

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТОВ, ОГРАНИЧЕННЫХ НА ГЛУБИНУ, ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

В. П. Захаров, С. Г. Алексеев

При проведении магнитной съемки часто выявляются аномалии, характер которых достаточно отчетливо отражает влияние нижней границы намагниченных тел пластовой формы. Использование аномального магнитного поля для оценки возможного распространения таких тел по падению и для определения угла падения может иметь важное значение при поисках и разведке многих рудных месторождений, решении различных структурных задач. В немногочисленных работах, посвященных определению глубины залегания нижней границы пластовых тел, рекомендуется использовать значения поля в точках, расположенных на значительном удалении от проекции верхней кромки объекта на плоскость наблюдений. В таких точках поля реальных геологических объектов можно рассматривать как поля горизонтальных круговых цилиндров и определять глубину залегания центра сечения. После этого при известной глубине залегания верхней границы легко устанавливаются размеры тела по падению. Трудность практического использования таких способов заключается в том, что, во-первых, заранее не известно, какое удаление от центра аномалии в каждом конкретном случае является достаточным; во-вторых, на значительном удалении начинает существенно сказываться влияние соседних тел.

Использование эмпирических формул [1] ограничено теми же причинами и условием вертикальной намагниченности. Теоретически глубина залегания нижней кромки тел, вертикально падающих и вертикально намагниченных, определяется сравнительно просто. Способы решения этой задачи для пластов различной мощности и для уступа указаны, в частности, в работах А. А. Логачева [4], С. С. Иванова [3], В. Н. Шимараева [6]. Для вычисления глубины залегания нижней границы и угла падения пластов малой мощности при произвольном падении и намагничивании известна лишь рекомендация С. В. Шалаева [5], предусматривающая совместное использование функций Z_a и H_a и их квадратов. Однако для практического решения рассматриваемой задачи более удобным представляется использование поля Z_a (или ΔT) на двух уровнях. Это позволяет для ряда тел определить не только их положение в пространстве, но и направление намагниченности. Заметим, что определение направления намагниченности пород по аномальному магнитному полю существенно повышает надежность вычисления угла их

падения. Возможность непосредственного использования наблюдаемых аномальных полей для определения направления намагниченности пород зависит от характера наблюдаемых аномалий, в конечном счете — от соотношения глубин залегания верхней и нижней кромок намагниченных тел. Раздельное вычисление углов намагниченности и падения осуществимо лишь для тел, влияние нижней кромки которых находит надежное отражение в характере магнитного поля.

Рассмотрение поставленной задачи начнем с поля наклонного пласта малой мощности, произвольно намагниченного, ограниченного по падению и имеющего большие размеры по простиранию. Аналитическое выражение поля Z_a при выборе начала координат в точке, являющейся проекцией верхней кромки на линию профиля (ось x) [4]:

$$Z_a = 2J2b \left[\frac{h_1 \cos v - x \sin v}{h_1^2 + x^2} - \frac{h_2 \cos v - (x - a) \sin v}{h_2^2 + (x - a)^2} \right], \quad (1)$$

где J — намагниченность; $2b$ — мощность пласта; h_1, h_2 — глубины залегания верхней и нижней кромок; $a = (h_2 - h_1) \operatorname{ctg} \alpha$ — абсцисса нижней кромки пласта; α — угол падения пласта; v — угол, определяемый соотношениями $v = \alpha - \varphi$ и $\operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{ctg} i \cos A$; i — угол наклона вектора намагниченности; A — угол между линией, расположенной вкост простирания пласта и проекцией вектора намагниченности на горизонтальную плоскость.

