

WYKORZYSTANIE WSKAZAŃ TRÓJSKŁADOWEGO MAGNETOMETRU DO WYZNACZANIA AZYMUTU SKRZYWIENIA OTWORÓW WIERTNICZYCH

UKID 560.932.6:622.241.7

Pomiary magnetyczne w otworach wiertniczych są obecnie szeroko stosowane za granicą, a ostatnio również w Polsce, gdzie magnetometria wiertnicza stosowana jest od czasu sprowadzenia ze Szwecji magnetometru trójskładowego marki Hetona HBM III w 1965 r. Głównym celem stosowania magnetometrii wiertniczej przy poszukiwaniu i rozpoznawaniu złóż magnetytowych jest wykrycie w przestrzeni wokół-otworowej ciał magnetycznie czynnych oraz uzyskanie informacji na temat własności magnetycznych przewierconych utworów skalnych. Wskazania trójskładowego magnetometru otworowego mogą być także wykorzystane do określenia azymutu skrzywienia odwiertu w przypadku, gdy nie można określić go innym sposobem.

Poniżej przeprowadzono analizę możliwości wyznaczenia azymutu skrzywienia odwiertu tą metodą, podając sposób jego wyznaczenia oraz trudności, jakie mogą wystąpić przy zastosowaniu tej metody. Za pomocą trójskładowego magnetometru marki Hetona mierzymy w otworach wiertniczych w każdym punkcie pomiarowym jednocześnie trzy następujące wzajemnie do siebie prostopadłe składowe natężenia pola magnetycznego:

- X^* — składowa wzdłuż kierunku osi odwiertu;
- Z^* — składowa prostopadła do osi odwiertu, leżąca w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś odwiertu;
- Y — składowa prostopadła do składowych X i Z , leżąca w płaszczyźnie poziomej.

Jednoczesny pomiar trzech składowych natężenia pola magnetycznego daje maksymalną ilość informacji dotyczących rozkładu natężenia pola magnetycznego w danym punkcie pomiarowym w otworze wiertniczym. Całkowity wektor natężenia pola magnetycznego T określony z pomierzonych trzech składowych X , Z i Y jest geometryczną sumą normalnego pola ziemskiego T_0 i wektora pola anomalnego T_a związanego z utworami magnetycznie czynnymi.

Z pomierzonych dwóch składowych poziomych Z i Y można wyznaczyć wektor poziomej składowej natężenia pola magnetycznego H , który jest wypadkową wektora składowej poziomej normalnego pola ziemskiego H_0 i wektora pola anomalnego H_a (ryc. 2a).

Przed przystąpieniem do wyznaczenia składowej H należy przede wszystkim przeliczyć składową Z do poziomu. Jeżeli określimy pole anomalne składowej poziomej H_a i odejmiemy go od całkowitej wartości H uzyskanej z pomiarów, to otrzymamy wartość składowej poziomej normalnego pola ziemskiego H_0 . Kierunek wektora H_0 określonego ze składowych Z_0 i Y_0 pomierzonych w ośrodku niemagnetycznym pokrywa się z kierunkiem północy magnetycznej (ryc. 2b).

Znając kierunek wektora wypadkowego H i kierunek wektora składowej Z leżącego w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś odwiertu możemy

* W magnetometrze marki Hetona HBM III przy pionowym ustawieniu sondy składowa Z odpowiada składowej poziomej, a składowa X składowej pionowej, odwrotnie jak w ogólnie przyjętym układzie.

określić kąt między wektorami, a następnie określić azymut skrzywienia tego odwiertu, który może być wyznaczony za pomocą wskazań trójskładowego magnetometru jedynie wtedy, gdy odchylenie otworu wiertniczego od pionu jest większe niż 3° . W przypadku, gdy otwór wiertniczy przechodzi przez utwory niemagnetyczne lub wykazujące niewielkie namagnesowanie (np. skały osadowe lub skały krystaliczne takie, jak: granit, sjenit itp.) azymut skrzywienia otworu można wyznaczyć za pomocą trójskładowego magnetometru z dokładnością do 5° . Im mniejsze jest namagnesowanie przewierconych skał, tym dokładniej można wyznaczyć powyższym sposobem azymut skrzywienia odwiertu. Na dokładność wyznaczenia azymutu skrzywienia tą metodą ma także wpływ położenie sondy w stosunku do osi odwiertu i ustawienie czujników względem osi sondy.

