

JEDNOTWOROWE METODY IZOTOPOWE I ELEKTRYCZNE WYZNACZANIA KIERUNKU PRZEPLYWU WÓD GRUNTOWYCH

ZE WZGLĘDU na coraz bardziej wzrastające znaczenie zaopatrzenia w wodę miast i osiedli celowe jest zapoznanie hydrogeologów i geologów z nowoczesnymi metodami badań kierunku przepływu wód gruntowych. Śledzenie i ustalenie ruchu wód podziemnych zarówno płytkiego, jak i dalekiego krążenia ma podstawowe znaczenie przy określaniu bilansu gospodarki wodnej*. Dotychczasowe sposoby określania kierunku spływu wód gruntowych były dość kosztowne i nieraz kłopotliwe w praktyce. Wymagały najmniej trzech otworów obserwacyjnych. W niniejszym artykule przedstawione zostaną wyniki badań określania kierunku przepływu wód gruntowych metodą izotopową i elektryczną, uzyskane na podstawie tylko jednego otworu zafiltrowanego.

METODA IZOTOPOWA WYZNACZANIA KIERUNKU PRZEPLYWU WÓD GRUNTOWYCH

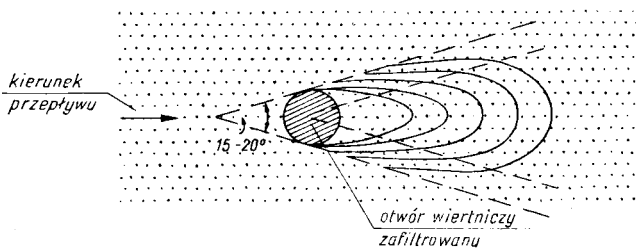
Istotą metody jest fakt stwierdzenia rozpraszania się wskaźnika promieniotwórczego wzdłuż strumienia w formie stożka, którego kąt zmienia się zależnie od uziarnienia gruntu (4, 6). Przeprowadzone na modelu badania wykazały, iż wprowadzony w danym punkcie środowiska gruntowego wskaźnik promieniotwórczy rozchodzi się w granicach od 15° do 20° (ryc. 1). Jeśli zastosować izotop promieniotwórczy nie tylko łatwo rozpuszczalny w wodzie, ale i silnie adsorbowany przez grunt, to przy użyciu kierunkowego oraz obrotowego detektora promieniowania jądrowego można stwierdzić w jednym otworze wyraźnie zwiększoną ilość promieniowania na kierunku przepływu wody gruntowej (ryc. 1).

1. Wyniki pomiarów modelowych. Pierwsze badania kierunku przepływu wody w jednym otworze przeprowadzono na modelu aparaturą typu SSK-62, wy-

* Problem ten jest również zagadnieniem wyjściowym przy odwadnianiu złóż surowców mineralnych, jak i kopalń węgla.

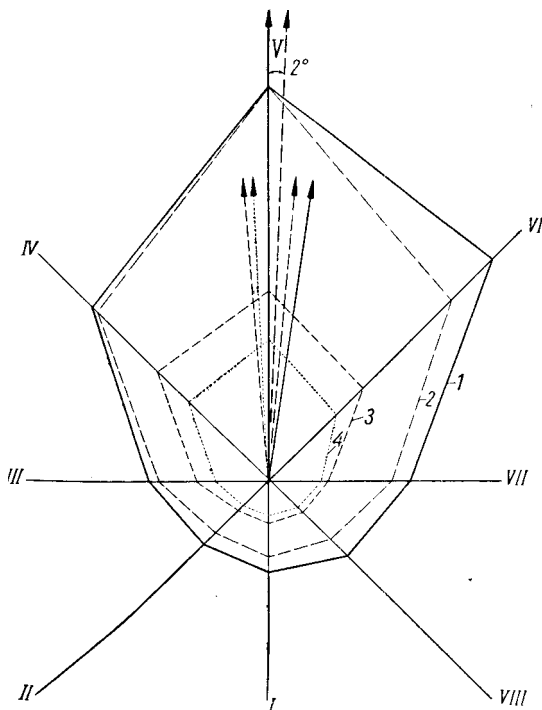
konaną przez Katedrę Fizyki II AGH w Krakowie i podobną do opisanej w pracy Mairhoferera (4). Modelem była skrzynia o wymiarach $2 \times 1 \times 1$ m wypełniona żwirem o granulacji od 1 do 4 mm. Wielkość skrzyni odpowiadała praktycznie naturalnym warunkom. Wewnątrz skrzyni umieszczono na osi podłużnej 3 rury perforowane owinięte siatką. Na modelu można było dowolnie regulować spadek zwierciadła wody. Jako wskaźnika użyto promieniotwórczy jod J^{131} w postaci NaJ o półokresie rozpadu 8 dni. Jod jest dostatecznie adsorbowany przez środowisko gruntowe i może być z powodzeniem stosowany w praktyce.

Sama metodyka pomiarów jest następująca. Na daną głębokość wprowadza się do otworu zafiltrowanego zamkniętą ampulkę z promieniotwórczym jodem J^{131} . Na jeden pomiar kierunku przepływu wystarczy aktywność 0,25—0,50 mC. Następnie w sposób mechaniczny zbija się ampulkę z izotopem. Po odczekaniu pewnego czasu, zależnie od szybkości przepływu wody gruntowej, opuszcza się na żerdziach do otworu izotopową sondę kierunkową o średnicy 50 mm. Sonda kierunkowa połączona jest kablem z urządzeniem rejestrującym przelicznikiem, znajdującym się na powierzchni. Ustawiając detektor promieniowania jądrowego sondy w różnych kierunkach i dociskając go do ścian otworu rejestruje się ilość przekazywanych kablem na powierzchnię impulsów elektrycznych w czasie. Wyniki takich pomiarów, przeprowadzonych na modelu przedstawiają ryc. 2 i 3. Widać bardzo dobrą zgodność między właściwym kierunkiem przepływu (znanym na modelu) a wypadkowym kierunkiem, wyznaczonym metodą izotopową. W pierwszym przypadku odchyłka wynosi 2° , zaś w drugim 5° . Zaadsorbowany izotop jodu był silnie związany przez cząsteczki gruntu, dzięki czemu można było przeprowadzać pomiary kierunku przepływu po upływie dość długiego czasu od chwili zadania izotopu. Celowe jest wykonywać pomiary po upływie pewnego czasu w stosunku do chwili zbitcia ampulki z izotopem. Na ryc. 2 i 3 widać wyraźny



Ruc. 1. Schematyczne przedstawienie odpływu z jednego otworu wiertniczego znaczonego wskaźnikiem promieniotwórczym słupa wody.

Fig. 1. Diagrammatical picture of water outflow from bore hole marked by radioactive index of water column.