Используя выражение (1), определяем абсциссы точек, в которых $Z_a = 0$, что сводится к нахождению корней уравнения

$$x^2 + [(h_2 + h_1) \operatorname{ctg} \varphi - (h_2 - h_1) \operatorname{ctg} \alpha] x - h_1 \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \varphi (h_2 - h_1) - h_1 h_2 = 0. \quad (2)$$

Откуда

$$x_{1,2} = -h_1 \operatorname{ctg} \varphi + 0,5(h_2 - h_1) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \varphi) \pm \sqrt{[0,5(h_2 - h_1) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \varphi)]^2 + h_1 h_2 \operatorname{csc}^2 \varphi}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что середина отрезка (точка C_1), заключенного между точками, где $Z_a = 0$ (рис. 1), удалена от начала координат на расстояние

$$-h_1 \operatorname{ctg} \varphi + 0,5(h_2 - h_1) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \varphi). \quad (4)$$

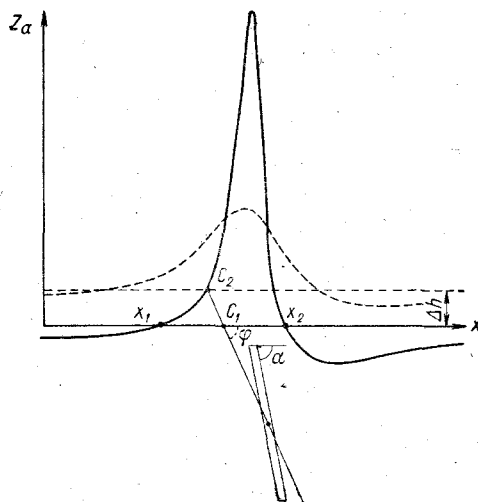


Рис. 1. Определение направления намагниченности пласта малой мощности, ограниченного по падению

На другом уровне, расположенном выше рассматриваемого на величину Δh , абсцисса точки C_2 , равноудаленной от точек с нулевым значением Z_a на этом уровне, равна

$$-(h_1 + \Delta h) \operatorname{ctg} \varphi + 0,5(h_2 - h_1) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \varphi). \quad (5)$$

Имея в виду, что ординаты точек C_1 и C_2 соответственно равны нулю и $-\Delta h$, а глубина залегания центра сечения пласта $h_c = 0,5(h_1 + h_2)$, уравнение прямой, проходящей через точки C_1 и C_2 , можно записать в виде

$$h = x \operatorname{tg} \varphi - 0,5 a \operatorname{tg} \varphi + h_c. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что данная прямая, во-первых, образует с осью x угол φ , во-вторых, проходит через центр сечения пласта. Для определения глубины залегания центра сечения пласта из выражения (3) найдем расстояние между точками с нулевыми значениями Z_a на исходном уровне

$$x_2 - x_1 = 2 \sqrt{[0,5(h_2 - h_1) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \varphi)]^2 + h_1 h_2 \csc^2 \varphi}. \quad (7)$$

Введя обозначение $0,5(x_2 - x_1) = m_1$, имеем

$$m_1^2 = [0,5(h_2 - h_1) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \varphi)]^2 + h_1 h_2 \csc^2 \varphi. \quad (8)$$

Обозначая через $2m_2$ расстояние между точками, в которых Z_a равно нулю на втором уровне, расположенном на Δh выше исходного, можем записать

$$m_2^2 = [0,5(h_2 - h_1) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \varphi)]^2 + (h_1 + \Delta h) (h_2 + \Delta h) \csc^2 \varphi. \quad (9)$$

Рассмотрев совместно уравнения (8) и (9), получим

$$h_c = \frac{(m_2^2 - m_1^2) \sin^2 \varphi - \Delta h^2}{2\Delta h}; \quad (10)$$

$$h_2 = \frac{m_2^2 - m_1^2}{\Delta h} \sin^2 \varphi - (h_1 + \Delta h). \quad (11)$$

Координаты верхней кромки пласта могут быть определены по кривой вертикального градиента Z_a [4]. С учетом этого, целесообразно пересчитывать поле вверх на сравнительно небольшую высоту, меньшую половины ожидаемой глубины залегания верхней кромки пласта, чтобы можно было использовать значения поля на двух уровнях не только для определения φ и h_c , но и для построения кривой вертикального градиента Z_a по разности значений поля на двух уровнях.