Błąd nierównoległości sondy do osi odwiertu jest bardzo mały, ponieważ sonda wisząc na kablu ustawia się zawsze w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś odwiertu, a tym samym składowa Z pokrywa się z tą płaszczyzną. Błąd niedokładnego ustawienia się ramki z czujnikami (flux gate) względem położenia sondy określamy doświadczalnie przez wykonanie serii pomiarów na powierzchni ziemi przy różnych położeniach badanej sondy, a następnie statystycznie określamy błąd, z jakim wyznaczono wektor natężenia pola magnetycznego zależnie od położenia sondy.

Jak już wyżej wykazano kierunek wypadkowego wektora składowej poziomej H_0 pokrywa się z kierunkiem północy magnetycznej. Wektor ten w danym punkcie pomiarowym jest zorientowany względem sondy, która z kolei leży w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś otworu wiertniczego. Stąd też łatwo można wyznaczyć azymut położenia sondy, a tym samym azymut skrzywienia otworu wiertniczego.

Przykłady:

Ponieważ składowa Z skierowana jest w przeciwnym kierunku niż kierunek głębienia otworu (ryc. 3a i 3b), więc azymut skrzywienia odwiertu będzie wynosił:

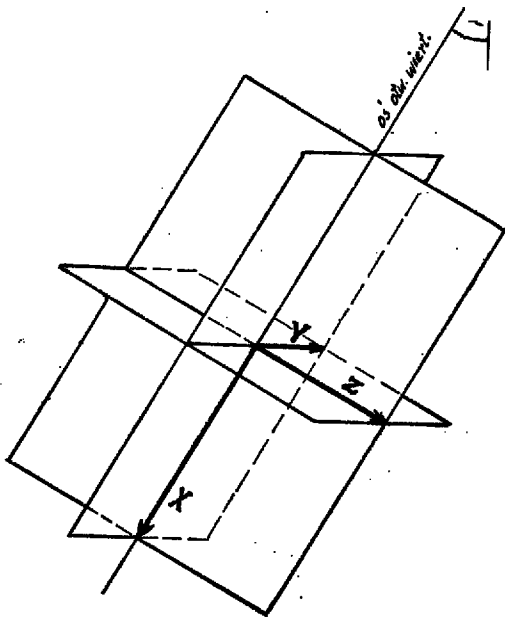
$$\begin{aligned} \text{w przypadku 3a } \varphi_1 &= \alpha + 180^\circ \\ \text{w przypadku 3b } \varphi_2 &= \alpha, \end{aligned}$$

gdzie α — kąt zawarty pomiędzy składową H i Z .

Ażeby wyznaczyć azymut skrzywienia otworu w stosunku do północy geograficznej należy uwzględnić kąt deklinacji, istniejący w danym punkcie odwiertu.

Jak z powyższych rozważań wynika, w przypadku przechodzenia otworu przez skały o niewielkim namagnesowaniu (bliskim zera) wyznaczenie azymutu skrzywienia za pomocą wskazań magnetometru trójskładowego jest dość łatwe i proste. W przypadku jednak przechodzenia otworu przez skały magnetycznie czynne wyznaczenie azymutu skrzywienia otworu tym sposobem jest bardziej skomplikowane, ponieważ należy wyeliminować wpływ kilku czynników powodujących zmianę natężenia wektora normalnego pola magnetycznego.

Rozpatrzmy teraz zagadnienie natężenia pola magnetycznego istniejącego w otworze wiertniczym przechodzącym przez skały magnetycznie czynne. Wartość natężenia pola magnetycznego pomierzona w takim



Ryc. 1. Układ trzech składowych X, Z, Y mierzonych magnetometrem Hetona HBM.

