Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXI, вып. 2, 1971 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УГЛОВ ПАДЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНО НАМАГНИЧЕННЫХ ПЛАСТОВЫХ ТЕЛ

В. П. Захаров

Специфика рассматриваемой задачи заключается в том, что в аналитические выражения полей Z_a и ΔT входят не сами углы падения, а некоторые вспомогательные углы (соответственно, ν и ε), которые зависят не только от направления и угла падения, но и от наклонения вектора намагниченности и азимута простирания пласта. По наблюдаемому аномальному полю возможно лишь вычисление углов ν и ε. Они связаны с углом падения α соотношениями $\upsilon = \alpha - \varphi$ и $\varepsilon = 90^\circ - \varphi - \varphi_i + \alpha$. Углы φ и φ_i могут быть определены из выражений

$$\operatorname{ctg}\varphi = \operatorname{ctg} i \cos A' \text{ и } \operatorname{ctg}\varphi_i = \operatorname{ctg} I \cos A,$$

где i и I, соответственно, углы наклонения векторов намагниченности и современного намагничивающего поля, A' — угол между линией, идущей вкрест простирания пласта, и проекцией вектора намагниченности на горизонтальную плоскость, A — магнитный азимут этой линии.

При совпадении направления намагниченности и намагничивающего поля $i = I$, $A' = A$, $\varphi = \varphi_i$ и $\varepsilon = 90^\circ - 2\varphi + \alpha$.

В общем случае углы i и A' неизвестны, так как обычно отсутствуют сведения об остаточной намагниченности. Распространено мнение, что надежные данные о направлении суммарного вектора намагниченности могут быть получены лишь при изучении магнитных свойств образцов. Однако в подавляющем большинстве случаев такие измерения не выполняются, либо выполняются в незначительных объемах, в связи с чем углы падения по данным магнитной съемки вычисляются крайне редко, хотя необходимость таких вычислений возникает при решении широкого круга геологических задач.

В частности, при изучении геологического строения зоны сочленения Аллареченской и Печенгской структур Печенгского района Мурманской области, определение углов падения метаморфических толщ должно было способствовать решению вопроса об их структурном и стратиграфическом положении. Последнее в известной степени давало возможность судить о перспективах никеленосности изучаемой зоны, расположенной между двумя известными рудными полями.*

* Горбунов Г И. Геология и генезис сульфидных медно-никелевых месторождений Печенги. Недра, 1968.

Обнаженность пород, развитых в пределах рассматриваемой зоны, весьма плохая, кроме того, далеко не во всех обнажениях установлены элементы залегания интенсивно рассланцованных пород. Привлечение материалов высокоточной аэромагнитной съемки для определения углов падения пород толщи представляет практический интерес, но наталкивается на отсутствие данных об измерении магнитных свойств ориентированных образцов. В связи с этим для определения положения в пространстве суммарного вектора намагниченности возникла необходимость привлечения других дополнительных данных. Так, например, использовались немногочисленные замеры углов падения, выполненные при геологической съемке.

По аномалиям ΔT, наблюдаемым на маршрутах, пересекающих участки с известными углами падения горных пород, углы падения вычислялись в предположении, что намагниченность обязана своим происхождением только действию современного поля земли и ориентирована, в таком случае, параллельно намагничивающему вектору T_0. Совпадение между углами падения, установленными при геологических наблюдениях, и углами, полученными указанным способом, свидетельствует, что остаточная намагниченность либо равна нулю, либо параллельна (антипараллельна) индуцированной. При несоблюдении этих условий должно наблюдаться несовпадение углов, отражающее влияние остаточной намагниченности. Тогда, используя полученные расхождения, можно определить склонение и наклонение суммарного вектора намагниченности.

Не останавливаясь пока на способах вычисления вспомогательного угла ε, отметим, что для определения положения в пространстве суммарного вектора намагниченности необходимо вычислить величину ε по двум маршрутам, пересекающим породы изучаемого комплекса на участках с различным простиранием. При этом угол между направлением маршрута и простиранием пород может быть любым, но не равным нулю.

