

ИССЛЕДОВАНИЕ S-АППРОКСИМАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ ИНВЕРСИИ МЕТОДОМ DEXP ПРИ СУЩЕСТВЕННО ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛОЩАДЯХ ИЗМЕРЕНИЙ

Егор Игоревич Есин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, лаборант; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, тел. (961)720-60-51, e-mail: e.esin@g.nsu.ru

Александр Николаевич Василевский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN@ipgg.sbras.ru; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, старший преподаватель кафедры геофизики, тел. (383)363-42-17

Николай Денисович Евменов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, лаборант, тел. (383)333-03-99, e-mail: evmenovnd@ipgg.sbras.ru; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент

В работе рассмотрены проблемы, связанные с проявлением эффекта потери точности аналитического продолжения поля, возникающие при применении алгоритма на основе S-аппроксимации в случае существенно ограниченных площадей измерений в задачах инверсии методом DEXP (depth from extreme points). Продемонстрирована целесообразность применения разновысотной съемки для снижения эффекта ограниченной площади измерений на результаты инверсии.

Ключевые слова: S-аппроксимация, существенно ограниченные площади измерений, структурный индекс, особые точки, магнитная съемка.

INVESTIGATION OF S-APPROXIMATION OF MAGNETIC FIELD IN THE INVERSION PROBLEMS USING DEXP METHOD WITH SIGNIFICANTLY LIMITED AREAS OF EXPLORATION

Egor I. Esin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Laboratory Assistant; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student, phone: (961)720-60-51, e-mail: e.esin@g.nsu.ru

Alexandr N. Vasilevskiy

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-92-01, e-mail: VasilevskiyAN@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Senior Lecturer Chair of Geophysics, phone: (383)363-42-17

Nikolai D. Evmenov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Laboratory Assistant, phone: (383)333-03-99, e-mail: evmenovnd@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student

In this paper we consider the problems associated with the effect of low accuracy of the analytic continuation of the field that arises with applying an algorithm, which based on S-approximation at significantly limited measurement areas in inversion problems of the DEXP method (depth from extreme points). We demonstrate a reasonability of using measurements on different heights to reduce the present effect on the inversion.

Key words: S-approximation, limited areas of exploration, structural index, singular points, magnetic survey.

DEXP (Depth from Extreme Points) – эффективный метод экспресс-оценки глубин аномалиеобразующих тел, основанный на преобразовании объемного (3D) распределения интерпретируемого аномального поля с помощью простой процедуры типа масштабирования вдоль вертикальной оси системы координат (далее – оси z) области интерпретации. Было установлено [1], что измеренное поле или его производная $f_n(r)$, трансформированные по закону (1) (где α_n - некоторая положительная степень), имеют экстремальные точки, зеркальные относительно плоскости $z = 0$ особым точкам аномалиеобразующих тел.

$$W_n(r) = z^{\alpha_n} f_n(r) \quad (1)$$

Поиск экстремумов полученного масштабированного поля не представляет труда. Основная проблема метода – определение корректного значения степени α_n , или т.н. структурного индекса $S_n = 2\alpha_n$. Этот индекс характеризует затухание поля с высотой. При правильном предположении о законе изменения поля положение особой точки будет восстановлено верно. Затухание поля с высотой обусловлено пространственными и геометрическими параметрами интерпретируемого тела, для его надежного определения используются специальные методы [1, 2].

Вторая проблема при использовании метода – необходимость знания 3D распределения поля над интересующей нас областью. Получение 3D поля для последующих трансформаций является отдельной задачей, решать которую можно разными способами. На практике обычно используются методы аналитического продолжения поля в верхнее полупространство относительно некоторого заданного уровня. В данной работе рассматривается один из подходов, основанный на методе линейных интегральных представлений – S-аппроксимаций [3-5], эффективность которого многократно подтверждена многими исследованиями [6-8].