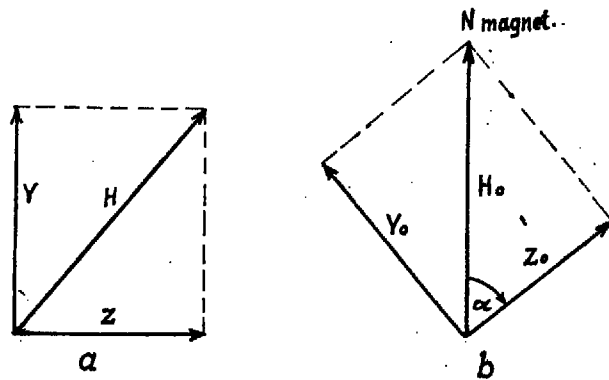
Fig. 1. Arrangement of three coordinates, X, Y, and Z, measured with Heton HBM magnetometer.

odwiercie składa się z wartości normalnego pola ziemskiego H_0 i wartości pola anomального H_a . Z kolei na wartość pola anomального H_a ma wpływ namagnesowanie indukcyjne i resztkowe.

Namagnesowanie indukcyjne przewierconych skał możemy w naszych rozważaniach pominąć, gdyż jego kierunek pokrywa się z kierunkiem normalnego pola ziemskiego. Jak wiemy wywołane jest ono przez magnetyczne pole ziemskie. Namagnesowanie indukcyjne wewnątrz skały ma wpływ na wielkość ogólnego natężenia pola magnetycznego, lecz nie zmienia jego kierunku, natomiast namagnesowanie resztkowe może mieć kierunek różny od indukcyjnego i może zmieniać kierunek ogólnego natężenia pola magnetycznego w różnym stopniu, zależnie od kierunku i wielkości namagnesowania resztkowego skał.

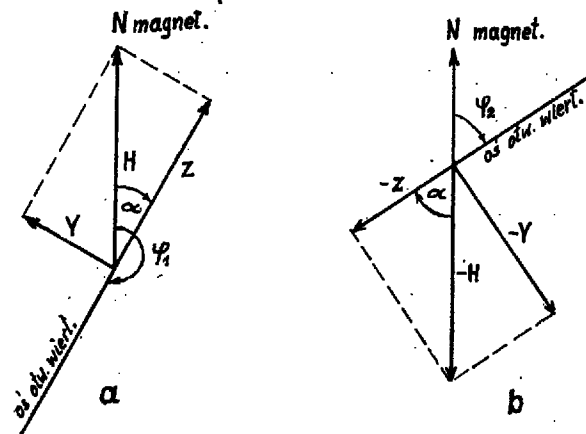
Aby więc wyznaczyć w tym przypadku azymut skrzywienia otworu za pomocą trójskładowego magnetometru musimy znać przede wszystkim wielkość i kierunek natężenia pola przechodzącego od namagnesowania resztkowego, którego wielkość wyznaczamy laboratoryjnie z próbek rdzenia otworu wiertniczego, natomiast kierunku namagnesowania resztkowego nie znamy, ponieważ nie znane jest położenie próbek w otworze. W przypadku, gdy ma ono taki sam kierunek, co namagnesowanie indukcyjne i normalne pole ziemskie, wówczas azymut skrzywienia otworu można łatwo wyznaczyć omawianym sposobem. Często jednak kierunek namagnesowania resztkowego różni się od kierunku namagnesowania indukcyjnego.

Rozważmy wpływ natężenia pola pochodzącego od namagnesowania resztkowego na zniekształcenie normalnego pola ziemskiego. Jeżeli przyjmijemy skrajny przypadek, kiedy wektor natężenia pola pochodzącego od namagnesowania resztkowego jest prostopadły do wektora normalnego pola ziemskiego, to otrzymamy wówczas maksymalne odchylenie natężenia pola ziemskiego wywołane danym namagnesowaniem resztko-



Ryc. 2. Wektor składowej poziomej H wyznaczony z pomierzonych składowych Z i Y.

Fig. 2. Vector of horizontal coordinate, H, estimated on the basis of measured coordinates Z and Y.