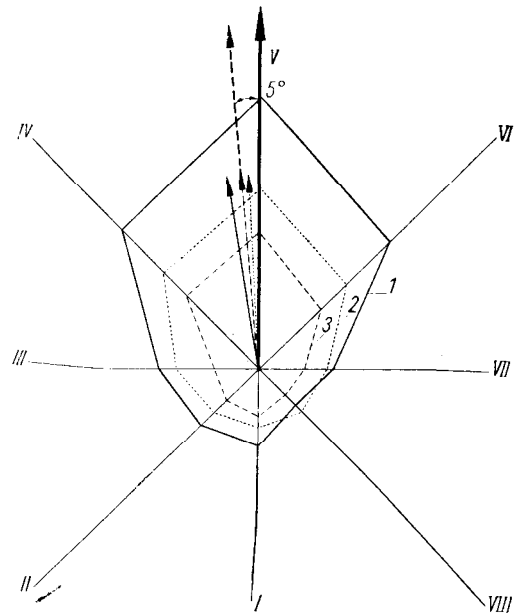
Ryc. 2. Wyniki pomiaru kierunku przepływu w jednym otworze. Skala: 1 cm = 1000 imp. Izotop zadano 1 III 1963 r., godz. 12⁴⁰, użyto 1 mC J¹³¹.

→ rzeczywisty kierunek przepływu. ---→ wypadkowy kierunek wyznaczony metodą izotopową. Wypadkowy kierunek z pomiaru 1 (1.III.63 r. godz. 13⁵⁸), wypadkowy kierunek z pomiaru 2 (1.III.63 r. godz. 18³⁵), wypadkowy kierunek z pomiaru 3 (6.III.63 r. godz. 9⁵⁰), wypadkowy kierunek z pomiaru 4 (9.III.63 r. godz. 9⁰⁰). I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII kierunki pomiaru.

Fig. 2. Results of measurement of flow in one bore hole. Scale: 1 cm = 1000 imp. The isotope was put on March 1, 1963, at 12⁴⁰ h. 1 mC of J¹³¹ was used.

→ actual flow direction, ---→ resultant direction determined by isotope method; resultant direction of measurement 1 (March 1, 1963, at 13⁵⁸ h.), resultant direction of measurement 2 (March 1, 1963, at 18³⁵ h.), resultant direction of measurement 3 (March 6, 1963, at 9⁵⁰ h.), resultant direction of measurement 4 (March 9, 1963, at 9⁰⁰ h.). I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII — directions of measurement.

wzrost ilości impulsów na kierunku przepływu. Stosunek ilości impulsów na kierunku przepływu do ilości impulsów na kierunku przeciwnym wynosi około 4,3:1 (ryc. 2) i około 3,5:1 (ryc. 3). Fakt rejestrowania impulsów na kierunku przeciwnym wynika z niedostatecznego ekranowania sondy. Dla całkowitego



Ryc. 3. Wyniki pomiaru kierunku przepływu w jednym otworze. Skala: 1 cm = 500 imp. (pomiar 1 i 2), 1 cm = 100 imp. (pomiar 3). Izotop zadano 9 III 1963 r. o godz. 12³⁰, użyto 0,25 mC J¹³¹.

→ rzeczywisty kierunek przepływu, ---→ wypadkowy kierunek wyznaczony metodą izotopową. Wypadkowy kierunek z pomiaru 1 (9.III.63 r. godz. 12⁴⁵), wypadkowy kierunek z pomiaru 2 (9.III.63 r. godz. 13¹⁰), wypadkowy kierunek z pomiaru 3 (11.III.63 r. godz. 14³⁵). I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII — kierunki pomiaru.

Fig. 3. Results of measurement of flow direction in one bore hole. Scale: 1 cm = 500 imp. (measurement 1 and 2), 1 cm = 100 imp. (measurement 3). The isotope was put on March 9, 1963, at 12³⁰, 0,25 mC of J¹³¹ was used.

→ actual flow direction, ---→ resultant direction determined by isotope method. Resultant direction of measurement 1 (March 9, 1963, at 12⁴⁵ h.), resultant direction of measurement 2 (March 9, 1963, at 13¹⁰ h.), resultant direction of measurement 3 (March 11, 1963, at 14³⁵ h.). I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII — directions of measurement.

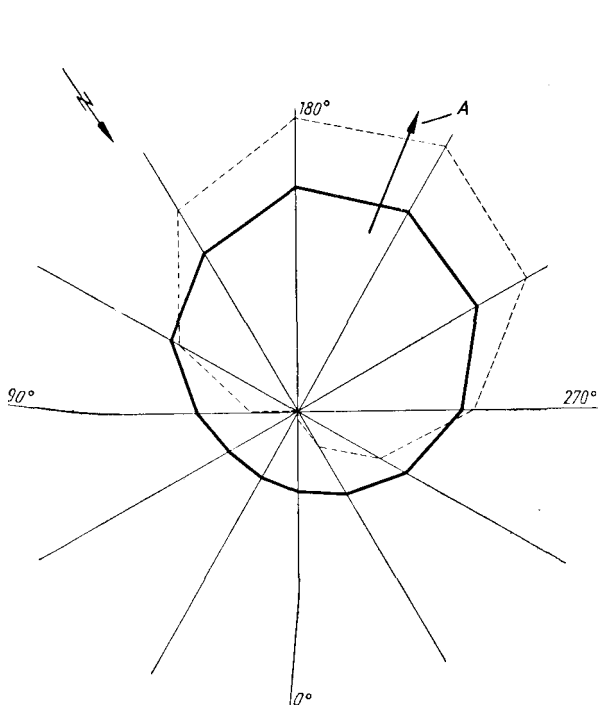
tego wyeliminowania tego zjawiska należałoby pogłębić jeszcze ekran sondy. Wypadkowy kierunek z poszczególnych pomiarów otrzymano, znajdując graficznie wypadkową pomierzonych na danych kierunkach ilości impulsów.

2. Wyniki pomiarów połowych. Terenowe pomiary kierunku przepływu wody gruntowej w jednym otworze przeprowadzono w dolinie Wisły w Jabłonnej koło Warszawy. Na tym terenie założone są piezometry na linii kierunku prostopadłym do Wisły, gdzie prowadzone są codzienne obserwacje wahań zwierciadła wody gruntowej. Wiercenia badawcze do głębokości 10 m od powierzchni terenu stwierdziły następujące utwory holocenyckie:

- 0 — 1,60 m gliny pylaste i pyły,
- 1,60 — 3,50 m piaski średnie,
- 3,50 — 4,50 m piaski średnie ze żwirem (piaski grube),
- 4,50 — 10,50 m pospółka.

Zwierciadło wody znajduje się około 1,30 m poniżej terenu.

W badaniach terenowych wykorzystano doświadczenia modelowe odnośnie do wskaźnika promieniotwórczego oraz ulepszono technikę jego zapuszczania.