В этом методе интерпретируемое поле представляется с помощью суммы производных потенциалов простого и двойного слоев, распределенных на некоторых вспомогательных плоскостях ниже поверхности наблюдения интерпре-

тируемого поля – (2), где $M=(x_1, x_2, x_3)$ – точка наблюдения поля, $\xi = (\xi_1, \xi_2)$ – множество, задающее распределение плотности на поверхности простого и двойного слоёв, $V(M)$ – потенциал геофизического поля, $\rho_{1,r}(\xi)$ – плотность r -го простого слоя, $\rho_{2,r}(\xi)$ – плотность r -го двойного слоя, H_r – глубина r -го слоя.

$$V(M) = \sum_{r=1}^R \left(\int \int \frac{\rho_{1,r}(\xi) d\xi}{r_{M\xi}^3} + \int \int \frac{\rho_{2,r}(\xi) x_3 d\xi}{r_{M\xi}^5} \right) \quad (2)$$

$$r_{M\xi} = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - H_r)^2}$$

Плотности $\rho_{1,r}(\xi), \rho_{2,r}(\xi)$ определяются в результате решения вариационной задачи исходя из значений измеренного поля, а затем используются для расчета распределения поля и его производных на любой поверхности выше расположения аппроксимирующих слоев.

Ключевым при применении аппроксимации поля в объеме является вопрос о точности восстановления поля вне области задания данных, поскольку она оказывает решающее влияние на результаты инверсии. При расчетах поля с использованием любых аппроксимационных конструкций (в том числе и S-аппроксимации) одним из основных источников ошибок является ограниченность площади задания поля. Особенно сильно данный эффект проявляется при наличии вне изучаемой области высокоамплитудных источников, дающих существенный вклад в интерпретируемое локальное поле. Наше исследование посвящено выработке рекомендаций по планированию сети измерений в предположении ограниченности площади участка и по техническим особенностям применения метода S-аппроксимаций, которые в совокупности обеспечили бы оптимальную точность восстановления пространственного распределения изучаемого аномального поля.

Для исследования обозначенных вопросов были использованы простые синтетические модели (рис. 1). В качестве источника магнитного поля, для определения параметров которого будет решаться обратная задача, предполагается шар радиусом 2 м в пределах площади задания («измерения») поля (с центром на глубине 5 м, координатами $x = 15$ м и $y = 15$ м и с магнитной восприимчивостью 0,115). Для представления поля источников вне рассматриваемой области использовалось тело радиуса 2 м, расположенное на глубине 10 м, с координатами $x = -5$ м, $y = 15$ м и магнитной восприимчивостью 0,55. Внешнее поле представлено исключительно Z-компонентой с напряженностью $6 \cdot 10^4$ нТл.

Предполагалось, что «измерения» исходного аномального поля проводились на высоте 4 и 10 метров (уровни задания поля). По «измеренным» значениям поле восстанавливалось на контрольных уровнях 2 и 6 метров (рис. 1, 2).

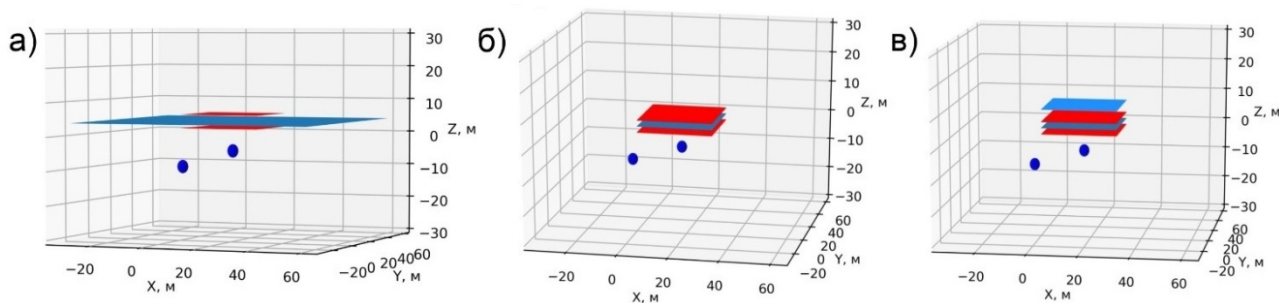


Рис. 1. Используемые синтетические модели:

шары – модельные тела, красные плоскости – контрольные уровни, синие плоскости – уровни задания поля; а) большая площадь задания поля; б) сильно ограниченная площадь задания поля; в) два уровня задания поля

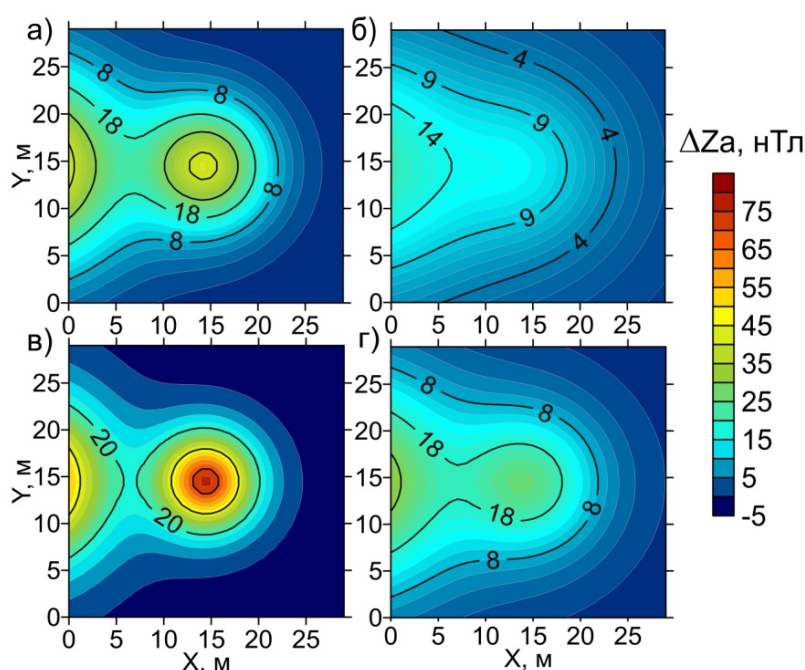


Рис. 2. Используемые модельные поля на разных высотах:
исходные («измеренные») поля:

а), б) – на высотах 4м и 10 м соответственно; аналитически продолженные поля:
в), г) – на высотах 2м и 6 м соответственно

Для контроля точности восстановления поля мы использовали функцию невязки между аналитически восстановленным и модельным полем с нормировкой на максимальное значение поля соответствующего уровня. Из рис. 3 видно, что восстановление поля в точках задания («измерения») производится с точностью одного порядка вне зависимости от размера площади задания исходного поля. В целом невязка полей не превышает значений 0,005 от максимума аномалии, а нормированное СКО менее 0,001. Наибольшие значения ошибки приходятся на области положительных экстремумов поля, что указывает на возможность

уменьшения невязки с помощью увеличения детальности сетки аппроксимирующих источников поля.