Ryc. 3. Przykłady określenia azymutów skrzywienia otworów wiertniczych

a - $Z = 0,13$ jed. CGSM, $Y = 0,07$ jed. CGSM; b - $Z = -0,08$ jed. CGSM, $Y = -0,12$ jed. CGSM.

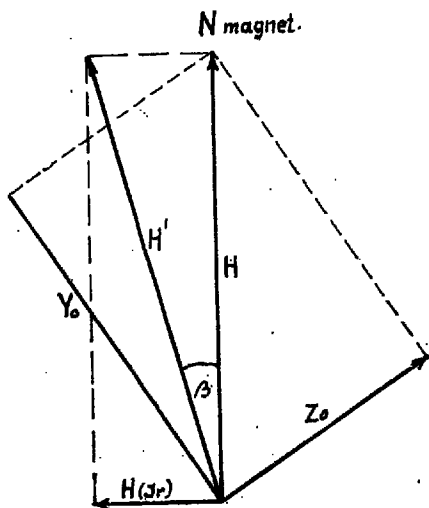
Fig. 3. Example of determinations of borehole curvature azimuths. a - $Z = 0.13$ units CGSM, $Y = 0.07$ units CGSM, b - $Z = -0.08$ units CGSM, $Y = -0.12$ units CGSM.

wym (ryc. 4). Każdy inny kierunek różny od kierunku prostopadłego da odpowiednio mniejsze odchylenie wektora normalnego pola ziemskiego.

Jeżeli przyjmijemy składową poziomą H równą $0,18$ jed. CGSM i założymy, iż natężenie pola H_r pochodzące od bardzo dużego namagnesowania resztkowego skał wynosi $H_r = 0,05$ jed. CGSM i ma kierunek prostopadły do składowej H , to wówczas odchylenie wektora składowej poziomej wyniesie 16° (ryc. 4). A więc w tym przypadku azymut skrzywienia otworu wyznaczony za pomocą magnetometru trójskładowego może być obciążony błędem dochodzącym do 16° .

Przy rozpatrywaniu wartości natężenia pola magnetycznego w otworach wiertniczych należy uwzględnić również dodatkowy wpływ rozmagnesowującego pola ścianek otworu wiertniczego. Pomierzona w otworze wiertniczym składowa pozioma, wynosi:

$$H_{\text{póm.}} = H_{\text{rzecz.}} + H_{\text{roz.}} = H_{\text{rzecz.}} + \frac{2\pi\kappa}{1 + 2\pi\kappa} H_{\text{rzecz.}} = \frac{1 + 4\pi\kappa}{1 + 2\pi\kappa} H_{\text{rzecz.}}$$



Ryc. 4. Odchylenie wektora H pod wpływem natężenia pola pochodzącego od namagnesowania resztkowego H_r .

Fig. 4. Vector H deviation resulting from intensity of field related to relict magnetization H_r .

Na ryc. 5 przedstawiono zależność współczynnika

$$k = \frac{H_{rzecz.}}{H_{pom.}}$$

znając podatność magnetyczną przewierconych skał możemy na podstawie powyższego wykresu wyznaczyć współczynnik k . Aby otrzymać rzeczywiste natężenie pola magnetycznego w każdym punkcie pomiarowym odwiertu należy wyniki składowej poziomej H uzyskane z pomiarów pomnożyć przez współczynnik k . Jeżeli podatność magnetyczna przewierconych skał wynosi $10\,000 \cdot 10^{-6}$ jed. CGSM, to rzeczywista wielkość natężenia pola magnetycznego będzie o 3% mniejsza od wielkości uzyskanej z pomiarów. Natomiast w utworach, gdzie podatność magnetyczna wynosi $1\,000\,000 \cdot 10^{-6}$ jed. CGSM, rzeczywista wartość pola będzie dwa razy mniejsza od pomierzonej.