Обозначим угол падения, установленный по геологическим наблюдениям, $\alpha_г$, а вычисленный по данным аэромагнитной съемки, в предположении, что остаточная намагниченность отсутствует, $\alpha_м$. Учитывая, что $\alpha_м = \varphi + \varphi_i + \varepsilon - 90°$, можно записать

$$\alpha_г - \alpha_м = \Delta\alpha = \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ — разность между истинным углом φ и углом φ_i, полученным при произвольном предположении об отсутствии остаточной намагниченности.

Тогда

$$\Delta\alpha = \varphi - \varphi_i.$$

Откуда

$$\varphi = \varphi_i + \Delta\alpha.$$

Зная $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$, полученные, соответственно, для первого и второго участка, находим истинные значения φ_1 и φ_2, которые можем использовать для нахождения углов наклонения и склонения суммарного вектора намагниченности. Воспользуемся для этого соотношениями

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}\varphi_1 &= \operatorname{ctg} i \cos A_1', \\ \operatorname{ctg}\varphi_2 &= \operatorname{ctg} i \cos A_2'. \end{aligned} \qquad (1)$$

Значения i, A_1' и A_2' неизвестны, но $A_2' - A_1' = \Delta A_{21}$ определяется легко, так как представляет разность азимутов простирания пласта на двух рассматриваемых участках (рис. 1). Выражение (1) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}\varphi_1 &= \operatorname{ctg} i \cos A_1', \\ \operatorname{ctg}\varphi_2 &= \operatorname{ctg} i \cos\left(A_1' + \Delta A_{21}\right). \end{aligned} \qquad (2)$$

Решая систему уравнений относительно A_1, получим

$$\operatorname{tg} A_1' = \frac{P \cos \Delta A_{21} - 1}{P \sin \Delta A_{21}} \qquad (3)$$

где $P = \frac{\operatorname{ctg} \varphi_1}{\operatorname{ctg} \varphi_2}$

Затем из соотношения (2) находим i.

Определив таким путем угол наклонения суммарного вектора намагниченности и положение его проекции на горизонтальную плоскость, можем использовать эти данные для определения углов падения горных пород по кривым ΔT на других площадях развития пород данного комплекса, где углы падения по тем или иным причинам не замерены. Если в пределах изучаемой территории имеются участки с очевидно различной историей геологического развития, то каждому из них может оказаться свойственно свое направление суммарной намагниченности. Поэтому для каждого из них следует определить i и A'

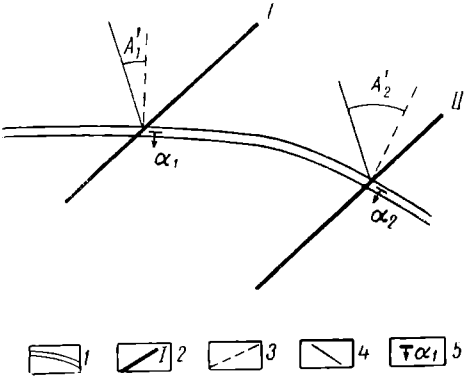


Рис. 1. Взаимное расположение маршрутов магнитной съемки и проекции верхней кромки намагниченного пласта на плоскость наблюдений:

1 — положение проекции верхней кромки пласта на плоскость наблюдений; *2* — линия и номер маршрута; *3* — положение оси X; *4* — положение проекции суммарного вектора намагниченности на горизонтальную плоскость; *5* — элементы залегания пласта

Для определения положения в пространстве суммарного вектора намагниченности могут быть использованы и кривые Z_a. Формулы (1)—(3) в этом случае также применимы; и при нахождении истинного значения угла φ также нужно пользоваться соотношением $\varphi = \varphi_i + \Delta\alpha$.

