Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т. 113

УДК 550.838.01

МЕТОД ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ОЖИДАЕМЫХ АМПЛИТУД АНОМАЛИЙ ΔT НЕКОТОРЫХ АНТИКЛИНАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Ю.П.ГОРЯЧЕВ

Почти полвека назад А.Д.Архангельский обратил внимание на то, что наиболее распространенным и обычно наблюдаемым типом магнитных аномалий, связанных с внутренней структурой фундамента, являются полосовые аномалии. Источники этих аномалий, как правило, представляются в виде уединенных пластовых тел и горизонтальных цилиндров. Однако, как показывает опыт, далеко не всегда уровень эрозии настолько глубок, чтобы все маркирующие горизонты, участвующие в строении складчатых структур, можно было рассматривать как уединенные пласты. На региональный характер аномалий это обстоятельство, естественно, не влияет существенно, т.е. они остаются линейными и полосовыми. Вместе с тем, игнорирование возможности существования в разрезе складчатых образований магнитных маркирующих горизонтов, не вскрытых эрозией, может привести, как будет показано ниже, к существенным ошибкам при геологическом истолковании результатов магнитных съемок. Для анализа сложных магнитных полей складчатых образований, на наш взгляд, подойдет методика, применяемая в геологии для выявления механизма образования складок. Применительно к магниторазведке суть ее будет заключаться в первоначальном рассмотрении аномалии ΔT антиклинальной структуры, в строении которой принимает участие лишь один маломощный магнитный горизонт, и последующем анализе суммарного поля в сложных геометрических соотношениях складчатых серий в горизонтальной и вертикальных плоскостях.

В качестве элементарной литомагнитной модели антиклинальной складки, в строении которой принимает участие маркирующий горизонт малой мощности, может быть использована совокупность двух пластовых тел, верхние кромки которых совпадают. Решение прямой задачи магниторазведки для такой модели, как и для совокупности произвольного количества аналогичных объектов в случае однородного их намагничения, известно[x]:

$$\Delta T = A_0 \sum_{j=1}^{N} M_j \left\{ \left[\varepsilon_j \cos\varepsilon_j - (x-\xi_j)\sin\varepsilon_j \right] \Big/ \left[\varepsilon_j^2 + (x-\xi_j)^2 \right] \right\}; \quad (I)$$

$$A_0 = 0{,}5\,\mu_0 \sin i \sin I / \pi \sin\varphi \sin\varphi_0 ,$$

[x] Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Л., Недра, 1979. 350 с.

где ζ_j и ξ_j – прямоугольные координаты верхней кромки j-го пласта; M_j – произведение модуля вектора намагниченности $\vec{J}_j$ j-го пласта на его истинную мощность Δh_j; N – число пластов; i и I – углы наклонения векторов намагниченности и современного поля; φ и φ_0 – проекции этих углов на плоскость xOz; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость; $\varepsilon_j = 90^0 - \varphi - \varphi_0 + \alpha_j$; α_j – угол падения j-го пласта.

Для простой антиклинальной складки, представляющей собой совокупность двух пластов малой мощности, можно написать

$$\Delta T = A_0 \sum_{j=1}^{2} M_j \left\{ \left[\xi \cos\varepsilon_j - (x-\xi)\sin\varepsilon_j \right] \Big/ \left[\xi^2 + (x-\xi)^2 \right] \right\}. \qquad (2)$$

В общем случае, маркирующий горизонт, маломощный с точки зрения магниторазведки, допустимо рассматривать выдержанным по мощности лишь на конечных интервалах его длины. Пусть для нашей модели эти интервалы отождествляются с пластовыми телами, аппроксимирующими крылья складки. Тогда с учетом того, что

$$\Delta h_1 = 2c \sin(\psi - \alpha_1); \quad \Delta h_2 = 2c \sin(\alpha_2 - \psi),$$

где $2c$ – величина общей для данной модели грани, удовлетворяющая условию $2c \ll \zeta$; ψ – угол падения этой грани, отсчитанный от положительного направления оси Ox, получим

$$\Delta T = A_0 M \sin\beta \left[\xi \cos\varepsilon - (x-\xi)\sin\varepsilon \right] \Big/ \left[\xi^2 + (x-\xi)^2 \right], \qquad (3)$$

где $\varepsilon = 90^0 - \varphi - \varphi_0 + \alpha_1 + \alpha_2 - \psi$; β – угол складки; $M = J \cdot 2c$.

