

NOWOCZESNE METODY BADANIA WŁASNOŚCI LODOGRUNTU W BUDOWNICTWIE GÓRNICZYM

UKD 624.139:622.22:624.131.4:622.331.2:551.78/79

Logiczną konsekwencją odkrycia i udokumentowania złoża minerału użytecznego jest jego udostępnienie i eksploatacja. We wszystkich przypadkach, choć w różnym stopniu nasilenia, potrzebny jest współdziałanie geologa, zwłaszcza gdy złożo minerału użytecznego, jak to najczęściej ma miejsce w polskich warunkach, znajduje się pod kilkusetmetrowym nadkładem skały pionnej. Nadkład ten w naszych warunkach składa się przeważnie z zawodniomego luźnego górotworu pochodzącego z czwartorzędu. Przykładem ilustrującym takie właśnie warunki geologiczne z dużą liczbą warstw zawodniomych jest Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy (LGOM). Charakterystyki warstw występujących na tym terenie pokazuje tab. I. Warstwy te posiadają zróżnicowane własności fizyko-mechaniczne widoczne w tab. II. Własności warstw widocznych na przekroju geologicznym (ryc. 1) jednego z szybów tego okręgu mają decydujący wpływ na przyjętą metodę prowadzenia wyrobisk udostępniających.

Wykonanie wyrobiska pionowego (szybu) przez kilkusetmetrowy zawodniomy nadkład jest możliwe jedynie po zestaleniu (petryfikacji) górotworu, mającym na celu poprawienie własności wytrzymałościowych gruntu i zabezpieczenie przed wdarciami wody do szybu z zawodniomych poziomów (ryc. 1).

Pośród znanych metod zestalania gruntu najczęściej stosowane jest w budownictwie górnictwa cementowanie i zamrażanie. Pierwsze z nich ma ograniczone zastosowanie do zestalania gruntu na

kilkanaście, najwyżej kilkadziesiąt metrów przed czołem prowadzonego wyrobiska. Natomiast zamrażanie pozwala na jednorazowe opanowanie kilkusetmetrowego odcinka górotworu, zwłaszcza gdy wyrobiskiem jest szyb pionowy. Zestalenie gruntu na taką odległość przed przodkiem wyrobiska, za pomocą jednego procesu technologicznego nadaje się do mechanizacji prac związanych z przygotowaniem i prowadzeniem zamrażania oraz do mechanizacji drążenia wyrobiska i zakładania budowy.

Zamrażanie górotworu jako najstarsza metoda zestalania gruntu wymaga wykonania dookoła przyszłego szybu kilkadziesiątu odwiertów, w które składa się podwójne rury. Po połączeniu rur pomiędzy sobą i z zespołem zamrażarek wprowadza się do obiegu chłodziwo (najczęściej wodny roztwór CaCl_2), które przepływając przez rury powoduje ochłodzenie i stopniowe zamrożenie wody znajdującej się w zawodniomym górotworze. Woda zamrażając dookoła rur wytwarza słupy lodowe, które po jakimś czasie łączą się ze sobą powodując powstanie cylindra lodowego zwanego w budownictwie górnictwie „płaszczem mroźniowym”. Płaszcz przy dalszym dostarczaniu „zimna” rozprzestrzenia się przez zwiększenie swojej grubości. Grubość płaszcza mroźniowego wskutek niejednakowych własności termicznych warstw, przez jakie przechodzi szyb jest różna, co obrazuje ryc. 1 po lewej stronie, gdzie przy założonych własnościach termicznych skał przykładowo dla tego szybu wyliczono (9, 15) grubość płaszcza dla róż-

WŁASNOŚCI FIZYKO-MECHANICZNE SKAŁ MROŻONYCH

Tabela II

Właściwość	Jednostka	Wiek skał		pstre piaskowce
		czwarto- i trzeciorzędowe		
		luźne	spoisłe	
Ciężar objętościowy	g/cm ³	1,35 ± 2,1	1,4 ± 2,36	1,97 ± 2,59
Wilgotność naturalna	%	0,55 ± 25,4	0,73 ± 77,3	porowatość 0,7 ± 27,6
Kąt tarcia wewnętrznego	stopnie	30 ± 47	1,5 ± 28,0	38 ± 78
Spójność (kohezja)	kG/cm ²	0	0,0 ± 0,8	12 ± 48
Współczynnik filtracyjny	cm/sek	0,008 ± 2,32	—	0,0 ± 0,068
Wytrzymałość doraźna	+ 20°C - 5°C -15°C	— 26 ± 116 56 ± 200	— 30 ± 37 30 ± 110	28,9 ± 374,0 brak danych brak danych

