

Здесь K_Q – расчетный коэффициент, учитывающий размеры барабанного питателя и погонную нагрузку шихты на его барабане (задаваемая константа); $n_{бшт}$ – скорость барабанного питателя шихты; $\gamma_{ок}$ – требуемая влажность в окомкователе.

Программное обеспечение реализации представленных технологических расчётов супервизорного управления, реализованного на базе технологических моделей для проекта Укрگیпромеза аглофабрики Вазакхпатамского металлургического завода (Индия) выполнено с использованием базовых программных продуктов и технологий Apache, HTML, PHP, CSS, MySQL.

Список литературы

1. 02-3700-DE-ELI-1705. Control philosophi write-up of Sinter Plant-3at VSP (Vizakhapatnam) – Dnepropetrovsk: GP “Ukrгіprommez”. – 2012.
2. Вегман Е.Ф. Окускование руд и концентратов. – М. : Металлургия, 1984. – 256 с.
3. Степаненко А.Н., Гитлин Л.Д., Новицкий П.А. Пути повышения эффективности автоматического управления спеканием шихты на агломашине. - Металлургическая и горно-рудная промышленность, 2011, №2, с.111-114
4. Автоматизация металлургических печей. Каганов В.Ю., Блинов О.М., Глинков Г.М., Морозов В.А.- М.: Металлургия, 1975. – 376 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.
Надійшла до редакції 17.10.2012*

УДК 681.518.54

© Л.И. Мещеряков, О.Р. Денесюк

ИНФОРМАЦИОННОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ИЗМЕРЕННЫМ МАГНИТНЫМ АНОМАЛИЯМ

Представлено разработанное программное обеспечение определения намагниченности геологических объектов по измеренным магнитным аномалиям.

Представлено розроблене програмне забезпечення визначення намагніченості геологічних об'єктів по зміряних магнітних аномаліях.

The developed decision software is presented of magnetized of geological objects on the measured magnetic anomalies.

При интерпретации магнитных аномалий важно знать кроме измеренных значений магнитных аномалий Z_a или ΔT_a также значения намагниченностей горных пород, слагающих геологический разрез. От этого зависит достоверность и эффективность интерпретации аномалий. Один из методов определения намагниченностей горных пород, слагающих изучаемый геологический разрез, состоит в измерении их в лаборатории на образцах горных пород, отобранных из обнажений и скважин. Этот метод не всегда можно реализовать, так как для этого нужны ориентированные образцы, отбор которых из скважин представля-

ет большие трудности. Поэтому образцы из скважин часто отбирают неориентированные, и при этом в лучшем случае определяется только магнитная восприимчивость горных пород k и модуль вектора остаточной намагниченности породы J_n . Следовательно, величину и направление вектора суммарной намагниченности горной породы \vec{J} определить не удастся. В этом случае можно использовать измеренные магнитные аномалии. Определение намагниченности горных пород по создаваемым ими магнитным аномалиям представляет обратную линейную задачу магниторазведки. По Адамару задача поставлена корректно, если: решение задачи существует; решение задачи единственное; решение задачи устойчивое.

Для обратной задачи магниторазведки существование решения обычно не обсуждается, так как из физических соображений ясно, если существует магнитная аномалия, то существуют и создающие ее магнитные источники. Второе и третье условия корректности для обратной задачи не выполняются. Поэтому обратная линейная задача магниторазведки поставлена некорректно. Решения таких задач в связи с их некорректностью весьма сложны и неустойчивы даже в их линейной постановке. Общие положения теории решения некорректно поставленных линейных обратных задач изложены в работах А.Н Тихонова [1], В.И. Старостенко [2], В.Н. Страхова [3] и др.

В данной работе рассматривается решение задачи определения суммарной намагниченности $\vec{J}_i, i = \overline{1, N}$, двухмерных геологических объектов на разрезе, где N – количество этих объектов, если заданы формы их поперечных сечений, размеры и условия залегания, а также измеренные значения магнитной аномалии Z_{aj} или $\Delta T_{aj}, j = \overline{1, M}$, где M – количество точек измерений на профиле, если профиль проходит вкост простирания указанных объектов. Рассматриваются следующие варианты задачи: а) исходные значения поля Z_{aj} или ΔT_{aj} свободны от регионального фона; б) исходные значения поля Z_{aj} или ΔT_{aj} осложнены региональным фоном, близким к линейному; в) начальные приближенные значения намагниченности пород $\vec{J}_{0i}, i = \overline{1, N}$, заранее известны из априорных данных; г) начальные приближенные значения намагниченности горных пород не известны.