Угол падения пласта удобно определять графически по координатам его верхней кромки и получаемым из выражений (6) и (10) координатам центра сечения. Кроме того, угол падения может быть вычислен по вытекающей из выражения (7) формуле

$$\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \varphi \pm \frac{2\sqrt{m_1^2 - h_1 h_2 \csc^2 \varphi}}{h_2 - h_1}. \quad (12)$$

Отметим, что для маломощных пластовых тел, намагниченных по падению, определение параметров может быть выполнено без использования кривой вертикального градиента Z_a . В этом случае, определив указанным выше способом координаты центра сечения пласта и угол $\alpha = \varphi$, обозначив размеры пласта по падению через $2l$, найдем l с помощью вытекающего из выражения (8) соотношения

$$l^2 = h_c^2 \csc^2 \alpha - m_1^2. \quad (13)$$

Зная I , легко найти положение верхней и нижней кромок пласта.

Рассмотренный способ определения геометрических параметров и направления намагниченности произвольно падающих и произвольно намагниченных пластов малой мощности может быть распространен на поле Z_a уступа. При произвольном намагничении и произвольном падении боковой грани аналитическое выражение поля Z_a уступа может быть получено путем интегрирования по x в пределах от нуля до бесконечности аналитического выражения (1), откуда следует, что абсциссы экстремумов поля Z_a уступа имеют те же значения, что и абсциссы точек с нулевым значением Z_a соответствующим образом падающего и намагниченного пласта малой мощности. Таким образом, обозначив через x_1 и x_2 абсциссы экстремумов поля Z_a уступа, можно использовать те же выражения (3) — (13) для определения направления намагниченности уступа, координат центра его боковой грани, а при известной глубине залегания верхней границы — глубины залегания нижней кромки и угла падения. Применение рассматриваемого способа для уступа имеет то преимущество, что положение используемых характерных точек не зависит от возможной ошибки в выборе уровня нормального поля (рис. 2).

Уступ является идеализированной моделью пласта, ограниченного на глубину и имеющего очень большую горизонтальную мощность. Все реальные геологические объекты имеют конечную мощность. В зависимости от соотношения величин b , h_1 , h_2 поле Z_a такого пласта имеет от двух до пяти экстремальных точек. Если поле характеризуется пятью экстремальными точками, что наблюдается при $b > \sqrt{h_1 h_2 + (h_1 + h_2) \sqrt{h_1 h_2}}$,

то направление намагниченности и глубина залегания центра сечения такого тела могут быть определены тем же приемом, что и в случае поля уступа. Для вычислений могут быть использованы экстремумы любой из ветвей кривой Z_a . Для магнитных полей над пластами большой мощности, имеющих три экстремальных точки Z_a , не удалось найти простого приема определения параметров при произвольном направлении намагниченности. Простое решение может быть предложено лишь для частного случая, когда аномалия создана пластом большой мощности, намагниченным по падению. Отметим, что по характеру магнитного поля не представляется возможным судить, по падению ли намагничен наклонный ограниченный на глубину пласт. Можно лишь ожидать, что намагничение по падению будет свойственно телам, сложенным богатыми магнетитовыми рудами. Поле Z_a пласта большой мощности, намагниченного по падению и ограниченного на глубину, имеет следующее аналитическое выражение:

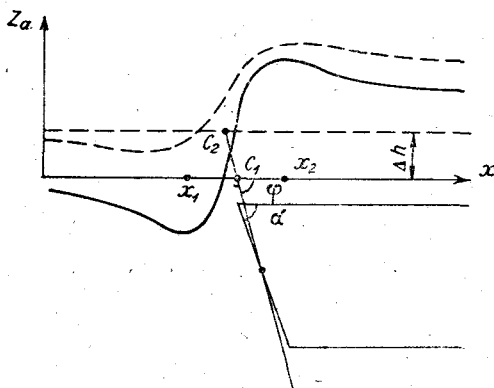


Рис. 2. Определение направления намагниченности уступа

$$Z_a = 2J \sin \alpha \left[\arctg \frac{2bh_1}{h_1^2 + x^2 - b^2} - \arctg \frac{2bh_2}{h_2^2 + (x - a)^2 - b^2} \right]. \quad (14)$$