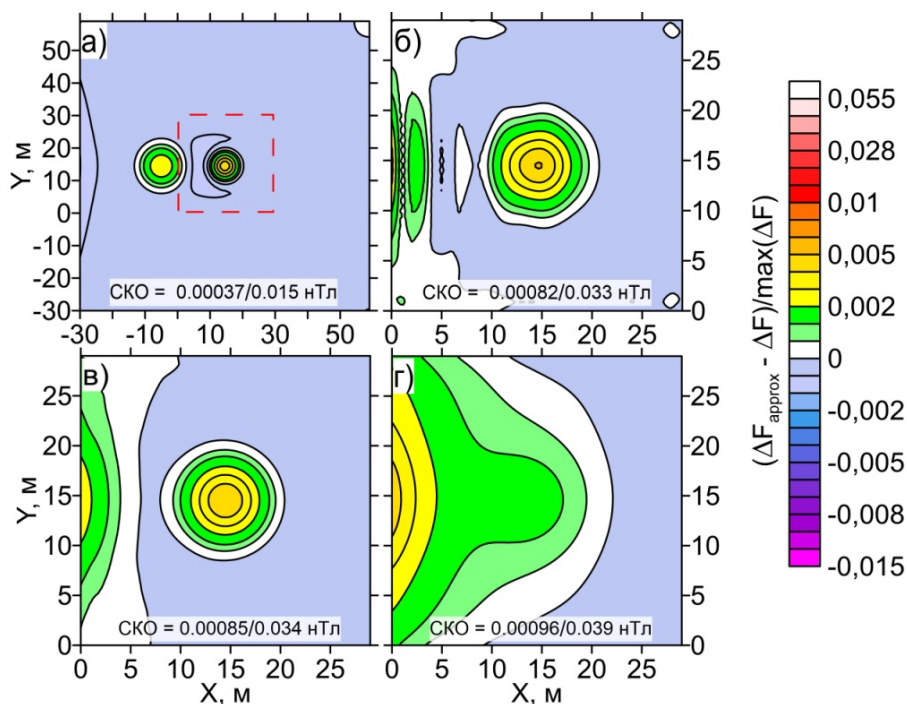


Рис. 3. Нормированная невязка

аппроксимированного и модельного полей на заданных уровнях:

а), б), в) – на высоте 4 м; *г)* – на высоте 10 м): *а)* – задание на большой площади; красной пунктирной линией околнурена «ограниченная площадь» рис. *б), в), г)*; *б)* – задание на ограниченной площади; *в), г)* – задание на двух уровнях ограниченной площади

Очевидно, чем выше точность аналитического продолжения поля, тем выше точность восстановления параметров модели его источников. Для исследования точности аналитического продолжения поля мы рассчитали поля на уровнях 2 и 6 м, отличных от уровней исходных данных. Невязки восстановленного и модельного полей при различных по площади областях задания исходных данных приведены на рис. 4.

Восстановление поля с использованием большой площади задания исходного поля (рис. 4, *а, г*) обеспечивает точность восстановления поля на контрольных уровнях, сопоставимую с точностью восстановления в исходных точках (см. рис. 3). При задании поля на одноуровневой и сильно ограниченной поверхности результат значительно (по максимальным отклонениям – в 4-7 раз) хуже (рис. 4, *б, д*). По нормированной невязке видно, что основной вклад в ошибку обусловлен внешним источником, особенно хорошо это заметно на рис. 4, *б*. Использование второго уровня измерения поля (на ограниченной площади с высотой измерения 10 м) позволило получить точность восстановления, близкую к случаю большой площади измерений (рис. 4, *в, е*).