Следует отметить, что в такой общей постановке задача не имеет единственного решения. Это доказано в работах [4, 5-8 и др.]. Однако можно выделить классы тел, для которых единственность решения плоской обратной задачи магниторазведки в линейной постановке имеет место. Одним из таких классов являются тела с многоугольным сечением [2]. Если же факт единственности установлен, то применение регуляризирующих алгоритмов (при наличии даже погрешности во входных данных) гарантирует приближение к искомому решению, согласованному по точности с точностью входных данных.

Магнитные аномалии Z_{aj} или ΔT_{aj} в j -ой точке профиля можно вычислить по известным формулам [9]. Если измеренные на профиле значения магнитного поля осложнены фоном, близким к линейному, то для его ослабления

можно применить одну из известных трансформаций поля [9, 10]. Используем простейшую трансформацию поля, позволяющую избавиться от линейной составляющей регионального фона - вариацию Б.А. Андреева [11], которая вычисляется по формуле

$$\delta U(x_j, z_j) = U(x_j, z_j) - 0.5(U(x_{j+k}, z_{j+k}) + U(x_{j-k}, z_{j-k})), \quad (3)$$

где U – измеренная функция Z_a или ΔT_a ; $l = k \Delta x$ - параметр трансформации, рациональный выбор которого описан в работе [11], Δx - шаг точек по профилю. Формулу (5) можно переписать также в виде

$$\delta U(x_j, z_j) = U(x_j, z_j) - 0.5(U(x_j + l, z_{j+k}) + U(x_{j-l}, z_{j-k})). \quad (4)$$

Подставляя (1) и (2) в (6) и выполняя соответствующие преобразования, получим уравнения вида

$$\delta Z_{aj}(x_j, z_j) = \sum_{p=1}^{M/2} (J_x^p \delta V_{xzj}^p + J_z^p \delta V_{zzj}^p), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \delta \Delta T_{aj} = & \sum_{p=1}^{M/2} \{ J_x^p (\delta V_{xzj}^p \sin I_0 - \delta V_{zzj}^p \cos I_0 \cos A_0) + \\ & + J_z^p (\delta V_{zzj}^p \sin I_0 + \delta V_{xzj}^p \cos I_0 \cos A_0) \}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\delta Z_{aj}, \delta \Delta T_{aj}$ – значения вариаций поля Z_a и ΔT_a в j -ой точке профиля $\delta V_{xzj}^p, \delta V_{zzj}^p$ – значения вариаций вторых производных гравитационного потенциала V_{xzj}^p, V_{zzj}^p в j -ой точке профиля, обусловленные p телом разреза, которые вычисляются по формуле (4) после того, как вычислены V_{xzj}^p, V_{zzj}^p .

Записывая уравнения (5) и (6) для каждой j -ой точки профиля $j = \overline{1, N}$, и обозначая коэффициенты при J_x^p и J_z^p , соответственно, a_{1j}^p, b_{1j}^p и c_{1j}^p, d_{1j}^p , можно получить две системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\delta Z_{aj}(x_j, z_j) = \sum_{p=1}^{M/2} (J_x^p a_{1j}^p + J_z^p b_{1j}^p), \quad j = \overline{1, N}, \quad (7)$$

$$\delta \Delta T_{aj}(x_j, z_j) = \sum_{p=1}^{M/2} (J_x^p c_{1j}^p + J_z^p d_{1j}^p), \quad j = \overline{1, N}, \quad (8)$$

решение которых позволяет определить параметры $J_x^p, J_z^p, p = \overline{1, M/2}$ при наличии фона, близкого к линейному, в измеренных значениях поля Z_a или ΔT_a .

Таким образом, независимо от формы сечения двумерного тела, типа аномалии Z_a или ΔT_a и наличия регионального фона задача определения намагниченности тел, принадлежащих к классу единственности решения обратной линейной задачи магниторазведки, по заданному распределению поля и сечений тел сводится к решению переопределенной системы линейных алгебраических уравнений, которая в матричной форме записывается в виде

$$AJ = U, \quad (9)$$

где A – матрица коэффициентов размерности N на M , которые определяются типом исходной функции и способом аппроксимации тел, J – вектор искомых значений составляющих векторов намагниченности тел размерности M , а U – вектор значений исходной функции $Z_a, \Delta T_a, \delta Z_a$ или $\delta \Delta T_a$.