Абсциссы точек x_1 и x_2 , в которых $Z_a = 0$,

$$x_{1,2} = -h_1 \operatorname{ctg} \alpha \mp \sqrt{b^2 + h_1 h_2 \csc^2 \alpha}. \quad (15)$$

Обозначив, как и в случае поля пласта малой мощности, расстояние между этими точками через $2m_1$, а расстояние между аналогичными точками на другом уровне, расположенном выше исходного на величину Δh , — через $2m_2$, запишем

$$h_c = \frac{(m_2^2 - m_1^2) \sin^2 \alpha - \Delta h^2}{-2\Delta h}. \quad (16)$$

Из выражения (15) следует также, что прямая, проведенная через середины отрезков, заключенных между точками с нулевыми значениями Z_a на каждом из уровней, образует с осью x угол α и проходит через середину верхней кромки и центр сечения пласта. Пересечение этой прямой с линией $h = h_c$ дает положение центра сечения пласта. При известной глубине залегания верхней кромки пласта легко могут быть найдены величины h_2 и b

$$h_2 = 2h_c - h_1 = \frac{m_2^2 - m_1^2}{\Delta h} \sin^2 \alpha - (h_1 + \Delta h); \quad (17)$$

$$b = \sqrt{m_1^2 - h_1 h_2 \csc^2 \alpha}. \quad (18)$$

Из изложенного выше следует, что приемы определения угла падения, глубины залегания центра сечения и нижней границы одинаковы для пластов большой и малой мощности, намагниченных по падению. Для пластов большой мощности, намагниченных не по падению и ограниченных на глубину, может оказаться целесообразным пересчет поля в верхнее полупространство на два уровня с целью изменения соотношения между мощностью и глубиной залегания верхней кромки, т. е. с целью получения аномалий Z_a над пластом малой мощности. Тогда, используя значение Z_a на этих двух уровнях, можно определять искомые параметры так же, как и для аномалии Z_a пласта малой мощности.

Предложенные приемы определения геометрических параметров пластовых тел, ограниченных на глубину, могут быть использованы и при рассмотрении аномалий ΔT , не превышающих по интенсивности 0,1 э, так как при соблюдении этого условия аналитические выражения Z_a и ΔT для тел, имеющих большие размеры по простиранию, аналогичны [4]. Они отличаются лишь тем, что в выражение Z_a входит угол $v = \alpha - \varphi$, а в выражение ΔT — угол $\varepsilon = 90^\circ - \varphi - \varphi_0 + \alpha$ [2]. Угол φ_0 связан с положением вектора намагничивающего поля T_0 и определяется из соотношения $\operatorname{ctg} \varphi_0 = \operatorname{ctg} I \cos A_0$, где I — наклонение вектора I_0 ; A_0 — магнитный азимут линии, идущей вкост простирания пласта.

Аналогичность аналитических выражений Z_a и ΔT показывает, что приемы определения глубины залегания центра сечения пласта малой мощности, ограниченного на глубину, и центра боковой грани уступа по полю ΔT такие же, как и по полю Z_a . Но из различия углов θ и ε следует, что линия, проведенная через середины отрезков, заключенных между точками, где $\Delta T = 0$ (поле пласта малой мощности), или между точками экстремальных значений ΔT (поле уступа), имеет иное, чем при использовании поля Z_a , аналитическое выражение

$$h = x \operatorname{tg}(\varphi + \varphi_0 - 90^\circ) - 0,5 a \operatorname{tg}(\varphi + \varphi_0 - 90^\circ) + h_c. \quad (19)$$

