \theta_{l}^{p} \beta_{lk}^{p} \right) \right)^{2} + \sum_{m=1}^{M} \alpha_{m} \left(\Delta b_{m} \right)^{2} + \sum_{n=1}^{N} \tilde{\alpha}_{n} \left(\theta_{n} \right)^{2},$$

где $\delta \mathcal{E}_{lk} = \widetilde{\mathcal{E}}_{lk} - \mathcal{E}_{lk}$ — ошибки (невязки) в сигналах, \mathcal{E}_{lk} — сигналы, зарегистрированные в l -м приемнике в моменты времени t_k , $\widetilde{\mathcal{E}}_{lk}$ — соответствующие теоретические сигналы, полученные в результате решения прямой трехмерной задачи; \mathbf{b} — включающий в себя координаты границ трехмерных объектов и их удельные сопротивления вектор искомых





параметров b_m , описывающих трехмерную геоэлектрическую модель; \mathbf{b}^0 — вектор параметров b_m^0 , полученных на предыдущей итерации процедуры нелинейной 3D-инверсии; $\Delta b_m = b_m - b_m^0$; α_m и $\tilde{\alpha}_n$ — параметры регуляризации; v_{lk} — некоторые веса, отражающие уровень погрешности при приеме сигнала в l-м приемнике и масштаб изменения принимаемого сигнала по времени; θ_l^p — дополнительные параметры, позволяющие выделить из измеренных сигналов их составляющие, соответствующие процессам ВП; $\beta_{lk}^p = \beta_l^p(t)$, $\beta_l^p(t)$ — функции спада, P — количество зон (которые могут быть объединением нескольких слоев или некоторых их участков) в геоэлектрической модели с различными функциями спада (p — номер такой зоны). Решение прямых задач и полей влияния параметров геоэлектрической модели выполняется с использованием конечноэлементного моделирования.

На следующем этапе полученные для восстановленной модели проводимости сигналы \mathcal{E}_{lk} вычитаются из «полевых» сигналов \mathcal{E}_{lk} и остаточные сигналы вместе с подобранной моделью проводимости подаются на вход процедуры инверсии поля ВП. Подбор параметров вызванной поляризации осуществляется в «ячеистой» структуре, что связано с локальностью влияния ВП. Этот подход представлен в работе (Persova et al. 2013).

На первом этапе инверсии геоэлектрическая модель представляется в виде блоков, у которых ищутся координаты границ и удельная электрическая проводимость. При этом горизонтальные границы блоков могут быть как фиксированными — например, по границе морского дна или в соответствии с границами, полученными по сейсморазведке, так и подбираемыми. Заметим, что фиксация границ по данным сейсморазведки является фактически стандартом для 1D-инверсий, но для многомерных инверсий в предлагаемом в данной работе виде не рассматривалась.

Пример

Для верификации предлагаемого подхода к многомерной инверсии были использованы синтетические данные технологии ДНМЭ, полученные для геоэлектрической модели, разрез которой представлен на рис. 1а. Эта модель является типичной для условий морской электроразведки и построена как обобщенная по результатам интерпретаций практических данных ДНМЭ на нескольких морских участках. Глубина моря изменяется от 200 м до 120 м, сопротивление воды было взято равным 0.27 Ом·м. В придонном слое заданы две латеральные неоднородности с более высоким и более низким относительно вмещающего их слоя сопротивлением. Кроме того, на глубине задан слабопроводящий объект (1000 Ом·м), имитирующий диапир. Электромагнитное поле возбуждалось погруженной на 20 м горизонтальной электрической линией длиной 700 м, перемещаемой вдоль профиля. Измерения с шагом 1 км выполнялись семиэлектродной установкой (в диапазоне времен от 0.1 мс до 4 с), с помощью которой регистрировались как первая, так и вторая разности потенциалов на трех электрических линиях.

Помимо объектов, аномальных по проводимости, в геоэлектрической модели заданы объекты, аномальные по поляризуемости η . Сечение модели поляризуемости представлено на рис. 2а. Существенно поляризующимися являются два слоя, причем полагается, что нижний слой (из этих двух) является целевым — повышение поляризуемости в нем соответствует ореолам над залежами (сами залежи расположены глубоко и по электрофизическим свойствам относительно слабоконтрастны, поэтому в модель не включаются).

Стартовая модель для первого этапа инверсии представлена на рис. 1б. Она представляет собой "слои" пробных объектов (объектов-"зародышей"), удельное сопротивление которых совпадает с удельным сопротивлением выбранной тем или иным способом (например, подобранной с





помощью 1D-инверсии по совокупности всех данных) вмещающей среды. При этом верхняя и нижняя границы пробных объектов в двух верхних (придонных) слоях, а также верхние границы объектов третьего слоя заданы совпадающими с реальными "изогнутыми" границами вмещающих их слоев (полагается, что глубина моря известна, а две следующие границы известны по данным сейсморазведки). Глубина же до фундамента и конфигурация возможных диапиров является неизвестными и будут определяться в процессе многомерной инверсии по данным ДНМЭ. Таким образом, искомыми параметрами в нелинейной многомерной инверсии были взяты сопротивления объектов-"зародышей" трех первых придонных слоев, Х-координаты латеральных границ между объектами (в верхних двух слоях Х-координаты границ между соседними объектами соответствовали одному параметру в обратной задаче) и сопротивления соответствующих слоев вмещающей среды. Четвертый слой объектов-"зародышей" был задан на границе с фундаментом, при этом сопротивление этих объектов было зафиксировано равным сопротивлению фундамента, а в качестве искомых параметров для этих объектов-«зародышей» были взяты координаты двух границ по X и верхняя граница по Z. Всего подбиралось 49 параметров.