Остановимся теперь на способах вычисления угла ε, необходимого для последующего определения угла падения. Как известно,* способы вычисления ε по кривым ΔT для пластовых тел, имеющих значительные размеры по простиранию и создающих аномалии менее 0,1 *э*, идентичны способам вычисления угла ν, входящего в аналитическое выражение Z_a. Такие способы известны, но все они предусматривают либо предварительную трансформацию исходных данных, либо правильность выбора уровня нормального поля (для конкретной рассматриваемой аномалии). Любой вид трансформации поля, в частности, построение кривых горизонтального градиента, используемых иногда для вычисления угла ε, обычно сопровождается внесением ошибок, резко снижающих точность определения этого параметра. Поэтому такой путь далеко не всегда может быть рекомендован. Что касается уровня нормального поля, то, как известно, он выбирается единым для больших площадей, в пределах которых многие локальные аномалии часто наблюдаются на фоне магнитных полей, созданных другими более крупными объектами.

По изложенным причинам применение существующих приемов определения угла ε во многих случаях затруднено. Поэтому желательно выработать простой прием правильного выбора уровня нормального поля для каждой аномалии, либо простой прием вычисления угла ε, не зависящий от выбора уровня поля, но и не связанный с предварительной трансформацией исходных данных. Ниже рассматриваются такие приемы применительно

---

* Логачев А. А. Магниторазведка. Недра, 1968.

к аномалиям ΔT, созданным произвольно намагниченными пластовыми телами, больших размеров по простиранию и падению.

Аналитическое выражение ΔT произвольно намагниченного пласта малой мощности, имеющего большие размеры по простиранию и падению, имеет вид

$$\Delta T = 2I_1 2b \frac{h\cos\varepsilon - X\sin\varepsilon}{h^2 + X^2} (\sin^2 i + \cos^2 i'), \tag{4}$$

где I_1 — намагниченность; $2b$ — мощность пласта; h — глубина залегания верхней кромки пласта; i' — угол между вектором намагниченности и осью x.

Абсциссы максимума и минимума ΔT равны, соответственно,

$$X_1 = h\frac{\cos\varepsilon - 1}{\sin\varepsilon} = -h\frac{\sin\varepsilon}{1+\cos\varepsilon}, \qquad X_2 = h\frac{\cos\varepsilon + 1}{\sin\varepsilon} \tag{5}$$

Длина отрезка, заключенного между ними, будет

$$X_2 - X_1 = 2h\csc\varepsilon. \tag{6}$$

Найдем абсциссу точки, в которой ΔT равно нулю,

$$X_3 = h\operatorname{ctg}\varepsilon. \tag{7}$$

На основании формул (5) и (7) находим

$$X_2 - X_3 = h\csc\varepsilon. \tag{8}$$

Сравнивая выражения (6) и (8), устанавливаем, что ΔT обращается в нуль в точке, равноудаленной от точек, в которых ΔT достигает экстремальных значений. Следовательно, для нахождения уровня нормального поля нужно на линии маршрута найти точку, равноудаленную от точек экстремальных значений ΔT, и провести через нее новую нулевую линию, параллельную первоначальной (рис. 2).

После этого угол ε может быть найден с помощью известного выражения

$$\cos\varepsilon = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}} \tag{9}$$

Наряду с этим, для определения угла ε могут быть предложены и другие соотношения, получаемые при совместном рассмотрении выражений (5) и (7)

$$\cos\varepsilon = \frac{X_2 + X_1}{X_2 - X_1} = \frac{X_2 + X_1}{2X_3} \tag{10}$$

В последнем случае предварительно определяется начало координат, для чего находятся значения ΔT в этой точке:

$$\Delta T\,(0) = \Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}.$$

Для вычисления угла ε могут быть рекомендованы также выражения, в которые входит глубина залегания верхней кромки пласта

$$\sin\varepsilon = \frac{2h}{X_2 - X_1}, \tag{11}$$

$$\operatorname{ctg}\varepsilon = \frac{X_2 + X_1}{2h} \tag{12}$$

Не останавливаясь на многочисленных известных способах определения h, отметим, что при рассмотрении аномалий ΔT в пределах Балтийского, Анабарского, Алданского и других докембрийских кристаллических щитов, необходимость в вычислениях этого параметра отсутствует. Подавляющее число магнитных аномалий в этих районах связано с телами, выходящими на поверхность или перекрытыми наносами незначительной (по сравнению с вы-

сотой полета) мощности. В этих условиях глубина залегания верхней кромки намагниченных тел может быть принята равной высоте полета и использована при вычислении угла ε с помощью выражений, приведенных выше. Более удобным представляется выражение (11), так как его использование не требует нахождения правильного для каждой аномалии уровня нормального поля.