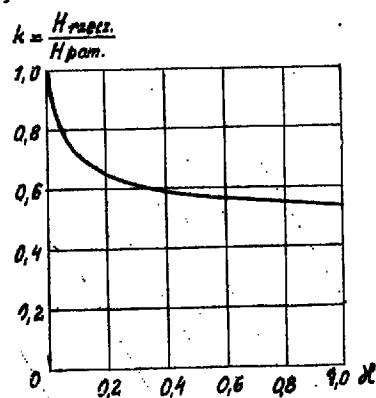
Praktyczne zastosowanie omawianego sposobu wyznaczania azymutu przedstawiono na przykładzie wyników pomiarów wykonanych trójskładowym magnetometrem Hetona HBM III w otworze. Otwór ten spełnia podstawowy warunek, który musi być zachowany, aby można było wyznaczyć azymut tym sposobem, a mianowicie jest odchylony od pionu ponad 3° , zaś w dolnej części otworu odchylenie to wynosi około 16° . Zarejestrowane wartości składowej Z i Y w tym otworze na odcinku od 500 do 770 m przedstawione są na ryc. 6, przy czym składowa Z przeliczona jest do płaszczyzny poziomej. Na ryc. 6 jest także wykres składowej poziomej H i wykres kątów zawartych między wektorami H i Z dla poszczególnych punktów pomiarowych. Wartości składowych Z i Y są dodatnie i wahają się w granicach:

- dla składowej Z od 0,08 do 0,15 jed. CGSM,
- dla składowej Y od 0,15 do 0,20 jed. CGSM.

Średnie z poszczególnych wartości wynoszą:

- dla $Z = 0,113$ jed. CGSM,
- dla $Y = 0,173$ jed. CGSM.

Przy obliczaniu średnich wyeliminowano wartości kilku punktów pomiarowych, znacznie odbiegających od wartości przeciętnych. Te pojedyncze znaczne odchylenia są wynikiem niewielkich koncentracji minerałów ferromagnetycznych, rozproszonych w skałe, głównie magnetytu. Koncentracje te uwidaczniają się także bardzo wyraźnie na wykresie podatności magnetycznej.



Ryc. 5. Wykres do wyznaczania współczynnika k .

Fig. 5. Diagram for determination of coefficient k .

Średnia wartość składowej poziomej H obliczona ze składowych Z i Y wynosi:

$$H = \sqrt{Z^2 + Y^2} \approx 0,2066 \text{ jed. CGSM}$$

Z wykonanych pomiarów podatności magnetycznej i namagnesowania resztkowego wynika, iż skały nawiercone w otworze należy zaliczyć do skał o dość znacznej podatności magnetycznej. Obliczona z całego odcinka rdzenia tego odwiertu średnia wartość podatności magnetycznej wynosi $15\,000 \cdot 10^{-6}$ jed. CGSM, a namagnesowanie resztkowe $11\,000 \cdot 10^{-6}$ jed. CGSM.