Tabela I

CHARAKTERYSTYKA WARSTW MROŻONYCH NA TERENIE LGOM

Rodzaj skały	Miąższość	
	m	%
Pyły, piaski, żwiry	188,5	44,3
Gliny, ily, ilowce	168,9	39,8
Muły, mułowce	10,2	2,4
Węgle brunatne	30,4	7,1
Piaskowce	27,0	6,4
Ogółem strefa mrożona	425,0	100,0
W tym: utwory wodonośne	188,5	44,3
częściowo wodonośne	37,2	8,8
nieprzepuszczalne	199,3	46,9

Tabela III

Rodzaj górotworu	Wilgotność %	R _c kG/cm ²	
		-5°C	-15°C
Piasek drobnoziarnisty	23	79	122
Piasek średnioziarnisty	19	90	144
Piasek różnoziarnisty	20	61	106
Pospółka gliniasta	11	34	95
Il szary	12	35	62

Ryc. 1. Profil geologiczny szybu głębinowego na terenie LOGM.

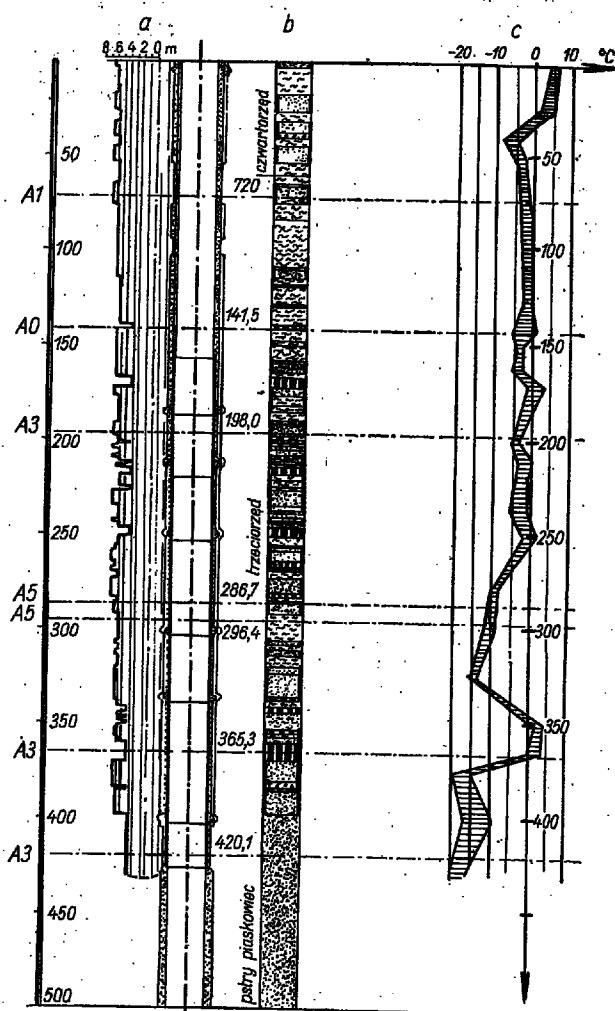
a — granica płaszczu mroźniowego obliczona na hydrointegratorze Łukianowa, b — profil geologiczny z zaznaczeniem warstw wodonośnych, c — temperatury dna szybu zmierzone w czasie jego głębienia.