Особенность уравнения (9) состоит в том, что матрица A и правая часть системы U задано приближенно, т.е. $\|U - \bar{U}\| = \delta, \|A - \bar{A}\| = \delta_1$, где \bar{U} – точное значение поля, \bar{A} – точная матрица, δ и δ_1 – погрешности задания значений поля и элементов матрицы. Задача (9) представляет собой линейную обратную задачу магниторазведки и является некорректно поставленной, так как матрица системы A плохо обусловлена. В силу некорректной постановки задачи и наличия ошибок во входных данных, которые заранее неизвестны, решение системы уравнений обычными методами очень неустойчивое и может даже не существовать. Фундаментальным приемом решения подобных систем является метод регуляризации А.Н. Тихонова [1], который сводится к минимизации сглаживающего параметрического функционала

$$M^\alpha [J, U, A] = \|AJ - U\|^2 + \alpha \|J\|^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $\alpha = \alpha(\delta, \delta_1) > 0$ – параметр регуляризации, согласованный с погрешностями входных данных δ и δ_1 . Доказано [1], что решение обратной задачи является регуляризующим и позволяет по приближенно заданным входным данным A и U , и их погрешности $\eta = (\delta, \delta_1)$ построить такое решение J_η , что $\|J_\eta - \bar{J}\| \rightarrow 0$ при $\eta \rightarrow 0$, где \bar{J} – точное решение задачи. Таким образом, исходная задача (9) заменяется другой близкой (при малых α) к ней задачей (10). Сформулированная задача (10) позволяет находить устойчивое среднеквадратическое приближение к любым линейным системам типа (9), которые встречаются в геофизической практике.

В уравнении (10) норма $\|\cdot\|$ рассматривается в пространстве R_n и $\|J\|^2 = \sum_{i=1}^n J_i^2$, а $\|AJ - U\|^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (a_{ij} J_j - U_i)^2$, где i – количество уравнений в системе линейных алгебраических уравнений, а j – количество неизвестных величин в системе уравнений. В данном случае неизвестными являются составляющие векторов намагниченности J_x, J_z каждого из тел разреза. Учитывая определение нормы, функционал А.Н. Тихонова можно представить

$$M^\alpha = \left(\sum_{j=1}^m a_{1j} - U_1 \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^m a_{2j} - U_2 \right)^2 + \dots + \left(\sum_{j=1}^m a_{nj} - U_n \right)^2 + \alpha \sum_{j=1}^m J_j^2 \rightarrow \min$$

Чтобы найти вектор J , сообщающий минимум функционалу M^α нужно найти его производные по неизвестным параметрам $J_{xj}, J_{zj}, j = 1, m$, которые нумеруются подряд, т.е. $J_j, j = \overline{1, m}$, приравнять нулю каждую из полученных производных и решить систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M^\alpha}{\partial J_1} &= 2(a_{11}J_1 + \dots + a_{1m}J_m - U_1)a_{11} + 2(a_{21}J_1 + \dots + a_{2m}J_m - U_2)a_{21} + \dots \\
&\quad + 2(a_{n1}J_1 + \dots + a_{nm}J_m - U_n)a_{n1} + 2\alpha J_1 = 0 \\
\frac{\partial M^\alpha}{\partial J_2} &= 2(a_{11}J_1 + \dots + a_{1m}J_m - U_1)a_{12} + 2(a_{21}J_1 + \dots + a_{2m}J_m - U_2)a_{22} + \dots \\
&\quad + 2(a_{n1}J_1 + \dots + a_{nm}J_m - U_n)a_{n2} + 2\alpha J_2 = 0 \\
&\dots\dots\dots \\
\frac{\partial M^\alpha}{\partial J_m} &= 2(a_{11}J_1 + \dots + a_{1m}J_m - U_1)a_{1m} + 2(a_{21}J_1 + \dots + a_{2m}J_m - U_2)a_{2m} + \dots \\
&\quad + 2(a_{n1}J_1 + \dots + a_{nm}J_m - U_n)a_{nm} + 2\alpha J_m = 0
\end{aligned} \tag{11}$$

