

О ФИЛЬТРАЦИИ МАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ГЛУБИНЕ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОДОЛЖЕНИЯ В ПОЛЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

О.А. Черная, Ю.И. Дубовенко

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, Киев 03680, Украина,
e-mail: oksana_chornaya@mail.ru, nemishayeva@ukr.net*

В статье рассматривается методика для интерпретации и уточнения положения археологических объектов с помощью метода фильтрации в эквивалентном слое. Задача состоит в том, чтобы выделить все необходимые аномалии, включая аномалии малой амплитуды, в чистом виде и представить их в наглядной форме. С этой целью произведены исключение регионального фона и фильтрация помех. Использовано аналитическое продолжение вверх как способ разделения источников на различных глубинах. Предложен алгоритм восстановления потенциального поля по распределению эквивалентных источников: исключение регионального фона; нахождение разностного поля остаточных аномалий; вычисление намагниченности от слоя эквивалентных источников; фильтрация аномалий. Сделано допущение, что данные грави- и магнитного поля не содержат явно информации о глубине источников и что наблюдаемое магнитное поле является суммой регионального поля, остаточного поля и обобщённого шума. Использован набор взаимно не коррелируемых распределений тонкослоистых источников на разных глубинах для моделирования поля. На основе анализа магнитных данных осуществлён пересчёт вверх магнитных аномалий с целью их археологического истолкования. В результате аналитического продолжения аномалии разделены по глубинности источников. По рассчитанному полю от источников в эквивалентном слое определены контуры аномалий. Дополнительный расчёт горизонтального градиента магнитной индукции дал возможность уточнить классификацию локальных аномалий по амплитуде. Результаты интерпретации имеют качественный характер, но их использование дало возможность локализовать места раскопок.

Ключевые слова: археология, магнитометрия, аналитическое продолжение, тонкослоистая среда, эквивалентные источники.

Актуальность задачи. Неразрушающим методам изучения археологических объектов, в том числе геофизическим, нет альтернативы при обнаружении археологических объектов, установлении структуры без их вскрытия. Наличие геофизических аномалий обусловлено контрастом физических свойств грунтов и искомым объектам (намагниченности в случае с магнитной съёмкой). Малоглубинная геофизика хорошо зарекомендовала себя при археологических исследованиях в силу высокой стабильности результатов. Вариации содержания магнитных минералов на несколько процентов могут в несколько раз и порядков изменить намагниченность грунта и создать заметную аномалию магнитного поля. Магнитная съёмка многих поселений эпохи бронзы на Южном Урале (“Аркаим”, “Каменный Амбар”, “Сарым-Саклы”, “Воровская Яма”) [1, 2, 7, 8, 12], трипольского поселения в Украине (“Глыбочок”) [3] хорошо зарекомендовала себя при картировании фортификаций и интерьера городищ, поскольку магнитные свойства обожжённых глин и других грунтов в культурном слое повышены по сравнению с магнитными свойствами окружающих почв.

Магнитометрическая съёмка археологических объектов выполняется обычно по сети от 1×1 м до

4×4 м в пределах планшетов размером от 50×50 м до 100×100 м. В каждой точке наблюдений измеряется модуль магнитной индукции B геомагнитного поля. Точность отсчета применяемых для археологических исследований протонных и квантовых магнитометров не превышает $\pm 1-2$ нТл, среднеквадратическая погрешность съёмки не превосходит величину $\varepsilon = (2-5)$ нТл. Минимальная амплитуда уверенно выделяемых локальных магнитных аномалий $A_{\min} = 3\varepsilon$, т. е. 6–12 нТл [3].

Чтобы надёжно воссоздать строение археологического объекта, нужно решить обратную задачу магнитометрии. Однако ввиду некорректности обратной задачи интерпретация полученных материалов оказывается неоднозначной. Особенно неблагоприятны для изучения среды с малыми по сравнению с глубиной залегания геометрически размерами (большое влияние принципа эквивалентности) и контрастными электромагнитными свойствами (экранные эффекты). Дополнительные трудности связаны с техническими, природными и геологическими помехами. Выделение на их фоне полезных аномалий требует применения специальной аппаратуры с высокой помехозащищённостью и накоплением сигналов, а также статистических способов обработки информации [5].

На стадии первичной обработки магнитометрических данных необходимо выполнить процедуру уравнивания системы планшетов, т. е. привести магнитное поле участка съёмки к единому уровню [4]. Уравнённое таким образом магнитное поле представим суммой трёх составляющих:

$$B(x) = A(x) + R(x) + P(x),$$

где $A(x)$ – локальные аномалии от археологических объектов; $R(x)$ – региональное поле геологической природы; $P(x)$ – аномалии-помехи в результатах наблюдений, связанные с погрешностью магнитометров, недоучётом короткопериодических вариаций магнитного поля, наличием магнитных неоднородностей в верхнем слое почвы и археологических объектов. Наблюденное магнитное поле, в котором проявляются одновременно все типы аномалий, имеет сложный характер и малоприспособно для уверенного выделения археологических объектов.