Более сложным считается определение угла ε в случае, когда аномалия создана пластом большой мощности. Это связано с тем, что аналитическое выражение поля ΔT пласта большой мощности

$$\Delta T = 2I \sin\alpha \left[\cos\varepsilon \operatorname{arctg} \frac{2bh}{h^2 + X^2 - b^2} - \right.$$
$$\left. - \frac{1}{2} \sin\varepsilon \ln \frac{h^2 + (X+b)^2}{h^2 + (X-b)^2}\right] (\sin^2 i + \cos^2 i') \qquad (13)$$

не позволяет найти простые соотношения, связывающие значения поля в некоторых характерных точках с абсциссами этих точек. Однако и для этого случая могут быть предложены простые приемы нахождения угла ε, если уровень нормального поля для данной аномалии выбран правильно или если глубина залегания верхней кромки пласта известна. Первое из условий может быть сформулировано иначе: необходимо нахождение проекции на линию маршрута средней точки верхней кромки пласта. Остановимся поэтому на способе нахождения этой точки.

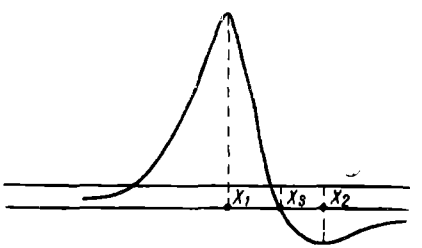


Рис. 2. Определение уровня нормального поля магнитной аномалии пласта малой мощности

В области точки перегиба (X_3 или X_4) кривой ΔT строится кривая горизонтального градиента ΔT (рис. 3). Находится точка c — середина отрезка между точками, в которых градиент равен половине экстремального значения, и расстояние от нее до точки с экстремальным значением градиента. Это расстояние откладывается от середины отрезка (точки k) между точками перегиба (X_3 и X_4) кривой ΔT в ту сторону, где наблюдается ΔT_{min}. Найденная точка X_0 есть проекция середины верхней кромки пласта на линию маршрута. Руководствуясь тем, что значение аномалии в этой точке должно удовлетворять соотношению $\Delta T\,(0) = \Delta T_{max} + \Delta T_{min}$, определяем правильный для данной аномалии уровень нормального поля (рис. 3).

Приведем обоснование указанного способа нахождения начала координат. Кривую горизонтального градиента ΔT можно рассматривать как кривую ΔT над двумя фиктивными пластами малой мощности, каждый из которых расположен симметрично относительно соответствующей боковой границы реального пласта. Для определенности будем рассматривать левую ветвь кривой градиента, отражающую в данном случае влияние фиктивного пласта, расположенного в лежачем боку реального объекта (рис. 3). Начало координат этой ветви кривой градиента определяется положением проекции на линию маршрута левой угловой точки реального пласта.

Используя выражение (4), находим точки X_5 и X_6, в которых значение градиента равно половине максимального

$$X_5 = \frac{-2h\sin\varepsilon}{1 - \cos\varepsilon} - \frac{h\sqrt{\sin^2\varepsilon - 2(1 - \cos\varepsilon)}}{1 - \cos\varepsilon},$$
$$X_6 = \frac{-2h\sin\varepsilon}{1 - \cos\varepsilon} + \frac{h\sqrt{\sin^2\varepsilon - 2(1 - \cos\varepsilon)}}{1 - \cos\varepsilon}. \qquad (14)$$