Сгруппировав слагаемые уравнений с одинаковыми неизвестными J_j и вынеся неизвестные за скобки, можно получить

$$\begin{aligned}
&(a_{11}a_{11} + a_{21}a_{21} + \dots + a_{n1}a_{n1} + \alpha)J_1 + (a_{12}a_{11} + a_{22}a_{21} + \dots + a_{n2}a_{n1})J_2 + \dots \\
&(a_{1m}a_{11} + a_{2m}a_{21} + \dots + a_{nm}a_{n1})J_m = U_1a_{11} + U_2a_{21} + \dots + U_na_{n1} \\
&(a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22} + \dots + a_{n1}a_{n2})J_1 + (a_{12}a_{12} + a_{22}a_{22} + \dots + a_{n2}a_{n2} + \alpha)J_2 + \dots \\
&(a_{1m}a_{12} + a_{2m}a_{22} + \dots + a_{nm}a_{n2})J_m = U_1a_{12} + U_2a_{22} + \dots + U_na_{n2} \\
&\dots\dots\dots \\
&(a_{11}a_{1m} + a_{21}a_{2m} + \dots + a_{n1}a_{nm})J_1 + (a_{12}a_{1m} + a_{22}a_{2m} + \dots + a_{n2}a_{nm} + \alpha)J_2 + \dots \\
&(a_{1m}a_{1m} + a_{2m}a_{2m} + \dots + a_{nm}a_{nm} + \alpha)J_m = U_1a_{1m} + U_2a_{2m} + \dots + U_na_{nm}
\end{aligned} \tag{12}$$

Это система уравнений, линейных относительно неизвестных $J_j, j = \overline{1, m}$, с симметричной матрицей. Она содержит m уравнений и m неизвестных. Следует отметить, что параметр регуляризации добавляется только к диагональным элементам матрицы системы уравнений. В матричной форме систему уравнений можно записать так:

$$(A^*A + \alpha E)J^\alpha = A^*U, \tag{13}$$

где A^* – транспонированная матрица A , а E – единичная матрица. Решение этой системы уравнений позволяет найти намагниченности $J_{xj}, J_{zj}, j = \overline{1, M/2}$, всех $M/2$ тел геологического разреза, создающих магнитную аномалию на профиле. Трудность в этом алгоритме представляет выбор параметра α . Его нельзя вычислить заранее, так как неизвестны ошибки входных данных δ и δ_1 . Поэтому минимизацию функционала выполняется на сетке значений параметра регуляризации α , которую строят в виде геометрической прогрессии $\alpha_s = \alpha_{s-1}\mu$ со знаменателем $\mu \in [0,1]$. Для каждого значения α_s находят свое решение J^{α_s} , которое сообщает минимум функционалу M^{α_s} . Таким образом, получается последовательность решений $\{J^{\alpha_s}\}, s \in [s_0, s_k]$. Из полученного множества решений выбирается оптимальное, которое является приближенным, но наиболее близким к истинному решению задачи J^* . Для выбора оптимального значения α и соответственно оптимального решения задачи А.Н.

Тихонов и В.Б. Гласко предложили эвристический метод выбора α по минимуму функции $\sigma(\alpha) = \left\| \alpha \frac{\partial U}{\partial \alpha} \right\|$, которую численно можно определить как

$$\sigma(\alpha_s) = \max \left| \alpha_s \frac{J_j^{\alpha_s} - J_j^{\alpha_{s-1}}}{\alpha_s - \alpha_{s-1}} \right|. \quad (14)$$

Квазиоптимальное значение параметра регуляризации выбирается по минимуму этой функции. Решение задачи, которое получено при этом значении параметра регуляризации принимается в качестве наилучшего приближенного решения задачи, т.е. $J_{ko}^\alpha = J^*$.

На поведение функции (14) влияют многие факторы: характер оператора A , уровень ошибок во входных данных δ и δ_1 . И функция имеет ряд минимумов, что затрудняет выбор квазиоптимального параметра регуляризации. Поэтому использовался и другой критерий. Численными экспериментами установлено, что при положительных значениях параметра регуляризации функция

$$\varphi(\alpha, \eta) = \lg \|AJ - U\|^2 \quad (15)$$

непрерывна и строго монотонно возрастает. Установлено также, что параметр α принимает квазиоптимальное значение, $\alpha = \alpha_{ko}$, в том случае, когда функция (17) имеет максимальную кривизну, т.е функция

$$K(\alpha, \eta) = \left| \varphi'' \right| / (1 + \varphi'^2)^{3/2} \quad (16)$$

достигает максимума.