Задача состоит в том, чтобы выделить все искомые аномалии (в том числе мелкие) в чистом виде и представить их в наглядной форме. Для этого нужно выполнить две процедуры: снятие (исключение) регионального фона и фильтрацию помех.

Выделение локальных аномалий. Для разделения региональных и локальных аномалий могут быть использованы различные методы:

- 1) усреднение наблюденного поля;
- 2) вычисление вариаций магнитного поля по методу Б. Андреева;
- 3) корреляционный метод: определение и исключение тренда (линейного/нелинейного регионального поля);
- 4) аналитическое продолжение аномалий в верхнее полупространство и вычисление остаточных аномалий;
- 5) выделение регионального поля с помощью фильтров, подавляющих локальные аномалии и помехи.

Подобные преобразования (трансформации) выполняют как по площади, так и по профилям. При выборе площадного или профильного варианта трансформаций учитывают особенности фона помех. Каждый из упомянутых методов имеет и преимущества, и недостатки. В работе [3] произведена количественная характеристика различных методов выделения локальных магнитных аномалий. При сравнении всех полученных результатов установлено, что метод выделения локальных аномалий, основанный на тренд-анализе исходных данных, выгодно отличается от других рассмотренных методов и его можно рекомендовать как лучшее средство разделения локальных и региональных аномалий при обработке материалов магнитометрических съёмок археологических объектов. Недостатком же корреляционного мето-

да является то, что в процессе расчета локальных аномалий фильтрации помех не происходит. Поэтому следующая задача обработки состоит в том, чтобы подавить помехи, максимально сохранив полезные аномалии. Отмечено также, что приемлемые результаты можно получить на основе пересчета наблюденного поля в верхнее полупространство или путем применения энергетического фильтра. При пересчете вверх методом аналитического продолжения аномалий в верхнее полупространство узкие крутые локальные аномалии и помехи быстро затухают. На наш взгляд, это неоспоримое преимущество данного метода. Плавные широкие региональные аномалии с небольшим градиентом поля уменьшаются с высотой значительно более медленно, в связи с чем на некоторой высоте H над уровнем наблюдений сохраняется главным образом региональная компонента поля, хотя и несколько ослабленная.

Нами изучена возможность использования фильтрации с помощью аналитического продолжения в верхнее полупространство в качестве способа разделения возмущающих источников на различных глубинах [11]. Сделаны допущения об упрощённом рассмотрении геологической среды. Прежде всего следует иметь в виду, что гравитные и магнитные данные не содержат явно информации о глубине залегания источников аномалий.

В результате решения соответствующей прямой задачи всегда можно создать любую модель наблюденного поля по распределению значений намагниченности (или плотности) на поверхности измерений. Однако такое формальное математическое решение лишь в исключительных случаях будет иметь геологически значимое содержание. Исходя из этого, в качестве модели среды использовано семейство взаимно не коррелируемых распределений тонкослоистых источников с целью решения прямой задачи – вычисления модели поля. Следствие решения – эквивалентный набор шаблонов полезного сигнала. Такой приём означает, что поля, вычисленные для разных значений глубин источников, имеют нулевую корреляцию. Данное условие не столь строгое, как кажется, поскольку множество распределений неоднородности во вмещающей среде, вообще говоря, может иметь как положительную, так и отрицательную корреляцию. Поэтому допущение о нулевой корреляции – частный случай нейтрального распределения. В физическом смысле подобные распределения представляют собой слои с эквивалентными источниками, и к их обработке можно привлечь соответствующие методы фильтрации по эквивалентным источникам.

Модификация метода исследования. Предлагается следующий алгоритм восстановления потенциального поля по эквивалентному распределению источников.

1. Извлечение регионального фона от источников, находящихся на глубине h_0 , путём аналитического продолжения наблюдаемого поля на высоту $2h_0$ по известным соотношениям. В спектральной области оптимальный фильтр для такой операции

$$F_r(x) = e^{(-2x \cdot h_0)}$$

легко реализуется в среде MatLab 2011.

2. Нахождение разностного поля остаточных аномалий путём извлечения регионального поля из полного магнитного поля (легко осуществимо в среде Origin 9).
3. Вычисление намагниченности в заданной области от слоя эквивалентных источников, расположенного между глубинами h_1 и h_2 , путём нахождения разницы операторов аналитического продолжения вверх на высотах $2h_1$ и $2h_2$ (вычисление разности от пересчёта вверх сдвоенных значений соответствующих глубин), в спектральной области оптимальный фильтр для такой операции:

$$F_{st}(x) = e^{(-2xh_1)} - e^{(-2xh_2)}.$$

4. Фильтрация аномалий. Аномалии, имеющие источник внутри слоя эквивалентных источников, выделяются более рельефно после фильтрации (исполненной в программе Cooper's SignProc 1.56).