Геоэлектрическая модель, полученная в результате 11-ти итераций нелинейной инверсии (значение функционала невязки снизилось приблизительно в 15 раз), представлена на рис. 1в. Из него видно, что, не считая мелких (незначимых) включений в глубинном слое, полученная геоэлектрическая модель достаточно хорошо соответствует истинной.

Распределение поляризуемости, полученное в результате второго этапа инверсии, представлено на рис. 26. Из представленных результатов видно, что, в целом, оба аномальных по поляризуемости объекта выделяются и при этом (что является очень важным для дальнейшего прогноза — не всякий поляризующийся слой является целевым) определяется глубина их расположения.

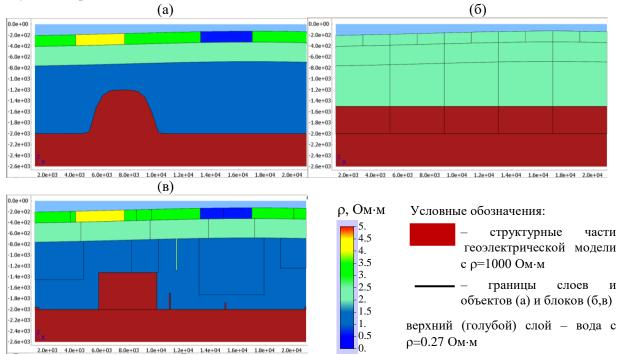


Рисунок 1 Истинная (а), стартовая (б) и подобранная (б) модели проводимости

Выводы

Предложенный метод многомерной инверсии позволяет восстанавливать электрофизические свойства геологической среды по данным ДНМЭ с учетом данных батиметрии. При этом он позволяет выполнять инверсию с включением априорных данных, полученных, например, по





данным сейсморазведки (с фиксацией геометрии изменяющихся границ между слоями). В то же время возможен поиск положения особо контрастных границ, таких как граница с фундаментом, морфология соляных диапиров и др.

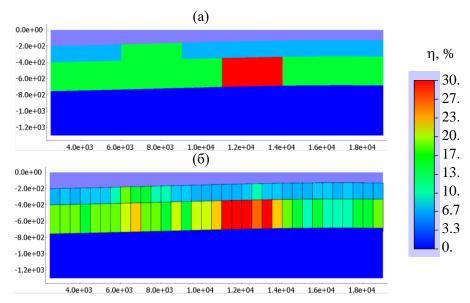


Рисунок 2 Истинная (а) и подобранная (б) модели поляризуемости

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор ПНИЭР: RFMEFI57716X0216, проект № 14.577.21.0216).

References

Abubakar, A. [2006] A 3D parametric inversion algorithm for triaxial induction data. *Geophysics*, **71**(1), G1-G9.

Flekkøy, E.G., Legeydo, P., Håland, E., Drivenes, G. and Kjerstad J. [2013] Hydrocarbon detection through induced polarization: Case study from the Frigg area // CSEM in hydrocarbon exploration and exploitation: NGF Abstracts and Proceedings of the 2nd International CSEM Conference, Oslo (Abstract).

Maver, K., Hargreaves, P., Klubika, A. and Ivanov, S.A. [2015] Using induced polarization measurements to derisk hydrocarbon exploration in the Fingerdjupet-Hoop area, Barents Sea, Norway. *First Break*, **33**(7), 63-66.

Mogilatov, V., Goldman, M., Persova, M., Soloveichik, Y., Koshkina, Y., Trubacheva, O., Zlobinskiy, A. [2016] Application of the marine circular electric dipole method in high latitude Arctic regions using drifting ice floes. *Journal of Applied Geophysics*, **135**, 17–31.

Persova, M.G., Soloveichik, Y.G., Koshkina, Y.I., Vagin, D.V., Trubacheva, O.S. [2016] Geometrical nonlinear 3D inversion of airborne time domain EM data. *Near surface geoscience: The First EAGE Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*, Barcelona, Extended Abstracts, TuMIN07.

Persova, M.G., Soloveichik, Y.G., Trigubovich, G.M., Tokareva, M.G. [2013] Methods and algorithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding. *Izvestiya*, *Physics of the Solid Earth*, **49**(3), 329–343.

Singh, A., Dehiya, R., Gupta, P.K., and Israil, M. [2014] Development of block Inversion algorithm and its comparison with cell inversion schemes. *22nd EM Induction Workshop*, Extended Abstracts. Veeken P.C.H., Legeydo P., Davidenko Yu., Kudryavceva E., Ivanov S. and Chuvaev A. [2009] Benefits of the induced polarization geoelectrical method to hydrocarbon exploration. *Geophysics*, **74**(2), pp. B47-B59.