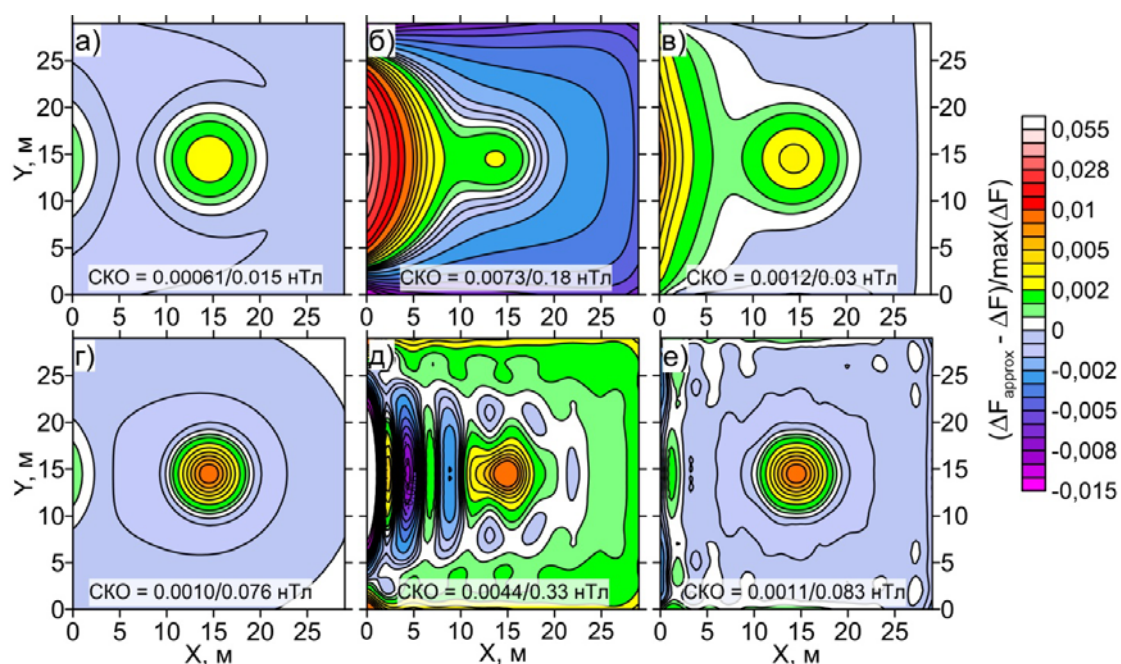


Рис. 4. Нормированная невязка

аппроксимированного и модельного полей на контрольных уровнях:

а), б), в) – на высоте 6 м; г), д), е) – на высоте 2 м): а) – г) – большая площадь задания; б) – д) – ограниченная площадь задания; в) – е) два уровня задания поля

Таким образом, исследуемый алгоритм не позволяет адекватно восстановить влияние внешнего источника при использовании одноуровневых данных на ограниченной площади, даже если поле на нем задано с высокой точностью (как в синтетической модели).

Проявление данного эффекта обуславливает необходимость задания исходного поля на бесконечной плоскости, заложенную в теории метода. В противном случае, при наличии источников интенсивного поля, находящихся вне рассматриваемой области, несмотря на хорошую точность восстановления в исходных точках (точках измерения), алгоритм аппроксимации может давать аналитическую модель поля, значительно отличающуюся от истинной. Очевидно, что это связано с недостатком информации для построения адекватного аналитического представления.

Как показали наши модельные расчеты, эту информацию можно ввести в алгоритм не только через расширение площади исходных данных (что дает информацию о внешних источниках непосредственно), но также через добавление уровней измерений, данных на другой высоте. Так вводится дополнительная информация о затухании поля с высотой и расстоянием, повышая адекватность аппроксимации заданного поля.

С помощью обсуждаемого алгоритма была проведена инверсия результатов наземной магнитной съемки, выполненной на памятнике «Усть-Тартасские курганы» (Венгеровский район Новосибирской области). Съемка производилась квантовым магнитометром на двух уровнях – 0,4 и 1,15 м, шаг измерений по профилю составлял 3–5 см, а между профилями – 0,5 м. Профильные изме-

рения были осреднены с радиусом осреднения 0,1 м. Аналитическая модель поля аппроксимирует измеренные значения поля с высокой точностью на обоих уровнях съемки (СКО = 0,1 нТл), что говорит о высоком качестве измерений (рис. 5). Применение метода DEXP позволило локализовать по глубине источники магнитных аномалий. Результаты инверсии приведены на рис. 6.