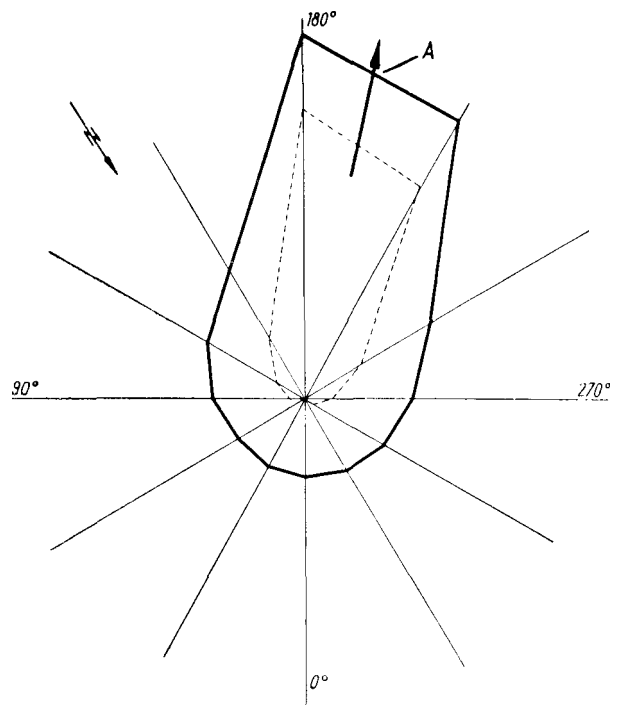


Ryc. 3a. Wyniki pomiarów kierunku przepływu w jednym otworze. „Jabłonna”, piezometr P₂, Izotop J¹³¹ o aktywności 0,66 mC zadano 4 IX 63 r. na głęb. 3,40 m.

— 1 cm = 2000 imp./0,5 min., pomiar kierunku przepływu wody gruntowej dnia 7.XI.63 r., ---- 1 cm = 1000 imp./0,5 min., wyznaczenie kierunku splotu (odjęto „tła”). A — 0° = azymut 32°, kierunek splotu wody gruntowej azymut 234°.

Fig. 3a. Results of measurements of flow direction in one bore hole.

„Jabłonna”, piezometr P₂, Isotope J¹³¹, activity 0,66 mC was put on Nov. 4, 1963, at a depth of 3,40 m. — 1 cm = 2000 imp./0,5 min., measurement of flow direction of ground water, made on Nov. 7, 1963, ---- 1 cm = 1000 imp./0,5 min., determination of flow direction (“background” subtracted). A — 0° = azimuth 32°, flow direction of ground water, azimuth 234°.



Ryc. 3b. Wyniki pomiarów kierunku przepływu w jednym otworze. „Jabłonna”, piezometr P₂ Izotop J¹³¹ o aktywności 0,6 mC zadano dnia 5 XI 63 r. na głęb. 2,65 m.

— 1 cm = 2000 imp./3 min., pomiar kierunku przepływu wody gruntowej dnia 7.XI.63 r., ---- 1 cm = 2000 imp./3 min., wyznaczenie kierunku splotu (odjęto „tła”). A — 0° = azymut 32°, kierunek splotu wody gruntowej, azymut 224°.

Fig. 3b. Results of measurements of flow direction in one bore hole.

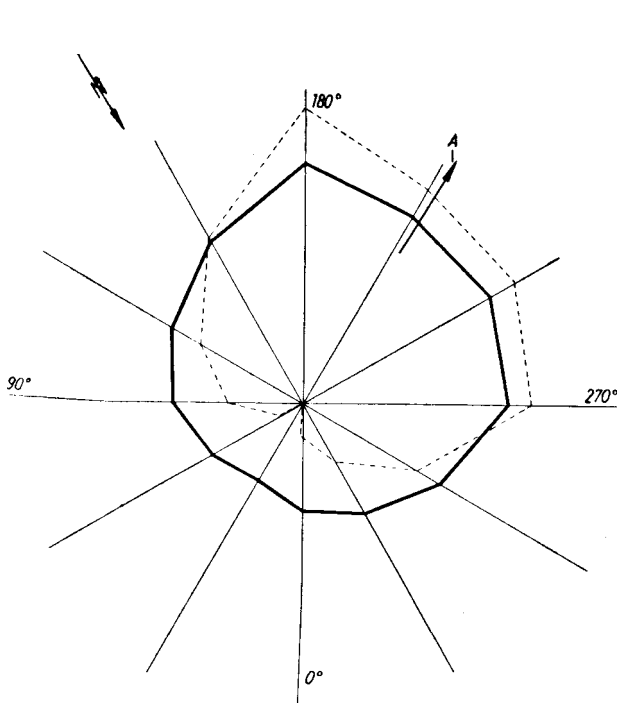
„Jabłonna”, piezometr P₂, Isotope J¹³¹, activity 0,6 mC, was put on Nov. 5, 1963, at a depth of 2,65 m. — 1 cm = 2000 imp./3 min., measurement of flow direction of ground water, made on Nov. 7, 1963, ---- 1 cm = 2000 imp./3 min., determination of flow direction (“background” subtracted). A — 0° = azimuth 32°, flow direction of ground water, azimuth 224°.

Do piezometrów wprowadzano na różne głębokości promieniotwórczy jod J¹³¹ w postaci NaJ. Promieniotwórczy jod o aktywności 0,6—1,0 mC dawkowano do ampulek z wodą (objętość ampulki 15 cm³). Ampulki zamykano korkiem i umieszczano w specjalnym urządzeniu do ich zbijania pod wodą na dowolnej głębokości. Urządzenie to pozwala na szczelne zamknięcie roztworu aktywnego (po zbitiu ampulki) w określonej objętości, dzięki czemu nie następuje opadanie izotopu w dół otworu ani też nie występuje mieszanie się roztworu w kierunku pionowym. W wyniku zamknięcia wprowadzony do piezometru izotop miesza się z wodą na wysokości 25 cm i na tej tylko wysokości jest wynoszony z otworu przez przepływającą wodę gruntową. Opuszczając następnie na żerdziach sondę kierunkową do piezometru można było stwierdzić największą ilość liczonych impulsów elektrycznych na tej głębokości, gdzie roztwór aktywny był zamknięty. Umieszczenie sondy poniżej tej strefy lub powyżej zaznaczało się wielokrotnym zmniejszeniem ilości impulsów.