Следует учитывать, что в слабоградиентном мозаичном поле, осложнённом резкими структурными несогласиями, определённость в зависимости аномалия – глубина теряется. Рекомендуем использовать альтернативные методы фильтрации (гармонический анализ [13], фильтры Винера [6]).

Пример обработки экспериментальных данных.

Изложенный выше способ качественной фильтрации магнитных аномалий применим к обработке данных полного магнитного поля, полученных при детальном исследовании археологического объекта в Pineview парке (США). Исходные данные взяты из репозитория www.ngdc.noaa.gov.

Здесь реализован поэтапный пересчёт аномалий полного магнитного поля вверх на высоты 0,5; 1,5; 2 и 4 м соответственно (рис. 1) на равнинном участке территории парка 30×80 м (горизонтальный масштаб – в метрах, магнитная индукция – в нанотесла, контуры изолиний проведены через 25 нТл). Пересчёт осуществляет-

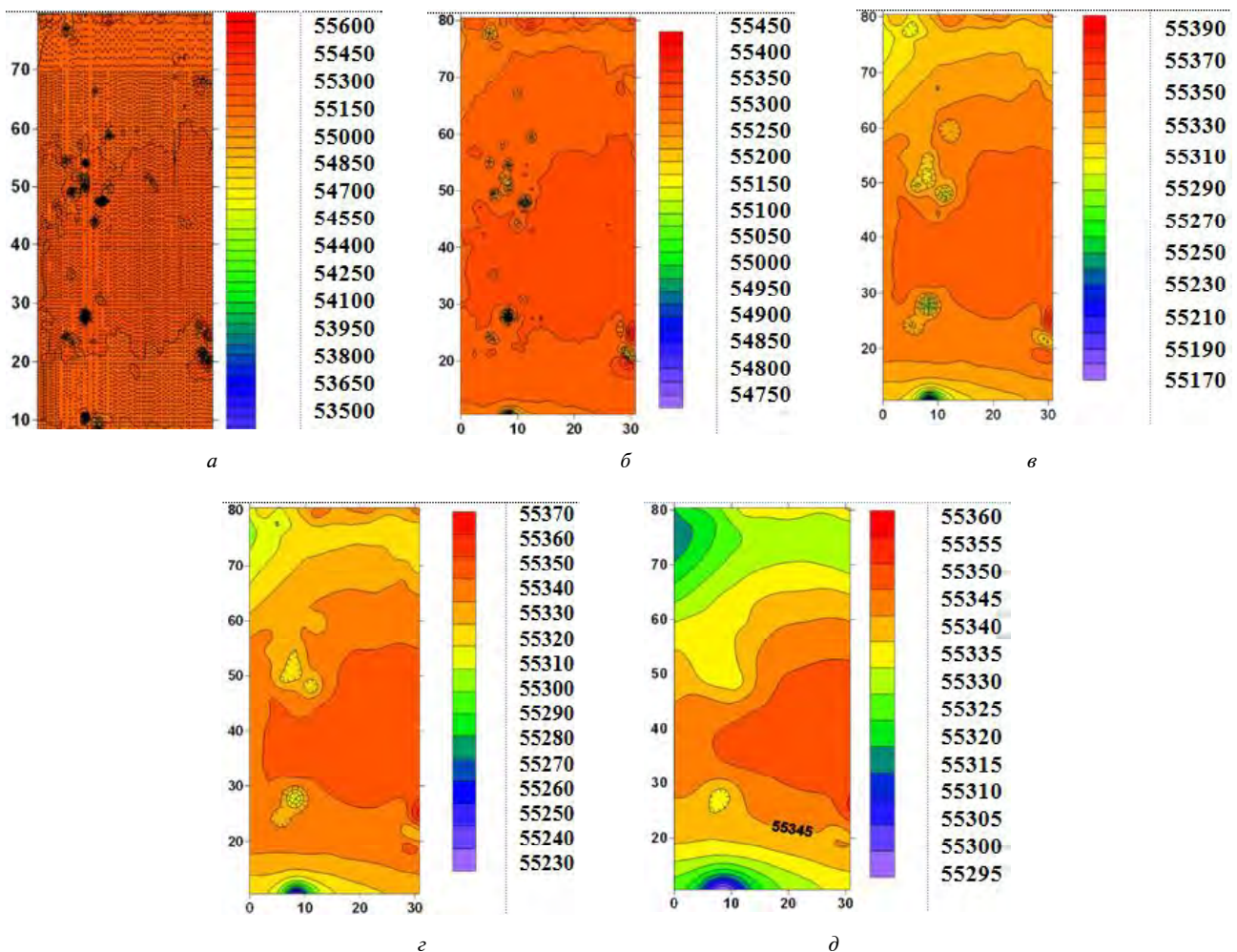


Рис. 1. Поэтапный перерасчет аномалии полного магнитного поля: а – исходные данные (аномалия ΔT , нТл); результаты продолжения поля вверх: б – на 0,5; в – на 1,5; г – на 2; д – на 4 м

ся с целью подавить коротковолновой шум и выделить локальные аномалии.