Таким образом, находя экстремали J^{α_s} функционала А.Н. Тихонова на сетке значений параметра $\alpha_{s+1} = \alpha_s \mu$, $\mu \in [0,1]$, $s=0, 1, 2, \dots$ и каждый раз вычисляя $K(\alpha, \eta)$ в конечных разностях по формуле

$$K_s(\alpha, \eta) = \left| \varphi_{s-2} - 2\varphi_{s-1} + \varphi_s \right| / [1 + (\varphi_{s-2} - \varphi_s)^2 / 4]^{3/2}, \quad (17)$$

по ее максимуму можно определить α_{ko} и приближенное решение задачи.

На основании описанного алгоритма определения намагниченности двумерных геологических тел разработана программа на языке С# для программной платформы Microsoft .NET Framework 2.0. Программа предназначена для определения суммарной намагниченности геологических объектов на геологическом разрезе по измеренным на профиле, проходящем поперек простирания этих объектов, магнитным аномалиям Z_a и ΔT_a и известным форме, размерам и условиям залегания этих объектов. Количество точек на профиле, где заданы исходные значения поля до 200, количество геологических тел до 30, количество угловых точек на двумерных сечениях тел до 2000. Эти ограничения не существенны и при необходимости могут быть изменены. При определении намагниченности двумерных геологических объектов предполагается, что намагниченность объекта однородна ($\vec{J} = const$).

Испытание программы при решении практической задачи определения намагниченностей комплексов горных пород на реальном геологическом разрезе по аномалии Z_a было выполнено по данным магнитной съемки на Теплов-

ском участке Верховцевской структуры Среднего Приднепровья, представленной картой магнитных аномалий в масштабе 1:50000. При этом выбран профиль, пересекающий Тепловскую магнитную аномалию вкост ее простираения. Значения поля сняты с карты в точках профиля, поэтому они осложнены не только ошибками измерений, но и достаточно большими ошибками интерпретации, которые возникают при снятии значений аномалии Z_a с карты. Стрoение геологического разреза взято по одному из вариантов интерпретации магнитной аномалии по профилю. На рисунках приведены результаты работы программы при решении практической задачи.

Сравнение полученных значений намагниченности пород соответствует основным известным комплексам пород данного региона (диабазо-спилитовой, ультрабазитовой, кератофило-сланцевой, джеспилитовой, метабазито-сланцевой формаций) и показывает достаточно хорошее соответствие данным о физических свойствах пород для каждого комплекса. Таким образом, с одной стороны, можно сказать, что геологическая гипотеза о строении данного района, представленная в виде построенного разреза, не противоречит наблюдаемому магнитному полю. А с другой стороны, в рамках принятой модели строения этого района, магнитные свойства пород были уточнены, что дает геологам информацию для дальнейших исследований. В результате, даже при достаточно высоком уровне погрешностей в исходных данных, когда значения аномального поля были сняты с карты, и сложном характере разреза, содержащем значительное количество тел, описывающих его, и сложной конфигурации самого разреза решение имело устойчивый характер, а предложенный критерий позволил уверенно выбрать оптимальное решение.