Określona metodą izotopową prędkość filtracji przy spadkach naturalnych wynosiła w okresie pomiarów 4—7 · 10⁻⁴ cm/sek., tj. 0,35—0,60 m/dobę. Przy tej prędkości filtracji izotop zapuszczano dzień wcześniej przed planowanym pomiarem, tzn. że zbitą ampulkę z izotopem pozostawiano przez całą noc w piezometrze, nie ruszając jej. Niekiedy pomiaru dokonywano dopiero po 2—3 dniach. Czas jednego określenia kierunku wynosił zależnie od ilości reje-

strowanych impulsów od 0,5 do 1,5 godz. Ilość impulsów liczono z błędem statystycznym około 1^o/. Położenie sondy zmieniano co 30°. Na ryc. 3a, 3b, 3c, 3d przedstawiono część wyników terenowych pomiarów kierunku przepływu w jednym otworze w różnych piezometrach i na różnej głębokości. Określone na poszczególnych kierunkach ilości impulsów elektrycznych naniesiono w skali. Następnie po odjęciu „tła” (najmniejsza ilość zarejestrowanych impulsów) od każdej mierzonej ilości impulsów wykreślono graficznie wypadkowy kierunek, oznaczony jako kierunek splotu wody gruntowej. Pomiar prowadzone były przy niskim stanie wód Wisły, odwadniającej badany teren. Określenie kierunku splotu wody gruntowej w piezometrach znajdujących się na profilu prostopadłym do Wisły dało następujące wyniki: o ile w piezometrze znajdującym się w odległości około 700 m od koryta rzeki woda splotu prostopadłe do Wisły, to w miarę zbliżania się do rzeki kierunki splotu stają się coraz bardziej równoległe do kierunku płynięcia Wisły. Również porównanie tych danych z wynikami uzyskanymi metodą elektryczną określania kierunku przepływu wody gruntowej w tym rejonie w 1962 r. dało bardzo dobrą zgodność (patrz dalsza część artykułu).

3. Dyskusja i wnioski. Przeprowadzone badania wykazały, że określanie kierunku przepływu wody gruntowej metodą izotopową dało bardzo dobre wyniki. Metoda ta jest ostatnim osiągnięciem techniki (4)



Ryc. 3c. Wyniki pomiarów kierunku przepływu w jednym otworze „Jabłonna”, studnia S_0 . Izotop J^{131} o aktywności 0,92 mC zadano dnia 6 XI 63 r. na głęb. 5,80 m.

— 1 cm = 2000 imp./2 min., pomiar kierunku przepływu wody gruntowej dnia 7.XI.63 r., ---- 1 cm = 1000 imp./2 min., wyznaczenie kierunku splotu (odjęto „tło”). A — 0° = azymut 35°, kierunek splotu wody gruntowej, azymut 247°.

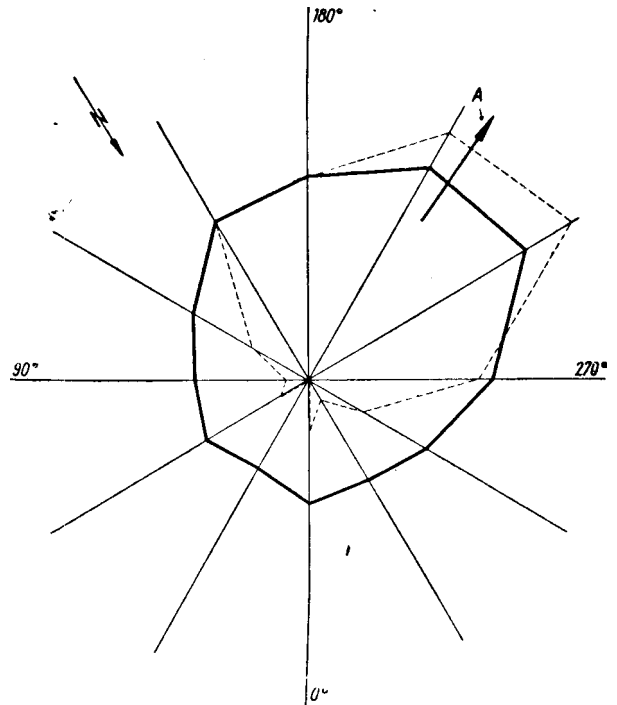
Fig. 3c. Results of measurements of flow direction in one bore hole.

„Jabłonna”, well S_0 , Isotope J^{131} , activity 0,92 mC was put on Nov. 6, 1963, at a depth of 5,80 m. — 1 cm = 2000 imp./2 min., measurement of flow direction of ground water, made on Nov. 7, 1963, ---- 1 cm = 1000 imp./2 min., determination of flow direction (“background” subtracted). A — 0° = azimuth 35°, flow direction of ground water, azimuth 247°.

i ma przed sobą szerokie możliwości praktycznego zastosowania. Dotychczas do wyznaczenia kierunku przepływu wody gruntowej w jednym punkcie terenu potrzeba było kilka otworów. Obecnie dzięki tej metodzie można te same otwory zlokalizować na większej powierzchni i określić kierunek przepływu wód gruntowych dla całego badanego terenu. Efekty ekonomiczne są tu łatwe do ustalenia niezależnie od możliwości zupełnie nowych kierunków badań.

Pomiar kierunku przepływu wody gruntowej może być praktycznie wykonywany na dowolnej głębokości. Do głębokości 20 m od powierzchni terenu można obracać sondę kierunkową za pomocą żerdzi. Dla większych głębokości konieczne będzie opracowanie nowego rozwiązania sondy, które umożliwi określenie położenia detektora promieniowania jądrowego za pomocą układu elektrycznego lub innego.

Możliwość określania kierunku przepływu wód gruntowych na różnych głębokościach stwarza okazję śledzenia ruchu wód gruntowych zarówno płytkiego, jak i dalekiego krążenia w czasie. Dla połowych badań kierunku przepływu wód gruntowych można z powodzeniem stosować promieniotwórczy jod J^{131} . Gdy będzie zachodzić potrzeba pomiaru kierunku w dość krótkich interwałach czasu należy stosować promieniotwórczy sód Na^{24} o półokresie rozpadu 15 godzin. Krótkotrwały sód Na^{24} pozwala już po 4 dobach przeprowadzać następną serię badań, gdyż po tym czasie jego aktywność spadnie prawie do war-



Ryc. 3d. Wyniki pomiaru kierunku przepływu w jednym otworze „Jabłonna”, piezometr P_{13} . Izotop J^{131} o aktywności 0,5 mC zadano dnia 7 XI 63 r. na głęb. 2,20 m.

— 1 cm = 2000 imp./0,5 min., pomiar kierunku przepływu wody gruntowej dnia 8.XI.63 r., ---- 1 cm = 1000 imp./0,5 min., wyznaczenie kierunku splotu (odjęto „tło”). A — 0° = azymut 32°, kierunek splotu wody gruntowej, azymut 247°.

Fig. 3d. Results of measurement of flow direction in one bore hole.

„Jabłonna”, piezometr P_{13} , Isotope J^{131} , activity 0,5 mC was put on Nov. 7, 1963, at a depth of 2,20 m. — 1 cm = 2000 imp./0,5 min., measurement of flow direction of ground water, made on Nov. 8, 1963, ---- 1 cm = 1000 imp./0,5 min., determination of flow direction (“background” subtracted). A — 0° = azimuth 32°, flow direction of ground water, azimuth 247°.

tości „tła”. Zależnie od warunków geologicznych również inne pierwiastki promieniotwórcze mogą znaleźć praktyczne zastosowanie.