Черные точки на рис. 1, *а* обозначают расположение пунктов измерений с магнитометром. При этом на рис. 1, *б–д* нижний край участка обрезан вследствие высокоградиентного шума (близость к металлической ограде, удалено из анализа), а также исключены (пропущенные точки) некоторые наблюдения на профилях ввиду низкого качества. Повторить наблюдения невозможно в силу изменения технологических условий (раскопы, обводнение и т. п.). Даже в период измерений многие аномалии из интересующего нас метрового диапазона попали в проблемные по условиям измерений зоны.

Магнитные аномалии рассчитаны от слоя эквивалентных источников в SignProc 1.56 [9, 10] путём дифференцирования, продлённого на соответствующий уровень магнитного поля между уровнями 0,5–1,5; 1–2 и 2–4 м (рис. 2). Слои заданных источников априори содержат коррелируемые решения. Краткий качественный анализ полученного поля позволяет предположить, что с точки зрения планируемых раскопок наибольший интерес представляют аномалии с центрами в координатах (по сети участка) $(x, y) = (8, 50); (8, 28); (30, 22)$. Эти три аномалии либо содержат заметное количество магнитного материала возле поверхности (2–4 м), либо вызваны возмущающими телами, расположенными на значительной глубине (17–20 м под поверхностью).

Обсуждение и анализ результатов. Качественный анализ исходного поля (см. рис. 1, *а*) и его трансформаций (рис. 1, *б–д*) подтвердил, что в общем случае продолжение вверх на величину, равную шагу по профилю (0,5 м), не даёт значительной “прибавки” в разрешении, но иногда существенно снижает высокочастотный (коротковолновой) шум.

Наложение сети точек наблюдений (рис. 1) на те же точки значений магнитного поля (рис. 2, *в*), полученных при расчёте прямого эффекта от слоя эквивалентных источников на интервале глубин 1–2 м (рис. 3), показало, что следует с крайней осторожностью трактовать две значительные аномалии на западном краю участка карты. Хотя большинство точек наблюдений и подтверждает фиксирование этих аномалий, качественный анализ указывает на высокую вероятность глубинного происхождения аномальных источников. К тому же, они сильно коррелируют с профилями наблюдений, на которых исключено много (15 %) наблюдений с повышенным шумом.

Последующее наложение значений магнитного поля, рассчитанных на том же интервале глубин 1–2 м расположения слоя эквивалентных источников, но с большей детальностью (рис. 3, *б*, контур через 2 нТл), подтверждает предыдущий вывод. Здесь точки характеризуют максимальные значения горизонтального градиента поля. По их расположению можно качественно оценить положение границ возмущающих тел ниже поверхности наблюдений. В данном случае особенности поля возле северного края карты менее выражены сожатым контуром и подчеркнуты значительным горизонтальным градиентом магнитного поля. Это означает меньшую вероятность содержательного истолкования (сомнительные источники).

Альтернативные исследования. В работе [12] исследована возможность восстановления модели магнитных свойств ниже поверхности наблюдений на основе решения обратной задачи магнитометрии с помощью адаптивного метода Кочнева (в программе ADGM-3D). Авторами успешно восстановлена послойная магнитная восприимчивость для модели из 3 слоёв. Эту методику можно рекомендовать для параллельного контроля вычислений.