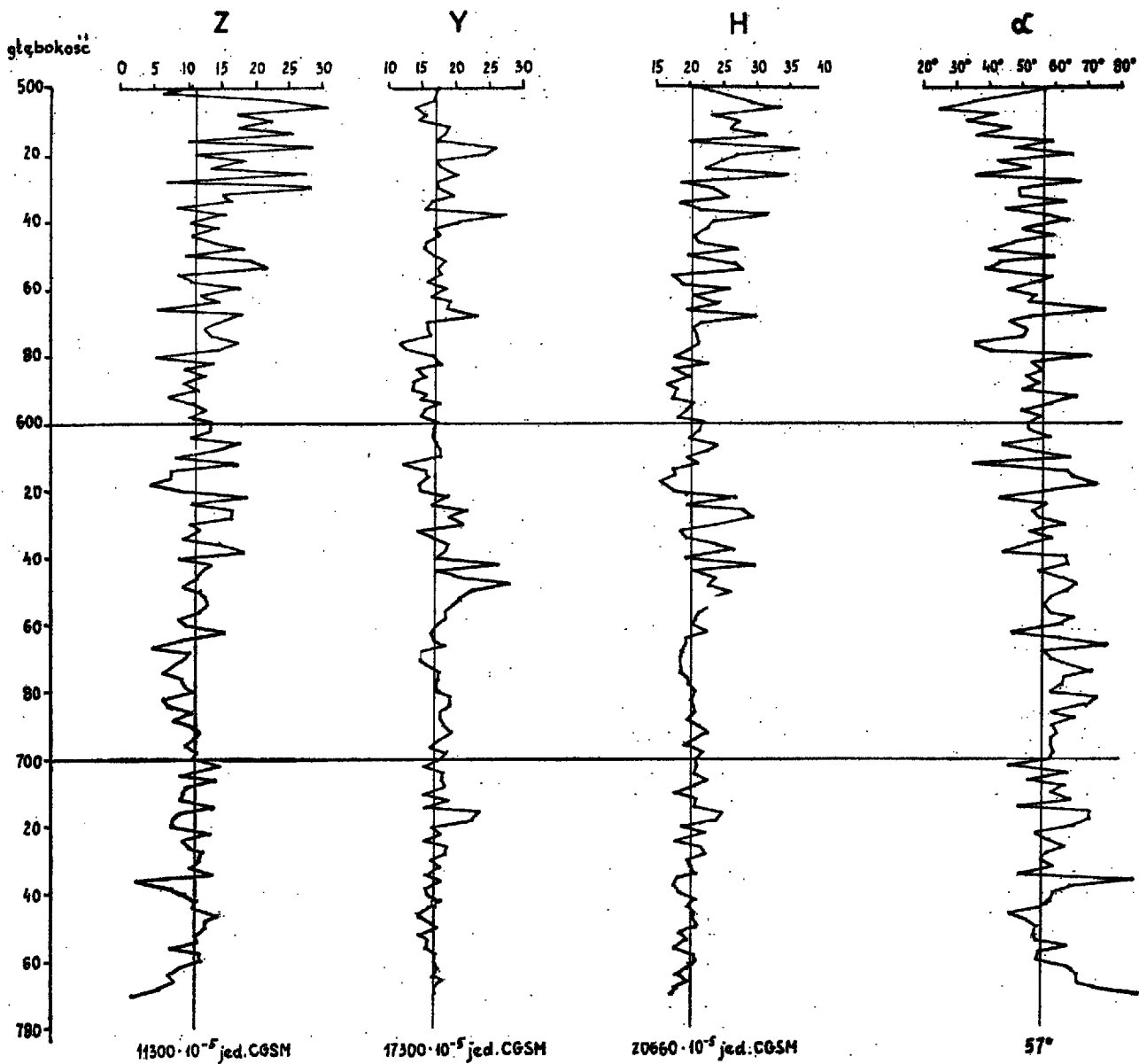
W związku z tym wartość pola magnetycznego zmniejszy się, ze względu na rozmagnesowujące pole ścianek otworu wiertniczego, określone przy wykorzystaniu diagramu (ryc. 5) o około 5%, tj. około 0,0145 jed. CGSM, a zatem rzeczywista wartość składowej poziomej H wynosi około 0,1921 jed. CGSM.

Wartość składowej poziomej normalnego pola ziemskiego w omawianym rejonie wynosi około 0,18 jed. CGSM, natomiast średnia wartość składowej poziomej H obliczona ze 130 wyników uzyskanych z pomiarów wykonanych magnetometrem trójskładowym w otworze na odcinku 500—770 m, po uwzględnieniu pola rozmagnesowującego otworu, wynosi około 0,1921 jed. CGSM.

Z tego wynika, że średnia wartość uzyskana z pomiarów jest większa od wartości rzeczywistej, można to tłumaczyć istnieniem dodatkowego pola magnetycznego o ogólnym kierunku zgodnym z normalnym polem ziemskim. Uśredniony kąt zawarty między wektorami składowej H a odpowiednimi wektorami Z wynosi około 57° (ryc. 7a). Azymut skrzywienia otworu obliczony wg opisanej metody wynosi 237° (ryc. 7b).

Gdybyśmy założyli, że natężenie pola pochodzącego od namagnesowania resztkowego skał przewierconych otworem wynosi $11\,000 \cdot 10^{-6}$ jed. CGSM i posiada najbardziej niekorzystny kierunek, tzn. wektor tego pola jest prostopadły do kierunku normalnego pola ziemskiego, to błąd wyznaczenia azymutu skrzywienia tego odwiertu wynosiłby zaledwie 3° . W otworze na odcinku 630—680 m wykonano pomiary inklinometrem żyroskopowym produkcji czeskiej; typ przyrządu IG-70. Wyniki tych pomiarów przedstawiono obok w tabeli.