Konieczne do pomiaru kierunku aktywności izotopu rzędu 0,25–0,5 mC nie przedstawiają szczególnego niebezpieczeństwa zarówno dla prowadzącego badania, jak i otoczenia. Badania prowadzić może tylko osoba posiadająca odpowiednie przeszkolenie w zakresie stosowania izotopów promieniotwórczych (Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie prowadzi takie szkolenie).

Porównując metodę izotopowego wyznaczenia kierunku przepływu wody gruntowej w jednym otworze z metodą elektryczną należy stwierdzić, iż metody te powinny się wzajemnie uzupełniać. Metoda izotopowa rozwiązuje m.in. całkowicie sprawę pomiaru kierunku przepływu w rejonach zabudowanych i trudno dostępnych, gdyż ogranicza się wyłącznie do otworu, w który zapuszczono izotop promieniotwórczy. Elektryczna metoda określania kierunku przepływu wody gruntowej wymaga pewnego obszaru dla wytyczenia kierunków pomiarowych i uzziemienia elektrod. Jej zastosowanie zdało z powodzeniem egzamin do głębokości 20–30 m od powierzchni gruntu. Metoda izotopowa wyznaczenia kierunku przepływu wody gruntowej nie ma tych ograniczeń. Pozostaje tylko do rozwiązania sposób określania azymutu detektora promieniowania jądrowego sondy kierunkowej dla większych głębokości. Przygotowa-

nia do pomiaru kierunku przepływu w metodzie izotopowej są mniej czasochłonne.

Koszt prototypu zastosowanej aparatury izotopowej do pomiaru kierunku przepływu metodą izotopową wyniósł około 60 000 zł. Przy seryjnej produkcji aparatury będzie on znacznie niższy. W porównaniu z aparaturą do pomiaru kierunku przepływu metodą elektryczną jest on jednak znaczny i wymaga dodatkowo odpowiednio przeszkolonego w zakresie stosowania izotopów promieniotwórczych personelu. Rekompensuje ten fakt uniwersalność metody izotopowej pomiaru kierunku przepływu wody gruntowej.

ELEKTRYCZNA METODA OKREŚLANIA KIERUNKU PRZEPIYWU WÓD PODZIEMNYCH

1. Wprowadzenie. Metoda ta znana jest pod nazwą metody naładowanego ośrodka. Powstała ona wraz z rozwojem badań elektrooporowych. Początkowo stosowana była do określania konturów złóż o wysokim przewodnictwie elektrycznym. Następnie wykorzystano ją przy wyznaczaniu kierunku, jak i prędkości przepływu wód, mając do dyspozycji jeden otwór wiertniczy.

Ogólne zasady tej metody, stosowanej do jednoczesnego zazwyczaj wyznaczania zarówno kierunku, jak i prędkości przepływu wód, są znane z szeregu opracowań (2, 7, 8, 9). Niemniej ostatnie badania teoretyczne i doświadczalne metodę tę znacznie uściśliły, stwarzając możliwość dokładnego określania prędkości przepływu. W świetle tych badań przedstawione zostaną wyniki pomiarów terenowych oraz ich interpretacja.

W dużym skrócie metodyka pomiaru kierunku i prędkości jest następująca. W otwór wiertniczy na głębokość badanej warstwy wodonośnej umieszcza się woreczek z solą, w którym znajduje się jedna z elektrod zasilających. Drugą elektrodę uziemia się na powierzchni w odległości od otworu 20–50 razy większej od głębokości zapuszczenia pierwszej elektrody. Roztwór solny w znaczny sposób zwiększa przewodnictwo elektryczne tej warstwy w otoczeniu otworu. Jeśli woda przepływa w jakimś kierunku strefa zwiększonego przewodnictwa wydłuża się w tym kierunku. Badając rozkład pola elektrycznego na powierzchni ziemi w otoczeniu otworu obserwuje się wydłużenie linii ekwipotencjalnych w kierunku przepływu wody. Prędkość przepływu można określić znając zależność między prędkością przesuwania się elektrolitu, a prędkością przesuwania się linii pola na powierzchni ziemi.

W pierwszym etapie rozwoju tej teorii przyjmowano (10), iż strefa wysokiego przewodnictwa elektrycznego oraz zarurowanie otworu przedstawiają jednorodnie naładowany ekwipotencjalny przewodnik. Na tej podstawie można było otrzymać wzory dla określenia prędkości. Jednak otrzymanywne liczne wyniki badań eksperymentalnych nie potwierdzały wyżej wspomnianej teorii. Okazało się mianowicie, że prędkość przesuwania się linii ekwipotencjalnych w kierunku przepływu wody nie dąży z czasem obserwacji do jakiejś wartości stałej, lecz coraz bardziej maleje. Powstała więc konieczność modyfikacji założeń, na podstawie których wyznaczano prędkość przepływu.

2. Zarys teorii przewodników niekwipotencjalnych. Nowym etapem zbliżenia się do rzeczywistych warunków zachodzących (po wprowadzeniu elektrolitu do filtrującej wody) na danej głębokości jest wykorzystanie teorii przewodników niekwipotencjalnych do określania prędkości przepływu wód gruntowych (5).

Na podstawie dokładnych doświadczeń modelowych okazało się możliwe aproksymowanie (z dokładnością wystarczającą dla celów praktycznych) strefy elektrolitu cienką płytką, która jednym końcem styka

się z filtrem otworu. Jeśli długość płytki wynosi l , wysokość h , a grubość d , to potencjał w odległości x od otworu na płytce wynosi:

$$u = I_1 \sqrt{\frac{\rho \cdot \rho_0}{2\pi d \cdot h} \ln 4 \frac{l}{h}} \cdot \operatorname{ch} \lambda_1 \left(1 - \frac{x}{l}\right) \dots [1]$$

gdzie I_1 — natężenie prądu doprowadzanego do płytki,
 ρ_0 — opór właściwy płytki,
 ρ — opór właściwy gruntu.

$$\lambda_1 = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot h \cdot 2\pi}{\rho \cdot d \cdot \ln 4 \frac{l}{h}}} \dots [2]$$

Potencjał wyrażony przez wzór [1] przedstawia funkcję malejącą wraz z odległością x . Tym szybciej ta funkcja maleje im większa jest wartość λ_1 , czyli im większy jest stosunek $\rho_0 : \rho$ dla stałych parametrów płytki. Podobna aproksymacja zastosowana jest do uwzględnienia obecności otworu, z tym że zamiast płytki przyjmuje się rurę jako nieekwipotencjalny przewodnik. Znając rozkład potencjału na przewodniku poziomym i pionowym można znaleźć wartość potencjału U na powierzchni ziemi w punkcie $P(x_1, y_1, z_1)$, pochodzącą od tych przewodników uważanych za liniowe:

$$u = \frac{I \rho}{2\pi} \left[\frac{\alpha \cdot \lambda_1}{l \cdot \operatorname{sh} \lambda_1} \int_0^l \frac{\operatorname{ch} \lambda_1 \left(1 - \frac{x}{l}\right) dx}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + y_1^2 + z_1^2}} + \frac{(1 - \alpha) \lambda_2}{H \cdot \operatorname{sh} \lambda_2} \int_0^H \frac{\operatorname{ch} \lambda_2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) dz}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + (z_1 - z)^2}} \right] \dots [3]$$

gdzie α — współczynnik określający część całkowitego prądu I spływającego po przewodniku poziomym,