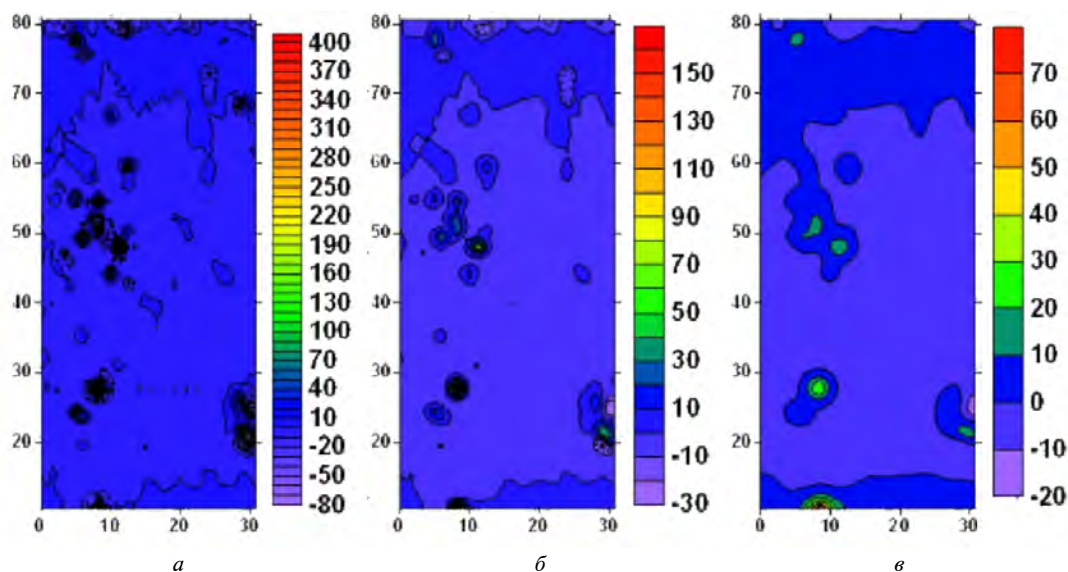


Рис. 2. Магнитные аномалии, рассчитанные от слоя эквивалентных источников в слоях: *а* – 0,5–1,5, *б* – 1–2; *в* – 2–4 м

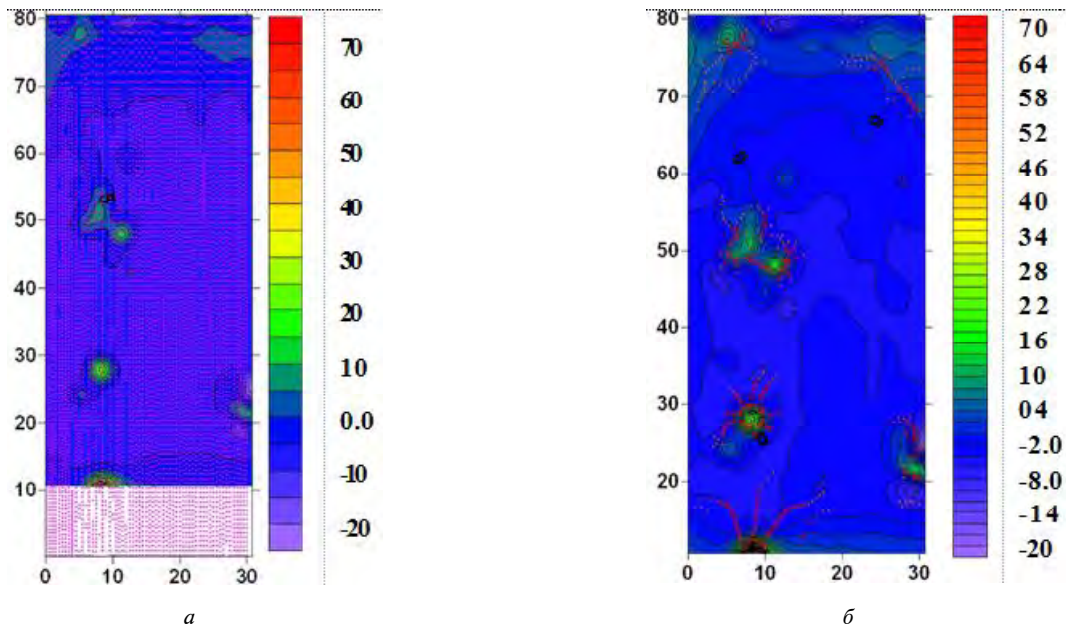


Рис. 3. Расчет магнитных аномалий: *а* – наложение сети наблюдений исходного магнитного поля на результат его трансформации в поле эквивалентных источников; *б* – поле эквивалентных источников с повышенной детальностью

Детальное исследование [3] обосновывает методику восстановления магнитных свойств приповерхностных объектов геологической среды по данным магнитометрии (модуля магнитной индукции V геомагнитного поля). В статье [3] исследованы различные методы разделения аномалий (усреднение; вычисление вариаций; исключение регионального фона; аналитическое продолжение вверх и вычисление остаточных аномалий; фильтрация регионального фона). Количественная характеристика этих методов локализации магнитных аномалий позволяет установить, что наиболее предпочтителен корреляционный метод выделения локальных аномалий, основанный на тренд-анализе исходных данных. Он наименее подвержен погрешностям и рекомендован [3] как лучшее средство разделения локальных и региональных аномалий при обработке материалов магнитометрических съёмок археологических объектов.

Особый интерес представляет приём, описанный в статье [3], который используется для оценки достоверности (надёжности) выявленных аномалий – метод обратной (условной) вероятности. Сущность метода состоит в том, что выделенные локальные аномалии, осложнённые помехами, сравнивают с условно принятым сигналом заданной формы. Это может быть кривая, представленная 5–7 точками наблюдений, имеющая 1 максимум (объект небольших горизонтальных размеров), 2 максимума (широкий объект), знакопеременная или другой формы. Чем лучше ряд значений поля локальных аномалий в расчётном интервале отвечает форме заданной кривой, тем выше вероятность того, что отмеченная здесь аномалия соответствует искомой.