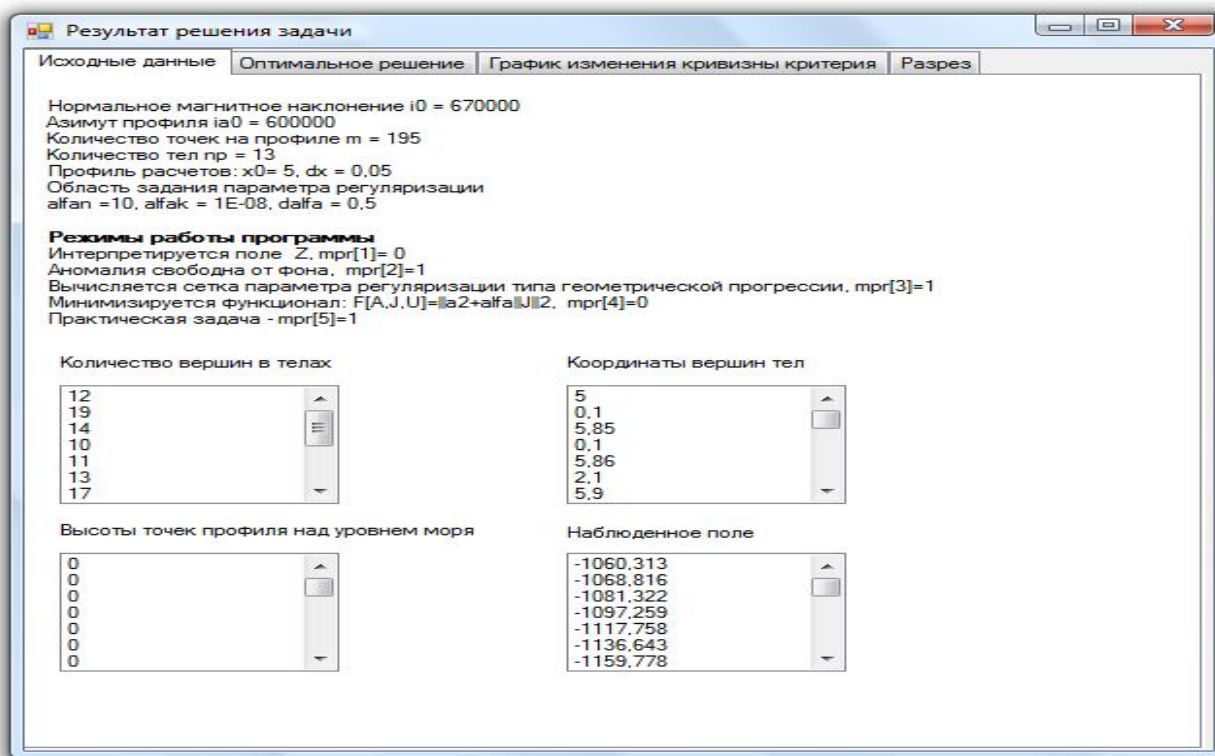


Рис. 1. Вкладка «Исходные данные» (практическая задача)

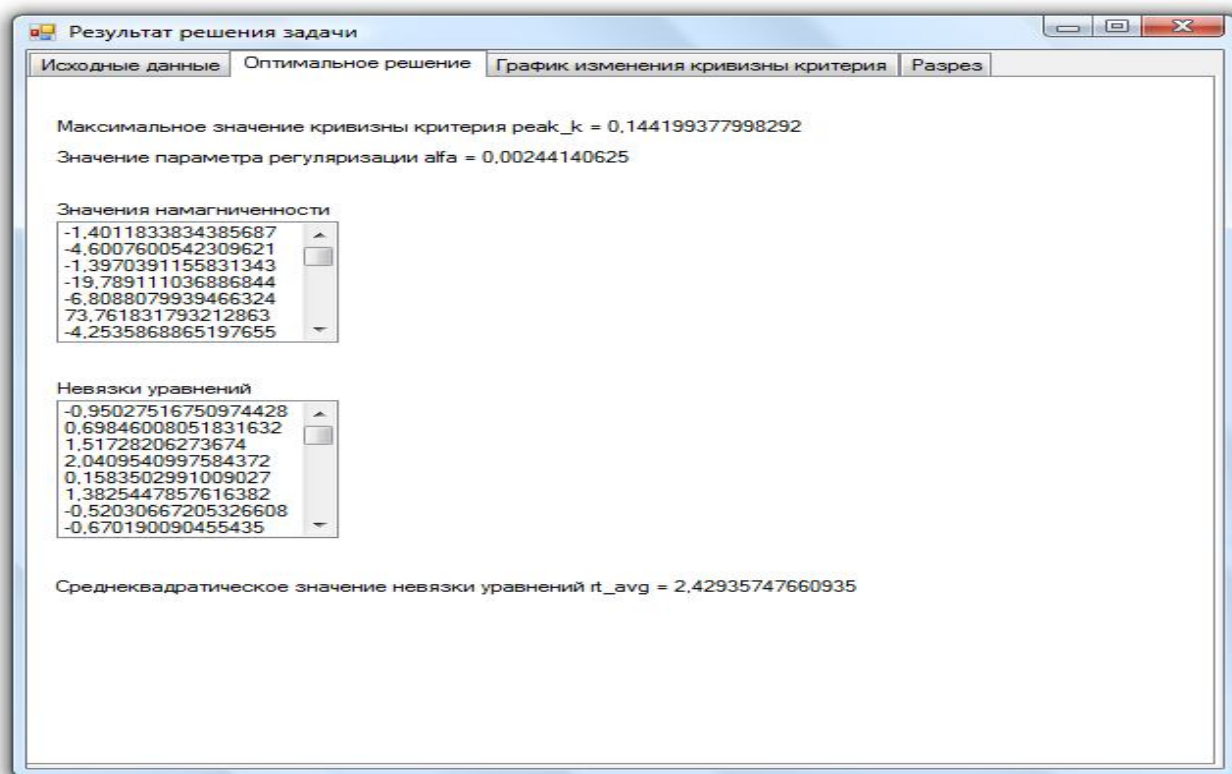


Рис. 2. Вкладка «Оптимальное решение» (практическая задача)