H — długość przewodnika pionowego,

zaś λ_2 wyraża wzór:

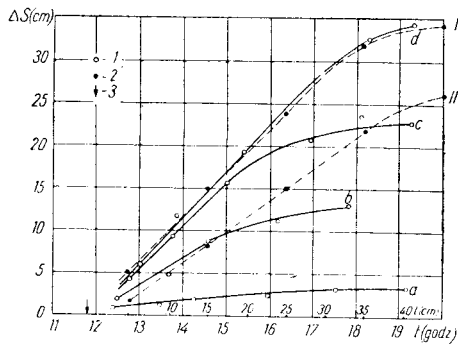
$$\lambda_2 = \frac{H}{d} \sqrt{\frac{\rho_0^* \cdot d_2 \cdot 4}{\rho \cdot \Delta d \cdot \ln 4 \frac{H}{d_2}}} \dots [4]$$

gdzie ρ_0^* — opór właściwy materiału rury,

d_2 — zewnętrzna średnica rury,

Δd — podwójna grubość ścianek rury.

Matwiejew (5) obliczył na podstawie wzoru [3] zależność przesunięcia czoła linii ekwipotencjalnych od zmian długości przewodnika poziomego dla jednej wartości H i różnych l/h . Następnie wyniki te zestawil z danymi z przeprowadzonych doświadczeń modelowych. Rezultaty tych prac przedstawia ryc. 4. Na osi rzędnych odłożone są przesunięcia czoła linii ekwipotencjalnych, a na osi odciętych długości przewodnika poziomego l oraz czas obserwacji. Krzywe teoretyczne obliczone są dla przypadków: 1) gdy $ON/H = 1$ i 2) gdy $ON/H = 0,5$, gdzie ON jest odległością stałej elektrody pomiarowej od otworu. Z ryc. 4 widać, że krzywe zależności przedstawiają w pierwszej swej części odcinki prostych, dalej dążą do pewnej wartości stałej, czyli prędkość przesuwania się czoła linii ekwipotencjalnych dąży do zera.



Ryc. 4. Zależność wielkości przesunięć izoliny od czasu obserwacji (wg B. K. Matwiejewa).

1 — krzywe doświadczalne, 2 — krzywe teoretyczne, 3 — moment w d... 1... t... l... d... t... w... d... lu; a — krzywe dla izoliny ON : H = 0,25, b — ON : H = 0,5, c — ON : H = 0,75, d — ON : H = 1,0.

Fig. 4. Dependency of displacement magnitude of isolines upon time of observation (after B. K. Matwiejev).

1 — experimental curves, 2 — theoretical curves, 3 — moment of input of electrolyte into the orifice of a model; a — curves for isolines ON : H = 0,25, b — ON : H = 0,5, c — ON : H = 0,75, d — ON : H = 1,0.

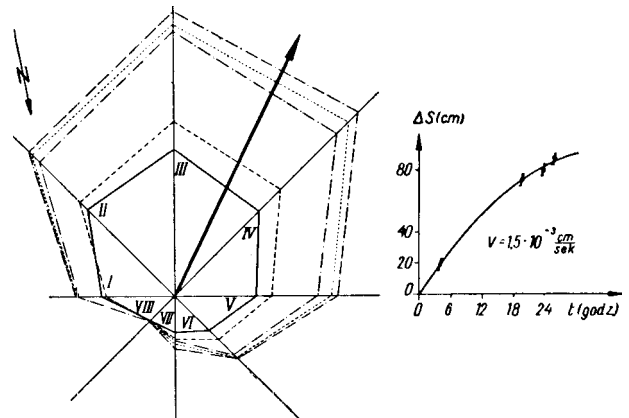
Krzywa teoretyczna bardzo dobrze pokryła się z eksperymentalną dla $ON/H = 1$. Zestawienie krzywych II i b) dla przypadku $ON/H = 0,5$ wskazuje, że krzywe te pokrywają się tylko w pierwszej lewej ich części, natomiast dalej wykazują dość duże rozbieżności. Z tego wynika, iż wpływ rur metalowych na izoliny rzebie a ce w obliżu otworu jest znaczny i że teoria powyższa uwzględnia go w niedostateczny sposób. Najważniejsza jednak jest zgodność teorii z doświadczeniem dla przypadków, gdy wpływ zarurowania można pominąć, czyli dla $ON/H = 1$. Warunek ten w olbrzymiej większości przypadków łatwo osiągnąć.

Z analizy przytoczonych tu w skrócie danych Matwiejewa wyciąga wnioski następujące: a) nie można określać prędkości przepływu na podstawie przesunięć środków izoliny (co było dotychczas praktykowane), b) prędkość należy określać z krzywych zależności przesunięć czoła linii ekwipotencjalnych od czasu obserwacji, biorąc pod uwagę jedynie początkowe prostoliniowe odcinki tych krzywych.

3. Wyniki pomiarów terenowych. Metodą tą wykonano szereg pomiarów w różnych warunkach geologicznych. Przy interpretacji wyników uwzględniane były wnioski przedstawionej teorii. Latem 1962 r. wykonano pomiary w dolinie Wisły w Jabłonie. Strop warstwy wodonośnej znajdował się tu 1,50 m poniżej powierzchni terenu. Zadaniem tej metody było przede wszystkim określenie kierunku spływu wody podziemnej. Ryc. 5 przedstawia wyniki jednego z takich pomiarów. Miejscem pomiaru był piezometr winidurowy $P_{20} \phi = 3$. Pomiar wykonano na głębokości 4,30 m. Stosunek $ON/H = 1,45$. Sól wprowadzana była na daną głębokość w woreczku długości 0,5 m. W trakcie wypłukiwania przez płynącą wodę sól była uzupełniana. W tabeli podane są wielkości przesunięć izoliny na poszczególnych kierunkach w odniesieniu do izoliny pomierzonej przed wprowadzeniem elektrolitu (tło). Po wykreśleniu przebiegu izoliny w odpowiedniej skali wyznaczony został kierunek maksymalnego przesunięcia ostatniej pomierzonej izoliny, czyli tzw. czoło. Maksymalne przesunięcie utożsamiano z wypadkową sumy wektorów, uważając pomierzone przesunięcia izoliny za odpowiednio skierowane wektory. Kierunek spływu wody, to właśnie wypadkowa tych przesunięć.