Так, вероятность наличия аномалии в данной точке профиля оценивается по формулам

$$V(i) = K(i)/(1 + K(i))100,$$

$$K(i) = \exp\left(-\frac{1}{2s} \sum_{k=-m}^{+m} A(k)^2\right) \exp\left(\frac{1}{s} \sum_{k=-m}^{+m} (B(i+k)A(k))\right),$$

где $K(i)$ – коэффициент правдоподобия; s – дисперсия помех; $B(i+k)$ – значения поля в точках расчетного интервала, равного $\pm m$ точек наблюдений; $A(k)$ – ординаты ожидаемой аномалии.

По этим формулам рассчитывают коэффициенты максимального правдоподобия по сравнению с эталонными аномалиями (рассчитанными от теоретических моделей). Надёжно выявленными считают аномалии с вероятностью более 50%. В нашем случае вероятность выделения “полезной” аномалии составляет 75–100%, а аномалии-помехи – не более 20%.

Выводы. Главным выводом относительно исследуемой проблемы является успешная апробация метода аналитического продолжения компонент магнитного поля в поле эквивалентных источников на примере данных для парка Pineview (30×80 м) в целях их археологического истолкования. Разделение аномалий произведено аналитическим продолжением вверх на разные уровни, а расчёт источников в эквивалентном слое – вычислением разностного поля от верхней и нижней аномальных границ источников. Дополнительная информация, использованная для качественного анализа, – расчёт горизонтального градиента магнитной индукции с целью уточнения классификации локальных аномалий по амплитуде. Эти преобразования можно дополнять расчётами других характеристик и фильтров, информативных в конкретных условиях применения.

Результаты интерпретации имеют качественный характер, но дали возможность локализовать

места раскопок, рассчитать параметры объектов (намагниченность, глубину залегания, контуры, степень сохранности) с помощью качественного анализа результата решения обратной задачи магнитометрии для однородных тонкослоистых сред.

1. *Возможности* синтеза геофизической и археологической информации при интерпретации результатов раскопок (на примере поселения бронзового века Каменный Амбар) / Н.А. Берсенева, А.В. Епимахов, В.В. Носкевич, Н.В. Федорова // *Вестник археологии, антропологии и этнографии*. – 2015. – № 1 (28). – С. 4–14.
2. *Геофизические* методы исследования археологических памятников Сарым-Саклы и Воровская Яма (Южный Урал) / Н.В. Федорова, В.В. Носкевич, В.С. Иванченко, А.С. Бебнев, А.В. Маликов // *Уральский геофизический вестник*. – 2013. – № 2 (22). – С. 46–53.
3. *Дудкин В.П.* Методы комплексной интерпретации магнитометрической съёмки археологических памятников [Электронный ресурс] / В.П. Дудкин, И.Н. Кошелев // *Восточноевропейский археологический журнал*. – 2002. – № 3(16). – Режим доступа: http://archaeology.kiev.ua/journal/030502/dudkin_koshelev.htm (дата обращения: 15.05.2015).
4. *Дудкин В.П.* Первинна обробка результатів магнітометричних спостережень на археологічних пам'ятках / В.П. Дудкін, М.І. Жарких, І.М. Кошелев // *АРОІКС*. – 1997. – Вип. 1. – С. 10–18.
5. *Манштейн А.К.* Малоглубинная геофизика: учеб. пособие / А.К. Манштейн. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. ун-та, 2002. – 136 с.
6. *Миненко В.П.* Обратные линейные задачи гравиметрии и магнитометрии с итерационными формулами аналогов фильтров Винера–Калмана // *Вестник Пермского университета. Сер. Геология*. – 2014. – № 2. – С. 48–58.
7. *Муравьев Л.А.* Результаты магнитометрических исследований археологических памятников эпохи бронзы на Южном Урале / Л.А. Муравьев, В.В. Носкевич, Н.В. Федорова // *Уральский геофизический вестник*. – 2009. – № 1(14). – С. 44–49.
8. *Носкевич В.В.* Геофизические исследования курганных археологических комплексов на Южном Урале / В.В. Носкевич, Н.В. Федорова, А.Г. Вдовин // *Геофизика*. – 2015. – № 2. – С. 23–30.
9. *Cooper G.R.J.* Fixed point inversion of geophysical data / G.R.J. Cooper // *Computer and Geosciences*. – 2002. – V. 28, iss. 7. – P. 799–808.
10. *Cooper G.R.J.* Gridding gravity data using an equivalent layer / G.R.J. Cooper // *Computer and Geosciences*. – 2000. – V. 26, iss. 2. – P. 227–233. – doi:10.1016/S0098-3004(99)00089-8 (Accessed 15.05.2015).
11. *Jacobsen B.H.* A case for upward continuation as a standard separation filter for potential–field maps / B.H. Jacobsen // *Geophysics*. – 1987. – V. 52, No. 8. – P. 1138–1148.
12. *Kochnev V.* The Experiment in Applying 3D Technology of Magnetic Fields Interpretation at the Archaeological Site “Arkaim” / V. Kochnev, G. Zdanovich, B. Punegov // *Enter the Past. The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage. CAA. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology: Proceedings of the 31st Conference, Vienna, April 2003. BAR Int. Series. Archaeopress*. – 2004. – V. 1227. – P. 64–71.
13. *Verbanac G.* On regional modeling of the main geomagnetic field / G. Verbanac // *Geofizika*. – 2007. – V. 24, No. 1. – P. 1–27.