Нетрудно заметить, что полученное выражение (3), эквивалентно аналитическому выражению поля ΔT изолированного пласта малой мощности, а это означает, что по внешнему магнитному полю эти объекты однозначно опознаны быть не могут. Таким образом, среди объектов, которые ранее были по их магнитным аномалиям представлены как изолированные пластовые тела малой мощности, верхние кромки которых совпадают с поверхностью фундамента, могли находиться маркирующие горизонты, дислоцированные в процессе складкообразования, но не выходящие на эту поверхность.

Для снижения установленной неоднозначности выполним анализ выражения (3). Полученные в результате этих исследований данные при наличии незначительной априорной информации самого общего характера, позволят нам принять наиболее правильное геологическое решение. С этой целью обратимся вновь к выражению (2). Произведения $M_j \cos\varepsilon_j$ и $M_j \sin\varepsilon_j$ есть ортогональные составляющие вектора $\vec{M}_j$, причем, так как он определен относительно j-го пласта с помощью угла ε_j, первое произведение можно рассматривать в качестве тангенциальной составляющей вектора, а второе – нормальной составляющей. Отсюда тангенциальную и нормальную составляющие вектора $\vec{M}$, эквивалентного складке по внешнему магнитному полю пласта можно получить как сумму тангенциальных и нормальных составляющих векторов $\vec{M}_j$ исходных пластов:

$$M\cos\varepsilon = M_1\cos\varepsilon_1 + M_2\cos\varepsilon_2; \quad M\sin\varepsilon = M_1\sin\varepsilon_1 + M_2\sin\varepsilon_2. \qquad (4)$$

В общем случае, различие в магнитных моментах M_j может обусловливаться не только различием истинных мощностей исходных пластов, но и различием в их намагниченности, что в рамках маломощных моделей эквивалентно. Однако, при этом теряется ясный геометрический смысл угла ε и его лучше определять, как некоторый угол между линией падения эквивалентного пласта и вектором $\vec{M}$.

Используя выражение (4) несложно получить формулы для определения модуля магнитного момента, эквивалентного складке по внешнему магнитному полю, пласта и его угла ε:

$$M=\left(M_1^2+M_2^2+2M_1M_2\cos\beta\right)^{1/2}; \qquad (5)$$

$$\varepsilon=arctg\left[\left(M_1\sin\varepsilon_1-M_2\sin\varepsilon_2\right)/\left(M_1\cos\varepsilon_1-M_2\cos\varepsilon_2\right)\right]. \qquad (6)$$

Отсюда, в случае выдержанности маркирующего горизонта по мощности и при постоянстве его магнитных свойств, мы приходим к известному частному случаю, при котором эквивалентный пласт совпадает с осевой поверхностью складки. Под осевой поверхностью мы, как и большинство геологов-структурщиков, понимаем поверхность, которая делит складку пополам. Действительно, при $M_1 = M_2 = M_0$ выражения (5) и (6) принимают вид:

$$M=M_0\,2\cos(\beta/2); \quad \varepsilon=90^\circ-\varphi-\varphi^\circ+\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}. \qquad (7)$$

Если модули магнитных моментов M_1 и M_2 пластовых тел, аппроксимирующих крылья, не будут равны между собой, то в этом случае складки одинаковой геометрии будут создавать различные по форме и амплитуде внешние магнитные поля. Оценка различия амплитуд аномалий этих объектов может быть выполнена путем решения неравенства, вытекающего из выражений (5) и (7):

$$\left(M_1^2+M_2^2+2M_1M_2\cos\beta\right)^{1/2}>M_0\cdot2\cdot\cos(\beta/2).$$

Так как в силу нат льных условий $M_1 \neq 0$ и $M_2 \neq 0$, а M_0 равно либо M_1, либо M_2, то выполнив подстановку $k = M_1 / M_2$, получим

$$(k-1)(k+2\cos\beta+1)>0 \qquad (8)$$

и соответственно две системы неравенств:

$$\begin{cases} k-1>0 \\ k+2\cos\beta+1>0 \end{cases}; \quad \begin{cases} k-1<0 \\ k+2\cos\beta+1<0 \end{cases}. \qquad (9)$$