Średnia wartość azymutu skrzywienia odwiertu wyznaczonego inklinometrem żyroskopowym na odcinku 630—680 m wynosi 239° , zaś średnia wartość azymutu wyznaczona na podstawie wyników trójskładowego magnetometru z odcinka 500—770 m wynosi 237° .

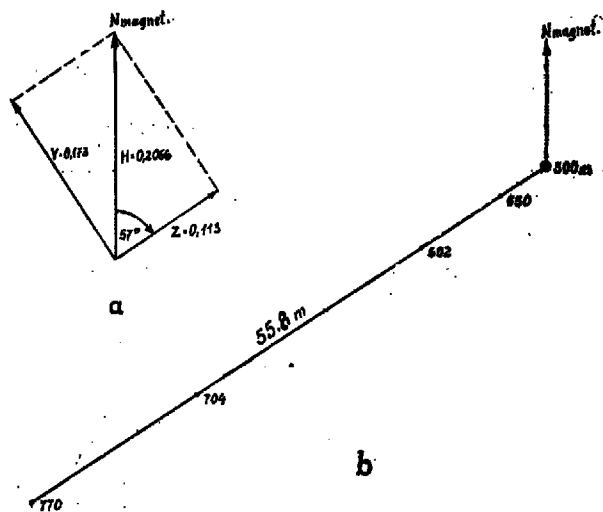


Ryc. 6. Wykresy wartości składowych poziomych Z, Y, H z odwiertu oraz wykres kątów zawartych między składową H i Z.

Fig. 6. Diagrams of values of coordinates, Z, Y, and H, for borehole, and angles formed by coordinates H and Z.

WYNIKI POMIARÓW		
głębokość odwiertu	kąt odchylenia odwiertu od pionu	azymut
630	14°30'	240°
640	16°00'	237°
650	16°15'	244°
660	17°30'	238°
670	17°00'	239°
680	16°15'	239°
Pomiary kontrolne		
640	16°00'	238°
630	15°00'	240°

Z porównania tego wyniku, że za pomocą trójskładowego magnetometru w podobnych warunkach geologicznych można wyznaczyć azymut skrzywienia otworu z dość dużą dokładnością. W przypadku, gdy ośrodek, przez który przechodzi odwiert wykazuje, iż



Ryc. 7. Określenie azymutu skrzywienia otworu wiertniczego.

Fig. 7. Determination of curvature azimuth for borehole.

natężenie pola pochodzącego od namagnesowania resztkowego jest większe lub bliskie wartości składowej poziomej normalnego pola ziemskiego i jego kierunek jest nieznany, wówczas nie możemy wyznaczyć azymutu skrzywienia otworu omiawianym sposobem. Z takim przypadkiem możemy się spotkać przy przechodzeniu odwiertu przez złożę magnetytu.

Jeżeli złożę magnetytu występuje w otoczeniu skał płonnych o małym namagnesowaniu resztkowym, wówczas możemy wyznaczyć azymut skrzywienia omiawianym sposobem w interwałach skał płonnych, np. w anortozytach w rejonie Krzemianki. Azymut wyznaczony w takich warunkach może być obarczony większym błędem, zależnie od miąższości skał płonnych i utworów o bardzo dużym namagnesowaniu.

Trójskładowy magnetometr otworowy ma tę przewagę nad inklinometrem magnetycznym, iż można nim śledzić wzdłuż odwiertu nie tylko wektor wypadkowy (jak przy pomiarach inklinometrem magnetycznym), lecz także zmiany natężenia pola magnetycznego wszystkich trzech składowych. Może to mieć w niektórych przypadkach istotne znaczenie, np. przy wyznaczaniu azymutu skrzywienia odwiertu, gdy kierunek osi odwiertu pokrywa się lub jest zbliżony do kierunku wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego. Przypadek taki możemy stwierdzić tylko za pomocą wskazań trójskładowego magnetometru otworowego.