Dla wyznaczenia prędkości przepływu wykreślono zależność przesunięć ΔS od czasu obserwacji t dla

Kier.	Dane pomiarowe			
	Δr_1 (cm)	Δr_2 (cm)	Δr_3 (cm)	Δr_4 (cm)
I	3	14	15	17
II	7	43	49	52
III	18	75	80	87
IV	19	69	80	89
V	10	39	48	52
VI	6	22	25	25
VII	4	5	7	10
VIII	0	0	0	0



Ryc. 5. Wykres zmian izoliny potencjału elektrycznego w skali 1 : 20.

— tło (naniesione różnice $r_i - 600$), ---- pomiar po czasie 3 godz. 55 min., -.-.- pomiar po czasie 20 godz. 40 min., pomiar po czasie 24 godz. 5 min., -.-.-.- pomiar po czasie 26 godz. 45 min., → kierunek spływu wody.

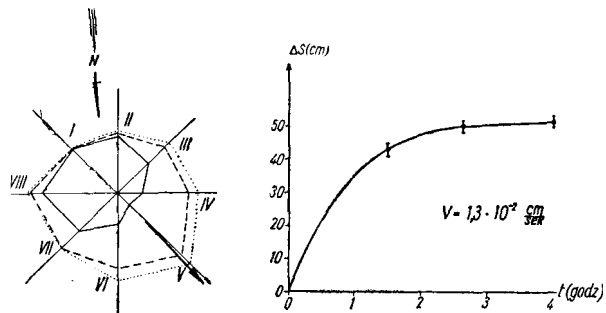
Fig. 5. Diagram of changes of electrical potential isolines, in scale 1 : 20.

— background (differences $r_i - 600$ are given), ---- measurement after 3 hours and 55 min., -.-.- measurement after 20 hours and 45 min., → flow direction of waters.

kierunku o największych pomierzonych przesunięciach. Długości odcinków, których środek odpowiada wartości pomierzonych przesunięć izoliny, oznaczają błąd pojedynczego pomiaru dla danego urządzenia pomiarowego. W naszym przypadku błąd ten wynosi ± 2 cm. Prędkość wyznaczono z nachylenia początkowej prostoliniowej części krzywej. Dla wyznaczenia kierunku spływu wody na tym obszarze wykonano pomiary w trzech otworach odległych od siebie o kilka metrów. Wyznaczone z tych pomiarów azymuty kierunku spływu wody były następujące: $P_1 - 232^\circ$, $P_2 - 220^\circ$, $S_0 - 229^\circ$.

Z rozrzutu wyników widać, że określenie kierunku tą metodą jest dosyć dokładne. Kierunek ten został potwierdzony przez pomiary wskaźnikowe w dwóch otworach zlokalizowanych na wyznaczonym kierunku spływu. Dla sprawdzenia dokładności wyznaczenia kierunku wykonano również następujące pomiary: w piezometrze oddalonym o 3,40 m od otworu, gdzie odbywało się pompowanie wykonano pomiar kierunku, który w tym przypadku był jednoznacznie dany. Wyznaczony kierunek niemal zupełnie pokrył się z rzeczywistym, co przedstawiono na ryc. 6. Ciekawie wygląda zależność ΔS od czasu obserwacji; wyraźnie widać zbieżność ΔS do pewnej wartości stałej.

Kier.	Dane pomiarowe		
	$\Delta r_1(\text{cm})$	$\Delta r_2(\text{cm})$	$\Delta r_3(\text{cm})$
I	0	0	0
II	2	3	4
III	13	17	17
IV	28	34	34
V	43	50	51
VI	27	33	34
VII	14	14	14
VIII	7	9	7



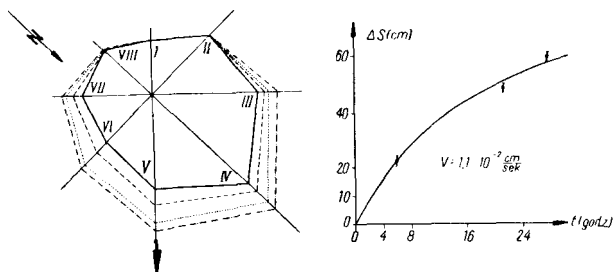
Ryc. 6. Wykres zmian izolinii potencjału elektrycznego w skali 1 : 20.

— tło (naniesione różnice $r_1 - 150$), ---- pomiar po czasie 1 go z. 20 min., pomiar po czasie 2 godz. 40 min., → wyznaczony kierunek spływu wody, → rzeczywisty kierunek spływu wody.

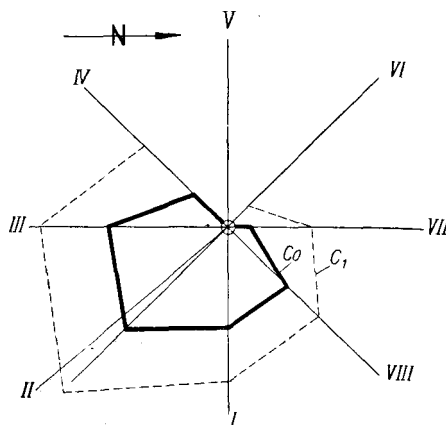
Fig. 6. Diagram of changes of electrical potential isolines, in scale 1 : 20.

— background (differences $r_1 - 150$ are given), ---- measurement after 1 hour and 30 min., measurement after 2 hours and 40 min., → determined direction of water flow, → actual direction of water flow.

Kier.	Dane pomiarowe		
	$\Delta r_1(\text{cm})$	$\Delta r_2(\text{cm})$	$\Delta r_3(\text{cm})$
I	0	0	0
II	0	0	0
III	3	17	28
IV	13	36	50
V	23	49	60
VI	21	45	50
VII	12	23	27
VIII	0	4	4



nr-y azymutów	przed zasoleniem	27 godz.
I	35.50	38.16
II	35.00	42.37
III	36.60	39.96
IV	32.90	36.42
V	30.20	30.20
VI	29.10	31.47
VII	31.30	34.43
VIII	34.60	36.98



Ryc. 8. Pomiar kierunku i prędkości filtracji wody, studnia Maków, głębokość 13 m.

→ kierunek spływu wody, — tło (naniesione różnice $r_i - 32,20$), ---- pomiar po czasie 27 godz. $t_0 = 1230 - 14.XII.1961$ r., $t_1 = 1550 - 15.XII.1961$ r.

Fig. 8. Measurement of direction and rate of water filtration; Maków well, depth 13 m.

→ direction of water flow, — background (differences $r_i - 32,20$ are given), ---- measurement after 27 hours, $t_0 = 1230$ Dec. 14, 1961, $t_1 = 1550$ Dec. 15, 1961.

Ryc. 7 podaje jeden z pomiarów kierunku i prędkości przepływu wody w dolinie rzeki Koszarawa w okolicy Żywca. Pomiar wykonano na głębokości 3,80 m, gdzie warstwę wodonośną tworzyły pospółki z otoczkami i glinami. Wyznaczony kierunek był prostopadły do rzeki, a prędkość wynosiła $1,1 \cdot 10^{-2}$ cm/sek. Ryc. 8 przedstawia przykład pomiaru wykonanego w skrasowiowych wapieniach w okolicach Miechowa. Głębokość pomiaru wynosiła 13 m. Z przyczyn technicznych zdjęto tylko jedną izolinię po zasoleniu, co dla dokładnego określenia

Ryc. 7. Wykres zmian izolinii potencjału elek r cznego w skali 1 : 40.