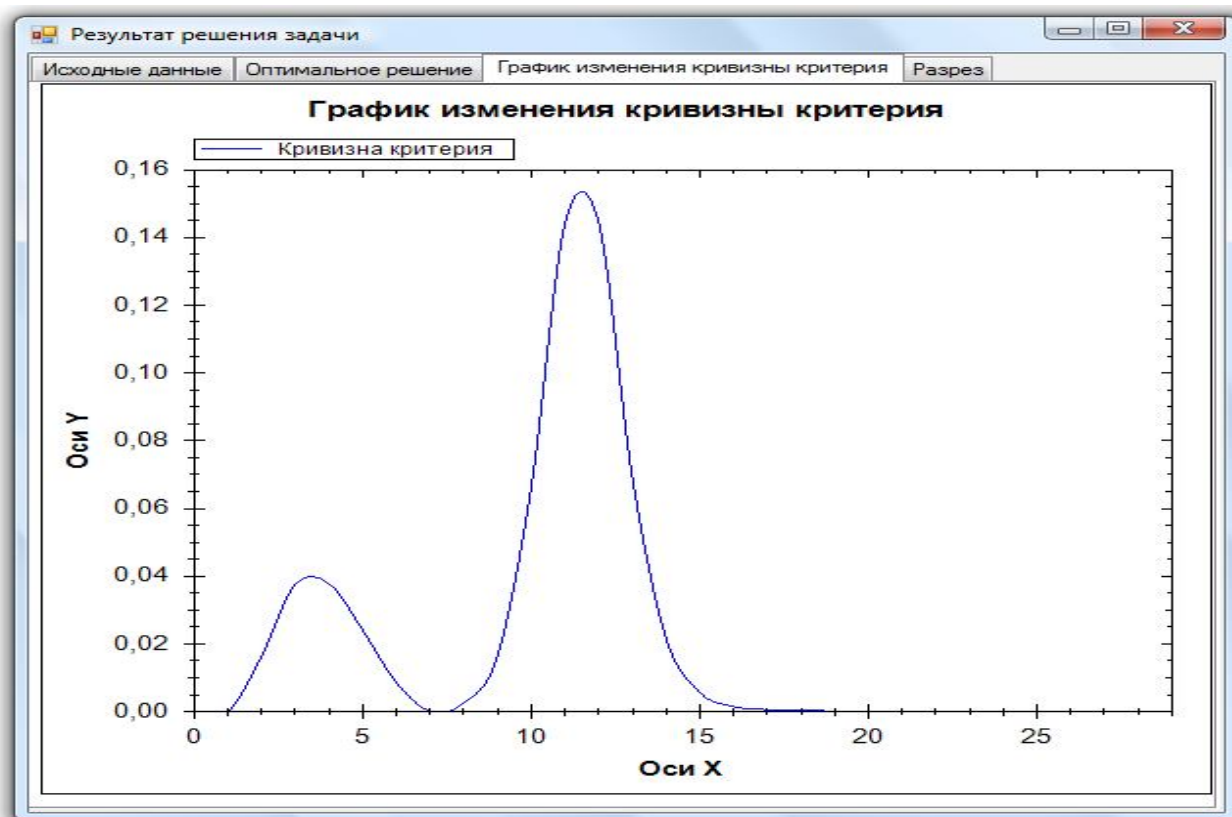


Рис. 3. Вкладка «График изменения кривизны критерия», используемый для выбора оптимального решения. Практическая задача