WNIOSKI

Azymut skrzywienia otworu wiertniczego możemy wyznaczyć trójskładowym magnetometrem, jeżeli odchylenie osi odwiertu od pionu wynosi powyżej 3°. W ośrodku o dużym namagnesowaniu wyznaczenie tego azymutu tą metodą jest mniej dokładne, a wielkość błędów zależy od wielkości i kierunku namagnesowania resztkowego skał.

Jeżeli natężenie pola pochodzące od namagnesowania resztkowego ośrodka, przez który przechodzi od-

SUMMARY

Azimuth of borehole curvature may be determined by the use of tricoordinate borehole magnetometer. Determination of the curvature is fairly in case of non- or low- magnetic media, becoming more complicated and less accurate in case of higher-magnetic media.

The method under discussion cannot be applied for determine curvature azimuths of boreholes passing through a medium of a very high intensity of the field created by relict magnetization, close to that of the horizontal component of normal Earth's magnetic field. Determination of the curvature is possible when the well in this medium also passes through spoil rocks of remarkable thickness and low magnetization.

The method is illustrated on the example of a determination of borehole curvature azimuth; the borehole was drilled through deposits characterized by quite high inductive and relict magnetization.

wiert jest bardzo duże — zbliżone do wartości składowej poziomej normalnego pola ziemskiego — nie można stosować omawianej metody do wyznaczania azymutu skrzywienia. Jest to możliwe jedynie w przypadku występowania w takim ośrodku dość znacznych interwałów skał płonnych o niewielkim namagnesowaniu resztkowym. Jeżeli odwiert przechodzi przez skały niemagnetyczne lub o małym namagnesowaniu można wyznaczyć azymut skrzywienia otworu tą metodą z dokładnością do 5°.

LITERATURA

1. Instrukcja magnetometru otworowego trzech składowych Hetona HBM 2. ABEM Geophysical Instrument Bulletin BM. 0882. Stockholm.
2. Kalwarskaja W. P. — Primienienije karotaża magnitnoj wosprimczivosti dla rieszenija niekotorych geologiczeskich zadacz. Geologiczeskije rezultaty prikladnoj geofizyki. Izd. „Niedra” 1965.
3. Kurbiel H. — Zastosowanie karotażu magnetycznego przy poszukiwaniu i rozpoznawaniu złóż rud żelaza. Prz. geol. 1966, nr 8.
4. Lewanto A. E. — On magnetic measurements in drill-holes. Geoprospection, 1963, nr 2.
5. Pilarzka A., Tałuc S., Oleksiak J. — Wprowadzenie metody karotażu magnetycznego. PPG, Warszawa 1965.
6. Praca zbiorowa pod redakcją Zaborowskiego A. I., Nikitskogo W. E. — Skwaziinnaja magnitorazwedka i magnitnyj karotaż. Sprawocznik geofizyka, t. VI, Moskwa, 1969.
7. Tałuc S. — Aparatura dla karotażu magnetycznego i zagadnienia dokładności metody. Techn. Poszuk. 1967, z. 22.
9. Zuber J. A. — Magnetische Bohrlochmessungen als Hilfsmittel bei der Erzprospektierung. Berg- und Huttenmännische Monatshefte, Stockholm 107 Jahrgang, 1962, H. 8.

РЕЗЮМЕ

По данным измерений трехкомпонентным скважинным магнитометром можно определять азимут искривления буровой скважины. В немагнитной или слабо магнитной среде эта задача выполняется довольно просто, но в среде с большей намагниченностью определения более сложны и менее точны.

Рассматриваемый метод не пригоден для определения азимута искривления скважин, проходящих сквозь среду с большой интенсивностью поля, возникшего за счет остаточного намагничивания, близкой значению горизонтальной составляющей нормального магнитного поля Земли. Возможность такого определения появляется в таких случаях, когда в разрезе скважины имеются мощные интервалы пустых, слабо намагниченных пород.

В статье приведен пример определения азимута искривления скважины проходящей в породах с довольно высоким индукционным и остаточным намагничиванием.