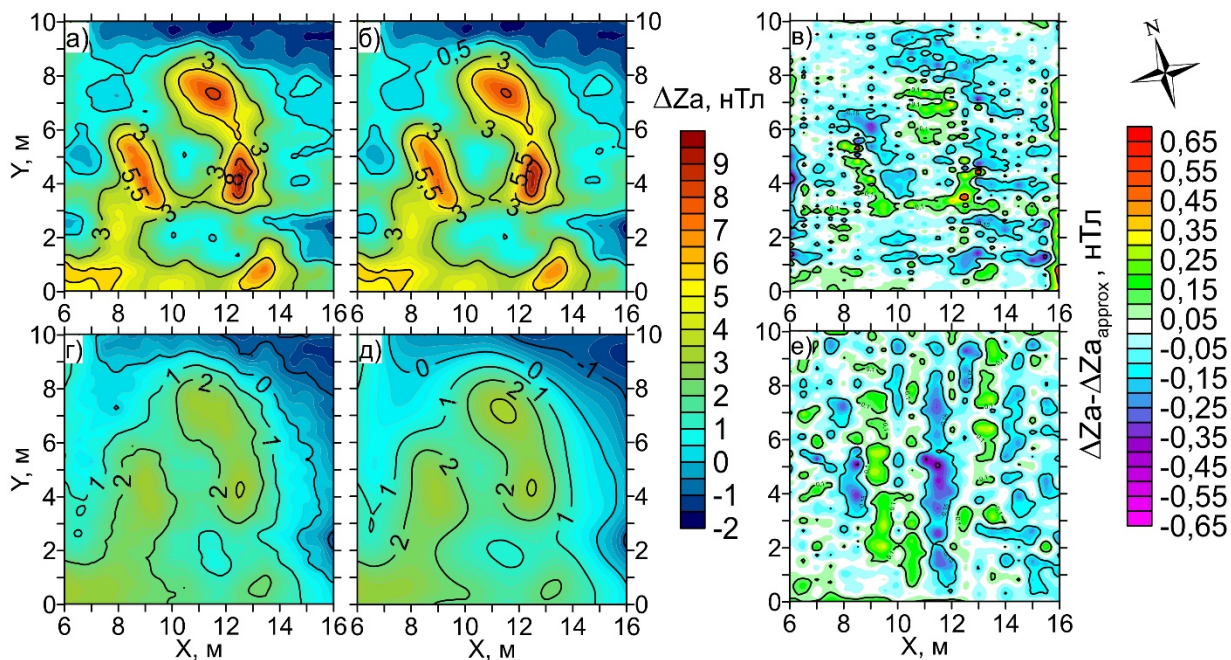


Рис. 5. Разноуровневые измеренные поля (а, г), их аналитические представления (б, д), невязки измеренных и аналитических полей (в, е): а), б), в) – высота 0.4 м; г), д), е) – высота 1.15 м