Поступила в редакцию 12.06.2015 г.

ПРО ФІЛЬТРАЦІЮ МАГНІТНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ГЛИБИНОЮ АНАЛІТИЧНИМ ПРОДОВЖЕННЯМ У ПОЛІ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ДЖЕРЕЛ

О.А. Чорна, Ю.І. Дубовенко

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, Київ 03680, Україна,
e-mail: oksana_chornaya@mail.ru, nemishayeve@ukr.net

У статті розглянуто методику для інтерпретації і уточнення положення археологічних об'єктів за допомогою методу фільтрації в еквівалентному шарі. Завдання полягає в тому, щоби виділити усі необхідні аномалії, включаючи аномалії малої амплітуди, в чистому вигляді і представити їх у наочній формі. З цією метою зроблено виключення регіонального фону і фільтрацію перешкод. Використано аналітичне продовження вгору як спосіб розділення джерел на різних глибинах. Запропоновано алгоритм відновлення потенціального поля за розподілом еквівалентних джерел: виключення регіонального фону; знаходження різницевого поля залишкових аномалій; обчислення намагніченості від шару еквівалентних джерел; фільтрація аномалій. Зроблено припущення, що дані граві- і магнітного поля не містять явно інформації про глибину джерел і що спостережене магнітне поле є сумою регіонального поля, залишкового поля і узагальненого шуму. Використано набір взаємно не корельованих розподілів тонкошарових джерел на різних глибинах для моделювання поля. На підставі аналізу магнітних даних здійснено перерахунок угору магнітних аномалій з метою їх археологічного тлумачення. В результаті аналітичного продовження аномалії розділено за глибинами джерел. Розрахунок поля від джерел в еквівалентному шарі дав змогу визначити контури аномалій. За додатковим розрахунком горизонтального градієнта магнітної індукції уточнено класифікацію локальних аномалій за амплітудою. Результати інтерпретації мають якісний характер, але за ними можна локалізувати місця розкопів.

Ключові слова: археологія, магнітометрія, аналітичне продовження, тонкошарувате середовище, еквівалентні джерела.

ON FILTERING MAGNETIC SOURCES AT DEPTH, USING ANALYTIC CONTINUATION INTO THE FIELD OF EQUIVALENT SOURCES

O.A. Chornaya, Yu.I. Dubovenko

Institute of Geophysics NAS of Ukraine, 32 Palladin Ave., Kyiv 03680, Ukraine, email: oksana_chornaya@mail.ru, nemishayeve@ukr.net

Purpose. The paper considers the techniques and methods aimed at interpreting and specifying the location of the archaeological sites using the equivalent layer filtering approach. The task is to outline all the required anomalies (including small) per se and present them in a visual form. For this purpose, it is necessary to perform two procedures: remove the regional background and to filter noise.

Design/methodology/approach. We studied the possibility of using filtration by means of analytical continuation in the top half-space as a way of separating sources at various depths. We offer the following algorithm of restoring potential field by the equivalent distribution of sources: Elimination of the regional field, Estimation of the residual field anomalies, Calculation of the magnetization, Filtering the anomalies. There are a number of assumptions made, and one must keep in mind that magnetic and gravity data contain no inherent information about the depth of source and the observed magnetic field to be the sum of the regional field, the residual field, and aggregate noise. We also used assemblages of mutually uncorrelated thin source distributions at various depths to model the field as equivalent source layers.

Findings. Based on the analysis of the magnetic data survey acquired for a Pineview park of 30×80 m, we calculated upwards magnetic anomalies in order to perform their archaeological interpretation. An analytical continuation procedure allows us to divide the anomalies by the sources depths. Field calculation from the sources in an equivalent layer by means of calculating of the residual field from the anomalous sources boundaries allowed us to define the contours of the magnetic anomalies. Additional calculation of the horizontal gradient of magnetic induction allowed us to adjust the classification of local anomalies by the amplitude.