Из выражения (14) следует, что середина отрезка, расположенного между точками X_5 и X_6, удалена от выбранного для данной ветви кривой градиента начала координат на расстояние

$$\frac{-2h\sin\varepsilon}{1+\cos\varepsilon} \tag{15}$$

Выражение (5) показывает, что точка максимума кривой градиента удалена от начала координат на расстояние в два раза меньшее, т. е. она равноудалена как от начала координат, так и от середины отрезка, заключенного между точками X_5 и X_6. Такая же закономерность устанавливается и для правой ветви кривой градиента, если рассуждения вести относительно точки минимума градиента (X_4). Из этого следует, что каждая из точек перегиба кривой ΔT (X_3 и X_4) смещена по отношению к проекции соответствующей

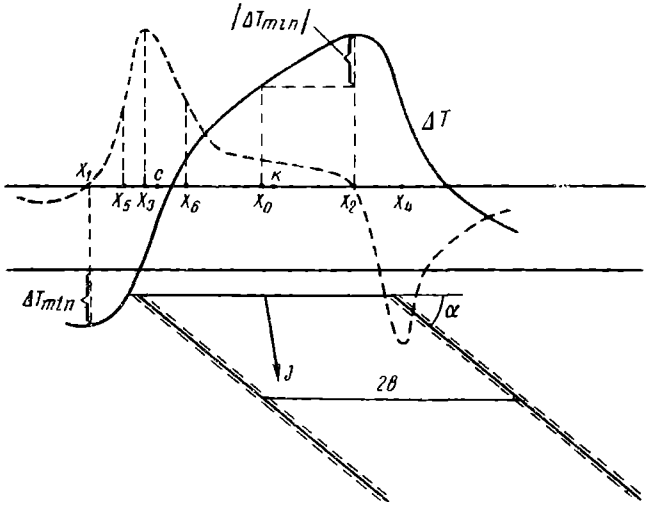


Рис. 3. Кривые ΔT и горизонтального градиента ΔT над пластом большой мощности при косом намагничивании

угловой точки пласта большой мощности на одно и то же расстояние в сторону, противоположную той, где наблюдается минимум ΔT Величина этого смещения равна длине отрезка, заключенного между точками X_3 и c.

Остановимся теперь на простых способах вычисления угла ε. Найдем абсциссы экстремумов кривой ΔT — точки X_1 и X_2

$$X_1 = h\operatorname{ctg}\varepsilon - \sqrt{b^2 + h^2\csc^2\varepsilon}$$

$$X_2 = h\operatorname{ctg}\varepsilon + \sqrt{b^2 + h^2\csc^2\varepsilon} \tag{16}$$

Расстояние между этими точками равно

$$X_2 - X_1 = 2\sqrt{b^2 + h^2\csc^2\varepsilon}. \tag{17}$$

Введя обозначение $\frac{1}{2}(X_2 - X_1) = a$, можем записать

$$\sin\varepsilon = \frac{h}{\sqrt{a^2 - b^2}} \tag{18}$$

Из выражения (16) также следует

$$\operatorname{ctg}\varepsilon = \frac{X_2 + X_1}{2h} \tag{19}$$

Рассматривая совместно выражения (18) и (19), находим

$$\cos\varepsilon = \frac{X_2 + X_1}{2\sqrt{a^2 - b^2}} \tag{20}$$

Принимая во внимание, что для пласта большой мощности b можно считать равным половине расстояния между точками перегиба X_3 и X_4, из формул (19) и (20) определяем ε и h.