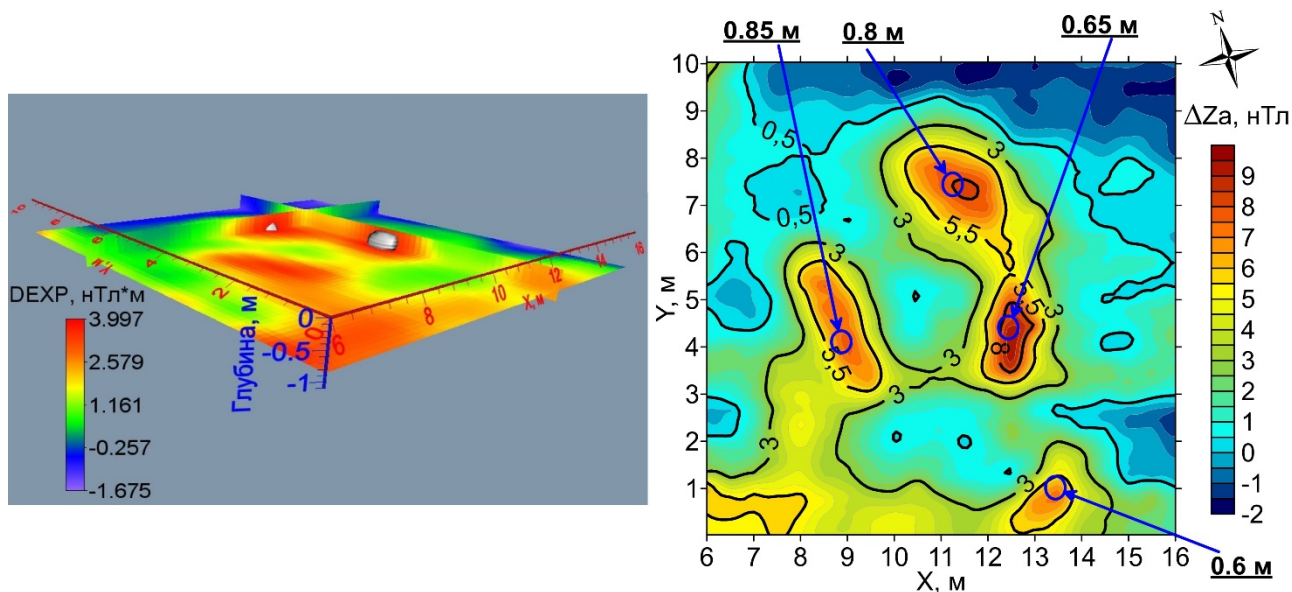


Рис. 6. Восстановленные особые точки поля и их глубины: на левом рисунке серым показаны обнаруженные особые точки; на правом рисунке синими окружностями обозначены полученные особые точки, в выносках подписаны их глубины

Полученные оценки глубин совпадают с данными, полученными после археологических раскопок с точностью порядка 5 см.

Таким образом, ограниченность площади измерений может оказывать существенное влияние на точность аналитической модели данных, полученной методом S-аппроксимации. Применение разноуровневой съемки позволяет экономично и эффективно минимизировать эффекты ограниченной площади, аппроксимировать поля на требуемых уровнях с заданной точностью и обеспечить адекватную инверсию поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-29-04319 офи м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fedi M. DEXP: a fast method to determine the depth to the sources of potential fields // Geophysics. – 2005 Vol. 72(1). – 12 s.
2. Оценка глубин источников магнитных аномалий на археологическом памятнике Алтынказган (Казахстан) методом DEXP / Е.И. Есин, Е.С. Богданов, А.Н. Василевский, А.Е. Астафьев, Л.В. Цибизов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 6 т. (Новос-бирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 3. – С. 116-123.
3. Страхов В.Н. О решении линейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 311. – № 3. – С. 586-590.
4. Страхов В.Н., Степанова И.Э. Аналитические аппроксимации элементов потенциальных полей методом интегральных представлений на основе интегральной формулы теории гармонических функций // Основные проблемы теории интерпретации гравитационных и магнитных полей: сб. науч. трудов. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – С.234–258.
5. Страхов В. Н., Степанова И. Э. Метод S-аппроксимаций и его использование при решении задач гравиметрии (локальный вариант) // Физика Земли. – 2002. – №. 2. – С. 3-19.
6. Степанова И. Э. Результаты опробования компьютерных технологий S-аппроксимации на материалах детальной гравиметрической и магнитотермических съемок // Физика Земли. – 2004. – №. 6. – С. 88-96.
7. Степанова И.Э., Раевский Д.Н., Щепетиллов А.В. Об интерпретации больших объемов данных гравимагниторазведки с помощью модифицированного метода S-аппроксимаций // Физика Земли. — 2017. — № 1. — С. 123–137.
8. Исследование метода s-аппроксимации для различных типов рельефа земной поверхности / И.А. Керимов, И.Э. Степанова, Д.Н. Раевский, А.В. Щепетиллов // Геология и геофизика Юга России. — 2018. — № 4. — С. 75–91

© Е. И. Есин, А. Н. Василевский, Н. Д. Евменов, 2019