Practical value/implications. The conducted research proves the necessity to create a general database on processing archaeological objects of geological heritage (geosites) of Ukraine under a single state program. The research was also successful in testing a method for analytical extension of components of a magnetic field into the field of equivalent sources within the sample data for Pineview park (30×80 m) to do their archaeological interpretation. Additional information used for the qualitative analysis is the calculation of the horizontal gradient of the magnetic induction in order to specify the classification of the local anomalies by the amplitude. The transformations above one can be complemented with other filters. The results of the interpretation are of qualitative character, nevertheless they us allowed us to localize the location of excavations.

Keywords: archeology, magnetometry, analytical continuation, thin-layer environment, equivalent sources.

References:

1. Bersenyeva N.A., Yepimakhov A.V., Noskevich V.V., Fyodorova N.V. *Vozможnosti sinteza geofizicheskoy i arkhologicheskoy informatsii pri interpretatsii rezul'tatov raskopok (na primere poseleniya bronzovogo veka Kamenny Ambar)* [Capabilities of synthesizing geophysical and archaeological information in the interpretation of excavation results (by the example of the Bronze Age settlement of Kamenny Ambar)]. *Bulletin of archaeology, anthropology and ethnography*, 2015, no. 1(28), pp. 4-14.
2. Fedorova N.V., Noskevich V.V., Ivanchenko V.S., Bebnov A.S., Malikov A.V. *Geofizicheskie metody issledovaniya arkhologicheskikh pamyatnikov Sarym-Sakly i Vorovskaya Yama (Yuzhnyy Ural)* [Geophysical methods of research of archaeological monuments Sarym-Sakly and Vorovskaya Yama (southern Ural mountains)]. *Ural'skiy geofizicheskiiy vestnik*, 2013, no. 2 (22), pp. 46-53.
3. Dudkin V.P., Koshelev I.N. *Metody kompleksnoy interpretatsii magnetometricheskoy s'emki arkhologicheskikh pamyatnikov* [Complex interpretation of magnetometric survey of archaeological monuments]. *East-European archaeological journal*, 2002, no. 3(16). Available at: http://archaeology.kiev.ua/journal/030502/dudkin_koshelev.htm (Accessed 15 May 2015).
4. Dudkin V.P., Zharkyh M.I., Koshelev I.M. *Pervynna obrobka rezul'tativ magnetometrychnykh sposterezhen' na arheologichnykh pam'jatkah* [Preprocessing of results of magnetometric observations on the archaeological monuments]. *AROIKS*, 1997, issue 1, pp. 10-18.
5. Manshteyn A.K. *Maloglubinnaya geofizika* [Low-deep geophysics]. Novosibirsk, *Novosibirskiy gosudarstvennyy universitet*, 2002, 136 p.
6. Minenko V.P. *Obratnye lineynye zadachi gravimetrii i magnetometrii s iteratsionnymi formulami analogov fil'trov Vinera-Kalmana* [The Linear Inverse Problem of Gravimetry and Magnetometry with Iterative Formulas of Analogs of Wiener-Kalman Filters]. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2014, no. 2, pp.48-58.
7. Muraviev L.A., Noskevich V.V., Fedorova N.V. *Rezul'taty magnetometricheskikh issledovaniy arkhologicheskikh pamyatnikov epokhi bronzy na Yuzhnom Urale* [Magnetometric investigations results of South Urals' bronze age archaeological sites]. *Ural'skiy geofizicheskiiy vestnik*, 2009, no. 1(14), pp. 44-49.
8. Noskevich V.V., Fedorova N.V., Vdovin A.G. *Geofizicheskie issledovaniya kurgannykh arkhelo-gicheskikh kompleksov na Yuzhnom Urale* [Geophysical investigations of archaeological mound complexes on South Urals]. *Geofizika*, 2015, no. 2, pp. 23-30.
9. Cooper G.R.J. Fixed point inversion of geophysical data. *Computer and Geosciences*, vol. 28, issue 7, pp. 799-808.

10. Cooper G.R.J. Gridding gravity data using an equivalent layer. *Computer and Geosciences*, vol. 26, no. 2, 2000, pp. 227-233. doi:10.1016/S0098-3004(99)00089-8 (Accessed 15 May 2015).
11. Jacobsen J.F. A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps. *Geophysics*, 1987, vol. 52, no. 8, pp. 1138-1148.
12. Kochnev V., Zdanovich G., Punegov B. The Experiment in Applying 3D Technology of Magnetic Fields Interpretation at the Archaeological Site "Arkaim". Enter the Past. The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage. CAA. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology: Proceedings of the 31st Conference, Vienna, April 2003. *British Archaeological Reports International Series. Archaeopress*, 2004, vol.1227, pp. 64-71.
13. Verbanac G. On regional modeling of the main geomagnetic field. *Geofizika*, 2007, vol. 24, no. 1, pp. 1-27.

Received 12/06/2015