Решением первой системы является область значений всех $k > 1$, так как в этом случае $k > -(1 + 2\cos\beta)$ при любых значениях аргумента тригонометрической функции. Решением второй системы будет область, ограниченная кривой $k > 1 + 2\cos\beta$. Из общего решения неравенства (8) для некоторых значений аргумента тригонометрической функции, определяющей угол

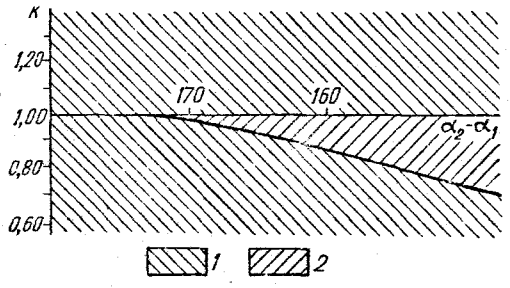


Рис.1. Решения неравенства (8) $(k-1)\left[k+2\cos(\alpha_2-\alpha_1)+1\right]$ больше и меньше 0 соответственно

складки, (рис.I) следует, что различие в величинах модулей магнитных моментов пластовых тел, аппроксимирующих маркирующий горизонт складки, приводит к увеличению амплитуды магнитных аномалий складчатых структур даже при уменьшении мощности или намагниченности пород на одном из их крыльев.

Количественная оценка изменения этой характеристики поля может быть выполнена графически. Для этого построена номограмма, представляющая собой семейство кривых $N = f(k)$ для фиксированных углов складки (рис.2). С ее помощью можно достаточно оперативно оценить ожидаемую амплитуду складчатой структуры, в строении которой принимает участие маркирующий горизонт малой мощности. Суть этой оценки состоит в том, что по номограммам (рис.2,а) оценивается амплитуда аномалии складки, в строении которой принимает участие однородно намагниченный, выдержанный по падению и простиранию маркирующий горизонт. Например, по сведениям, которыми мы располагаем, в разрезе складки присутствует маркирующий горизонт, намагниченность которого равна 0,I8 А/м, а отношение истинной мощности к глубине залегания его в сводовой части структуры не превышает 0,4. Тогда, если типичные углы складок в данном районе составляют $I77^0$, мы, согласно рис.2,а, вправе ожидать магнитную аномалию, амплитуда которой составит 0,72 нТл. Совершенно ясно, что даже при проведении съемок с современными высокоточными магнитометрами выделение такой аномалии из суммарного поля представляет собой задачу крайне сложную. Если же для данного района типично, что присутствующие здесь складки характеризуются на крыльях различными мощностями пород и их намагниченностью, то для уточнения ожидаемой амплитуды аномалии необходимо обратиться к номограмме (рис.2,б). Пусть на одном из крыльев складки маркирующий горизонт имеет мощность меньшую, по сравнению с принятой ранее, на 25 %, а его

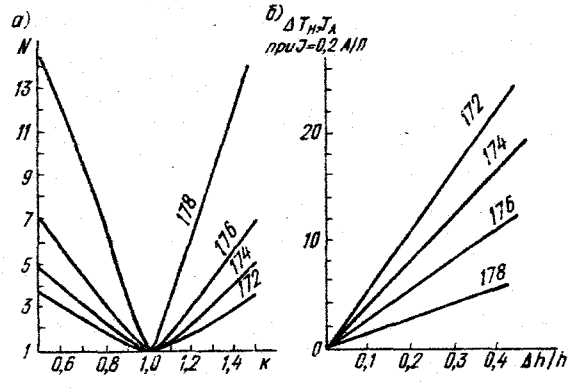


Рис.2. Номограммы для оценки амплитуды аномалии ΔT двухмерной складки (на кривых указаны углы складки в градусах)

намагниченность составляет лишь 80 % от средней. В этом случае, согласно рис.2,б, ожидаемая амплитуда аномалии складки составит уже 7,5 нТл, что дает все основания для возможности картирования подобных структур по результатам магнитных съемок. В связи с этим возникает необходимость в оперативной оценке ожидаемой формы аномалий внешнего магнитного поля подобных объектов.