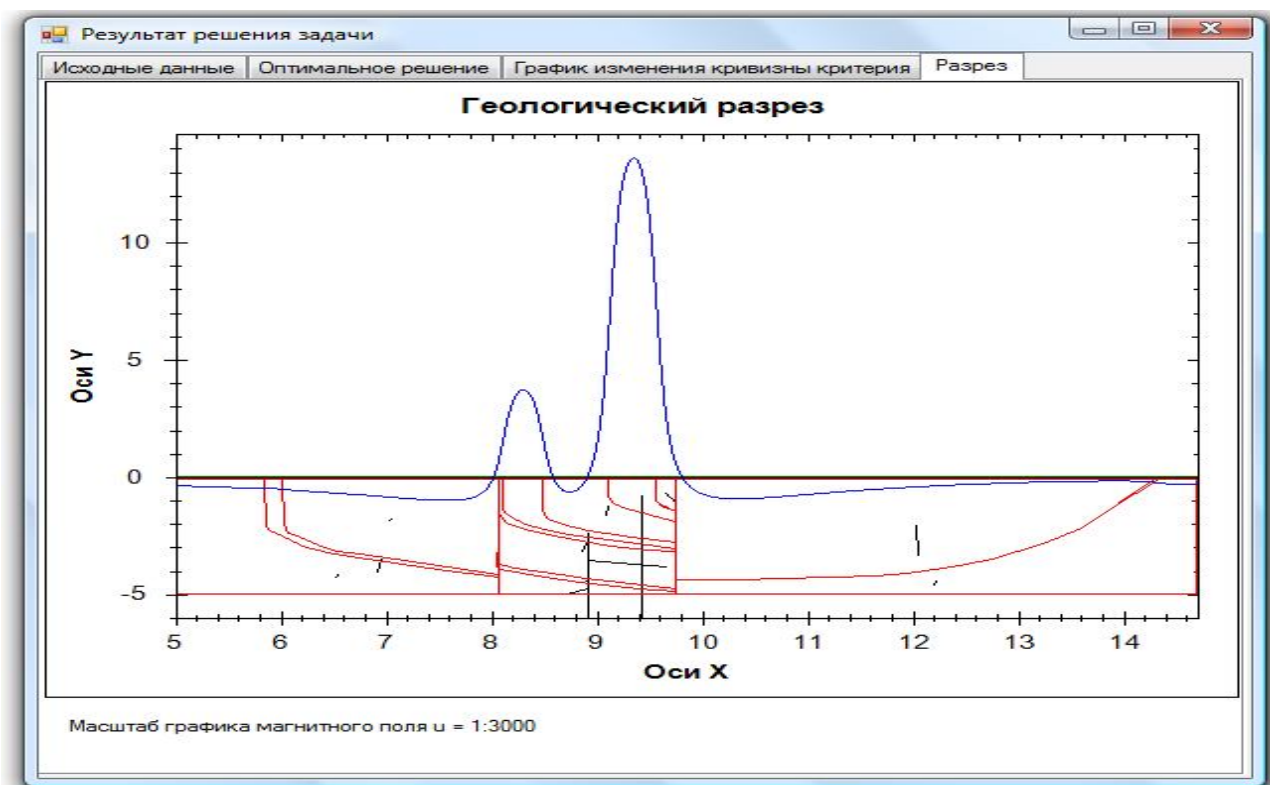


Рис. 4. Вкладка «Геологический разрез» – результат решения задачи для практического примера. Условные обозначения: _____ заданное поле Z ; _____ контуры изучаемых тел; | – расчетные векторы намагниченности тел

Таким образом, разработана программа вычисления намагниченностей двумерных геологических объектов по измеренным магнитным аномалиям Z_a или ΔT_a , как свободным от регионального фона, так и осложненным региональным фоном, близким к линейному. Проведено тестирование программы при решении теоретических тестовых задач, а также практической задачи. Подтверждена работоспособность программы и высокая точность получаемых результатов. Программа внедрена в Днепропетровской геофизической экспедиции «Днепрогеофизика» для решения практических задач при интерпретации магнитных аномалий с целью изучения строения геологических разрезов.

Список литературы

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач.-М.: Наука, 1979.-235 с.
2. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. К.: Наукова думка, 1978. - 227 с.
3. Страхов В.Н. Некоторые примеры эквивалентности и слабой единственности в плоской обратной задаче потенциала. Известия АН СССР. Физика Земли, 1973, № 5, С. 39-62
4. Бродский М.А., Страхов В.Н. О единственности решения двумерных обратных задач гравиметрии и магнитометрии для многогранников. Доклады АН СССР, 1982, т. 264, № 2, С. 318-322.
5. Страхов В.Н., Валяшко Г.М. Адаптивная регуляризация линейных некорректных задач и ее использование при решении задач гравиметрии и магнитометрии. - Известия АН СССР. Физика Земли, 1984, № 11, С. 55-77.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.
Надійшла до редакції 17.10.2012*