Остановимся еще на одном способе вычисления угла ε. Выше было показано, что в случае, когда аномалия ΔT создается пластом малой мощности, расстояние от точки, где $\Delta T = 0$, до любой из точек, в которых наблюдаются экстремальные значения ΔT, равно $h \csc \varepsilon$. Это свойство может быть распространено и на кривую горизонтального градиента ΔT пласта большой мощности, так как каждая из ветвей кривой градиента может рассматриваться как аномалия ΔT над пластом малой мощности. Принимая во внимание соответствие характерных точек кривых ΔT и горизонтального градиента ΔT и используя принятые ранее обозначения абсцисс характерных точек кривой ΔT для случая пласта большой мощности, можно записать

$$\sin\varepsilon = \frac{h}{X_1 - X_3} = \frac{h}{X_2 - X_4} \tag{21}$$

Из совместного рассмотрения выражений (19) и (21) следует

$$\cos\varepsilon = \frac{X_2 + X_1}{2(X_1 - X_3)} = \frac{X_2 + X_1}{2(X_2 - X_4)} \tag{22}$$

Достоинством выражений (20) и (22) является возможность определения с их помощью угла ε без предварительного вычисления каких-либо иных параметров пласта большой мощности. В то же время следует отметить, что для районов, где магнитные породы непосредственно выходят на поверхность, прежде всего для территорий кристаллических щитов, для вычисления угла ε весьма удобны выражения (18), (19) и (21). Использование формул (18) и (21) не требует предварительного определения уровня нормального поля.

При рассмотрении практических кривых в ряде случаев трудно установить их принадлежность к пластам большой или малой мощности. Для вычисления угла ε по таким аномалиям предпочтительнее пользоваться выражением (19), так как оно справедливо в обоих случаях.

Принимая величину h равной высоте полета и используя ее среднее значение в приведенных выше выражениях, следует иметь в виду, что при этом вносится некоторая ошибка, определяемая колебаниями как высоты полета, так и мощности четвертичных отложений. Для рассматриваемой части Печенгского района высота полета при аэромагнитной съемке менялась от 55 до 65 *м*. Мощность четвертичных отложений на большей части территории колеблется от 0 до 10 *м*. Таким образом, величина h могла быть принята равной 65 ± 10 *м*, т. е. задавалась с ошибкой около 16%. В связи с этим была оценена возможная погрешность вычисления угла по формулам (11), (18) и (21). Расчеты показали что ошибка определения при указанных условиях не превышает $\pm 5°$ для $0° < |\varepsilon| \leqslant 30°$ и $\pm 10°$ для $30° < |\varepsilon| \leqslant 50°$. При больших значениях $|\varepsilon|$ ошибка его определения резко возрастает. Поэтому при больших углах ε, что может быть установлено по резкой асимметрии кривых ΔT, следует либо

более точно определять величину h, либо пользоваться другими, указанными выше, приемами вычисления ε.

При той же ошибке определения h (16%) угол ε по выражению (19) вычисляется с существенно меньшей погрешностью, которая не превышает $\pm 5°$ при любых значениях ε. Даже при ошибке определения h, равной 30%, ошибка вычисления ε не превышает $\pm 10°$

Сопоставление результатов вычислений, выполненных по материалам аэромагнитной съемки, с данными геологических наблюдений в Печенгском районе показало, что ошибка определения углов падения нигде не превышала 10° Указанные способы также использовались для определения углов падения на значительных площадях, практически лишенных коренных обнажений. В настоящее время результаты этих вычислений на отдельных участках уже подтверждены данными геолого-картировочного бурения, что свидетельствует о надежности и достаточной точности предлагаемых методов.

Изложенное выше показывает возможность достаточно достоверного определения углов падения произвольно намагниченных тел пластовой формы по данным магнитной съемки. Для этого нет необходимости проводить трудоемкие работы по отбору ориентированных образцов и определению их магнитных свойств. Сведения о положении в пространстве суммарного вектора намагниченности могут быть получены при совместном рассмотрении магнитного поля и результатов геологических наблюдений на отдельных обнаженных участках. Рекомендуемый способ вычисления углов наклонения и склонения суммарного вектора намагниченности обеспечивает определение углов падения горных пород с достаточной надежностью.

Предлагаемые способы нахождения правильного для отдельных аномалий уровня нормального поля и вычисления угла ε, в силу своей простоты, могут найти широкое практическое применение. Они могут быть использованы и при рассмотрении магнитных аномалий Z_a.