— tło (naniesione różnice $r_1 - 700$), ---- pomiar po czasie 6 godz., pomiar po czasie 21 godz. 20 min., - - - - - pomiar po czasie 27 godz. 20 min., → kierunek spływu wody.

Fig. 7. Diagram of changes of electrical potential isolines, in scale 1 : 40.

— background (differences $r_1 - 700$ are given), ---- measurement after 6 hours, measurement after 21 hours and 20 min., - - - - - measurement after 27 hours and 20 min., → direction of water flow.

prędkości jest niewystarczające, gdyż nie można uchwycić prostoliniowego odcinka zależności ΔS od czasu obserwacji. Należy jednak zwrócić uwagę na wielkość przesunięć izolinii. W ciągu 27 godz. wynosiły one na kierunku spływu 4,37 m.

4. Dyskusja i wnioski. Doświadczenia wykazały, że badanie kierunku spływu wód podziemnych metodą naładowanego ośrodka nie budzi żadnych wątpliwości i dla pierwszych horyzontów wodnych przy zachowaniu prawidłowej metodyki może być stosowane z powodzeniem do głębokości 20—30 m, a nawet jak wykazały doświadczenia radzieckie (7) w sprzyjających warunkach geologicznych do prawie 100 m. Wyniki są tym bardziej efektywne im prędkości przepływu są większe. Przy małych prędkościach zasięg tej metody znacznie się zmniejsza.

Dla wyznaczenia kierunku spływu wody należy wykreślać wypadkową sumy wektorów pomierzonych przesunięć izolinii. Wypadkowa ta daje kierunek maksymalnych przesunięć izolinii pola elektrycznego, co odpowiada szukanemu kierunkowi spływu wody.

Należy również podkreślić, iż przy wyznaczaniu prędkości przepływu teoria przewodników nieekwi-potencjalnych bardziej odzwierciedla rzeczywiste warunki zachodzące w warstwie wodonośnej po jej zasoleniu niż to czyniły poprzednie ujęcia. Wobec tego w pomiarach połowych należy zwracać uwagę na częstsze wykonywanie zdjęć izolinii zaraz po wprowadzeniu elektrolitu do otworu, chodzi bowiem o uchwycenie pierwszej prostoliniowej części krzywej, przedstawiającej zależność przesunięć izolinii od czasu obserwacji. Nachylenie tego odcinka wyznacza wartość prędkości.

Pomiar prędkości tą metodą może być stosowany do określenia prędkości większych niż $3 \cdot 10^{-4}$ cm/sek., ponieważ przy tej wartości wpływ dyfuzji soli w wodzie staje się porównywalny (1). Dla uniknięcia wpływu otworu na przebieg izolinii pola należy przyjmować stosunek odległości stałej elektrody pomiarowej do głębokości badanej warstwy wodonośnej większy od jedności. Zakres stosowania tej metody jest dosyć szeroki. Szczególnie nadaje się ona do badania kierunku i prędkości pierwszych wód czwartorzędowych. Zaleca się również jej stosowanie w rejonach górskich, gdzie są znacznie większe szybkości przepływu wód podziemnych. Ma to duże znaczenie przy określaniu warunków hydrogeologicznych dla zapór wodnych, zbiorników itp.

Stosowanie tej metody zachęcające jest również ze względów ekonomicznych. Na niskie koszty rzutuje fakt, że niewymagane jest używanie specjalnej czułej aparatury. Część badań autorzy wykonali przy użyciu jako przyrządu pomiarowego zwykłego miliwoltomierza. Jako źródło prądu wystarczy bateria anodowa. Wobec tego liczą się tylko koszty robocizny. Ponieważ jeden pomiar wykonuje dwóch ludzi (operator i pomocnik) w ciągu jednego lub najwyżej dwóch dni, więc koszt jest oczywiście znikomy. Takich pomiarów można wykonać kilka w tym samym czasie, jeżeli otwory znajdują się w pobliżu.

Autorzy wyrażają podziękowanie prof. L. Jurkiewiczowi, mgr inż. A. Zuberowi i mgr inż. J. Grabczakowi za życzliwe zainteresowanie się tematem wyznaczania kierunku przepływu wód gruntowych w jednym otworze metodą izotopową.

LITERATURA

1. Fritsch V. — Geoelektrische Baugrunduntersuchung. Berlin 1960.
2. Jakubowski B., Liachow L. — Elektrozawiedka, Moskwa 1956.
3. Królikowski Cz. — Pomiar kierunku i prędkości ruchu wód w rejonie projektowanego stopnia wodnego „Przyborów”. P.G.I.B.W. „Hydrogeo”, Warszawa.
4. Mairhofer H. — Bestimmung der Strömungsrichtung des Grundwassers in einem einzigen Bohrloch mit Hilfe radioaktiven Isotopen. Atompraxis, Jahrgang 1(1963), 9.
5. Matwiejew B. K. — K metodikie opredielienija skorosti podziemnogo potoka po adnoj skwaziinie. ANSSSR, 1958, nr 9.
6. Moser H., Neumeier F., Ranett W. — Atomkernenergie. 1957, 2, 225.
7. Ogilwi A. A. — Geofiziczeskije metody izuczenija karsta. Moskwa 1957.
8. Ogilwi A. A. — Geofiziczeskije metody issledowanij. Moskwa 1962.
9. Paczyński B. — O niektórych metodach geoelektrycznych w hydrogeologii. Przegl. geol. 1959, nr 4.
10. Siemienow A. S. — Opredielenie naprawlenija i skorosti podziemnogo potoka pri adnoj skwaziinie. Razwiedka niedr, 1937, nr 19.

SUMMARY

The article deals with the methods of determining the direction of ground water flow when only one hole is available. The methods so far applied were expensive and troublesome in practice, for at least three observation holes were necessary.

The first part of the article is devoted to the isotope method, the second one to the electrical method. The discussed methods yield uniform results, are characteristic of a high degree of exactness, and are more handy than the classical methods applied up to now in Poland.

The article is written mainly for hydrogeologists, geologists and geophysicists.

РЕЗЮМЕ

В статье рассматривается метод определения направления миграции грунтовых вод на основании только одной скважины. Применяемые до сих пор методы определения отличаются большой сложностью и сложностью проведения на практике, так как требуют по крайней мере трех наблюдательных скважин.

Первая часть статьи посвящена изотопному методу, вторая — электрическому методу. Описанные методы дают достоверные показания, отличаются большой точностью и значительной оперативностью по сравнению с применяющимися в Польше классическими методами.

Статья предназначена, главным образом, для гидрогеологов, геологов и геофизиков.