Как известно, форма аномалии ΔT пласта малой мощности определяется углом ε. В случае равенства модулей магнитных моментов M_1 и M_2 эквивалентный складке по внешнему магнитному полю пласт совпадает с осевой поверхностью складки. В противном случае он отклонится от этой поверхности на некоторый угол $\gamma = 0{,}5(\alpha_1 + \alpha_2) - \psi$. Если различие магнитных моментов вызвано различием мощности пород на крыльях складки, то из выражения (3) имеем

$$\varepsilon = 90^\circ - \varphi - \varphi_0 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} + \gamma ,$$

где угол γ в выражении может быть найден, если учесть, что

$$M_j = J \Delta h_j ; \quad K = \frac{M_1}{M_2} = \frac{\sin(\psi - \alpha_1)}{\sin(\alpha_2 - \psi)} .$$

Тогда

$$\gamma = 0{,}5 i \ln\left[\left(K^{+i\alpha_2} + e^{i\alpha_1}\right) / \left(K e^{i\alpha_1} + e^{i\alpha_2}\right)\right] ,$$

с учетом известного в теории функций комплексного переменного тождества[x]

$$\operatorname{Arctg} z = \frac{1}{2i} \operatorname{Ln} \frac{1 + iz}{1 - iz} .$$

эту формулу легко преобразовать для операции с действительными числами:

$$\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{K-1}{K+1} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}\right) . \qquad (10)$$

Используя известную эквивалентность мощности и намагниченности в рамках маломощных моделей, можно утверждать, что формула (10) справедлива для определения угла и в случае неравенства намагниченности пород в различных крыльях складки.

Как видно из выражения (10) угол отклонения γ является функцией двух переменных и зависит как от соотношения модулей магнитных моментов пластовых тел, аппроксимирующих маркирующих маркирующий горизонт складки, так и от ее угла. Оперативную оценку его, а следовательно и суждение о форме ожидаемой аномалии, удобно выполнять с помощью специальных номограмм, рассчитанных для фиксированных углов складок. Наиболее существенное отклонение эквивалентного пласта от осевой поверхности складки характерно для пологих платформенных структур (рис.3). Например, достаточно лишь 10 % различия в величинах модулей магнитных моментов крыльев складок, углы ко-

[x] Справочник по математике / Под ред. Г.Гроше, В.Циглера. М., Наука, 1981. 720 с.

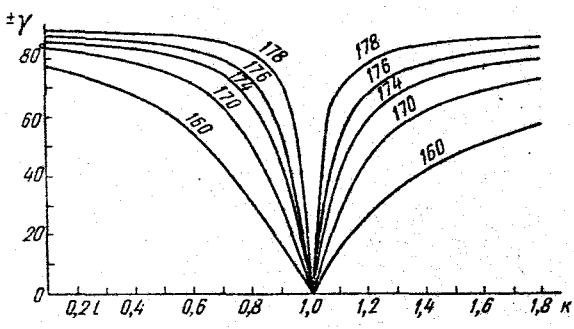


Рис.3. Номограмма для определения угла между „эквивалентным" пластом и осевой поверхностью складки (на кривых указаны углы складки в градусах)

торых больше 170°, чтобы эк
вивалентный по внешнему по
пласт отклонился от осевой
поверхности на угол, равный
0,25 β.

Выполненный в данной статье анализ одного из возможных типов эквивалентности внешних магнитных по источников разной геометри показывает, что, во-первых, картирование кровли фундаме та по магнитным данным може быть сопряжено с большими ошибками, так как незародированные складки внутри фундамента будут создавать аномалии подобные аномалиям пластов, верхние кромки которых совпадают с поверхностью фундамента, во-вторых, без априорной информации о ге метрии источника суждение о падении пласта может быть выполнено только д эквивалентной модели. Вместе с тем, установленное увеличение амплитуды аномалий ΔT пологих складчатых структур при различии модулей магнитных моментов интервалов маркирующего горизонта в различных крыльях складки, позволяют нам надеяться на возможность картирования таких объектов по маг нитному полю.