Из последнего уравнения видно, что эта прямая тоже проходит через центр сечения пласта малой мощности или боковой грани уступа,

но образует с осью x угол не φ , а $\varphi + \varphi_0 - 90^\circ$, откуда легко находится угол φ , определяющий направление намагниченности в плоскости, ориентированной вкрест простираения пород. Из несовпадения углов φ и ε следует также, что выражения (13) и (16)—(18), позволяющие определять по полю Z_a параметры тел, намагниченных по падению, применимы к аномалиям ΔT лишь тогда, когда наряду с условием $\alpha = \varphi$ выполняется и условие $\varphi_0 = 90^\circ$. Последнее условие соблюдается, если поле ΔT создано телом, расположенным в высоких широтах (вблизи магнитных полюсов Земли), либо имеющим меридиональное простираение.

При описании способа определения угла φ по аномалиям Z_a и ΔT подразумевалось, что $\varphi < 180^\circ$. Однако при значительной остаточной намагниченности и ее направлении, существенно отличном от направления современного намагничивающего поля, может оказаться, что $\varphi > 180^\circ$. В этом случае прямые, описываемые выражениями (6) и (19), образуют с осью x не углы φ и $\varphi + \varphi_0 - 90^\circ$, а отличные от указанных на 180° . Вопрос о том, когда при вычислении угла φ к полученным значениям следует прибавлять 180° , решается с учетом характера магнитного поля и вычисленного угла падения пласта.

Известно, что угол φ характеризует направление вектора намагниченности в плоскости, ориентированной вкрест простираения пласта или контакта. Чтобы получить представление о положении суммарного вектора намагниченности в пространстве, необходимо вычислить указанный угол по двум маршрутам, пересекающим намагниченное тело на участках с различным азимутом его простираения [2]. Полученные данные могут оказаться полезными при расчленении метаморфических и магматических комплексов по направлению намагниченности слагающих их пород.

Предлагаемые приемы определения геометрических параметров тел пластовой формы ограниченного распространения на глубину, основанные на предварительном нахождении направления их намагниченности, представляются достаточно удобными для практического применения. Они дают возможность не только оценить распространение тел на глубину, но и определить углы их падения с учетом действительного направления намагниченности пород. В настоящее время углы падения пород чаще всего вычисляют в предположении, что направление намагниченности совпадает с направлением современного намагничивающего поля Земли. Такое предположение в ряде случаев оказывается необоснованным, что может привести к грубым ошибкам в определении углов падения. Возможность использования аномального магнитного поля для определения действительного направления суммарной намагниченности существенно повышает надежность последующего вычисления угла падения пород. В то же время, как показано выше, это позволяет определять координаты центра сечения пласта и боковой грани уступа при произвольных углах намагниченности и падения, не связывая выбираемую высоту пересчета с ожидаемыми размерами тела по падению. Рассмотренные приемы могут найти практическое применение при решении достаточно широкого круга геологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булина Л. В. Об использовании материалов аэромагнитной съемки при изучении глубинного строения земной коры.— Сов. геология, 1961, № 5.
2. Захаров В. П. Использование данных магнитной съемки при определении углов падения произвольно намагниченных пластовых тел.— Зап. ЛГИ, 1971, т. 61, вып. 2.

3. Иванов С. С. Об определении глубин залегания нижней границы магнитных тел.— Вестн. Моск. ун-та, Геология, 1968, № 5.

4. Логачев А. А. Магниторазведка. Л., «Недра», 1968.

5. Шалаев С. В. Применение функций комплексного переменного при геологическом истолковании гравитационных и магнитных данных.— Вопр. разведочной геофизики, 1960, вып. 1.

6. Шимараев В. Н. О вычислении нижней кромки вертикального намагниченного пласта.— В кн.: Геофиз. методы разведки в Арктике, вып. 5, Л., изд. НИИГА, 1968.