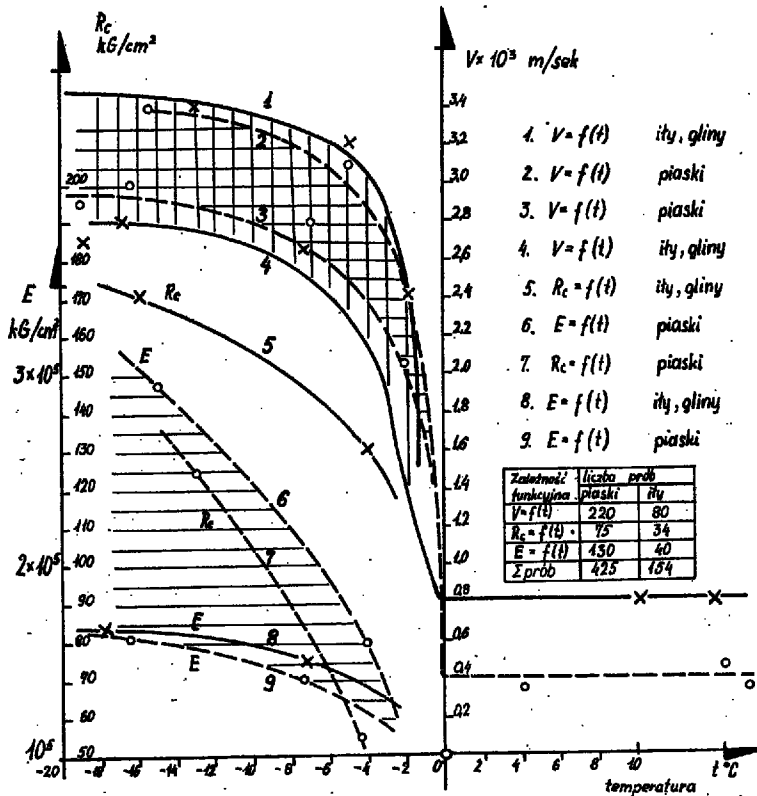
Fig. 1. Geological profile of a shaft deepened in the LGOM area.

a — boundary of freezing mantle calculated on Lukianov's hydriointegrator, b — geological profile with waterbearing beds, c — temperatures of shaft bottom, measured during its deepening.

nych warstw. Linia schodkowa ograniczająca płaszcz od strony zewnętrznej wskazuje z jednej strony na złożoność zjawisk występujących przy tworzeniu płaszczu mroźniowego, a z drugiej na możliwość nie zamknięcia płaszczu, gdy odległość mierzona na obwodzie kręgu mroźniowego będzie większa od sumy grubości warstw lodowych narosniętych na dwu sąsiadujących ze sobą rurach mroźniowych.

Złożony charakter zjawisk występujących w sąsiedztwie szybu przetłijanego metodą mrożenia (6, 7) ilustruje również pole zakreskowane po prawej stronie profilu geologicznego. Pole to jest miejscem geometrycznym temperatur zmierzonych w 5 miejscach na dnie szybu w czasie jego głębienia (1). Z wykresu tego widać, iż mimo intensywnego, wielomiesięcznego mrożenia przeprowadzonego jednakowo dla wszystkich poziomów, w 6 warstwach węgla brunatnych ocios i dno szybu nie osiągnęło temperatur poniżej 0°C, zatem woda w tych poziomach nie była zamrożona. Na tych poziomach grubość lodogruntu była bardzo mała, co znajduje potwierdzenie na wykresie po lewej stronie profilu geologicznego.





Ryc. 2. Własności fizyko-mechaniczne skał LGOM w funkcji temperatur.

Fig. 2. Physic-mechanical properties of rocks from the LGOM area, in function of temperature.

Kontrola stopnia zamrożenia górotworu oraz grubości płaszczu z lodogruntu, od których zależy bezpieczeństwo szybu i ludzi pracujących w szybie, możliwa jest dopiero po wykonaniu wyrobiska górniczego. Tak było np. w przypadku szybu, którego profil przedstawiony jest na ryc. 1. Jego mrożenie rozpoczęło we wrześniu 1964 r., a głębienie po 3 miesiącach w grudniu tego roku. Po osiągnięciu dna szybu na głębokości 26 m, odpowiadającej poziomowi wód gruntowych, okazało się, że górotwór jest nie zamrażający i dlatego głębienie przerywano na 6 tygodni, po którym to okresie zglębiono szyb do głębokości 32 m. Tu wskutek nieszczelności płaszczu głębienie trzeba było przerwać na dalsze 3 tygodnie i dopiero po intensywnym mrożeniu przy użyciu dodatkowych chłodziarek można było je kontynuować. Zakończono postępie 35 m na miesiąc.

ZMIANY STRUKTURALNE W GÓROTWORZE ZAWODNIONYM POD WPŁYWEM ZAMARZANIA

Wyniki takie można było uzyskać dopiero po zastaleniu gruntu przez zamrożenie luźnych zawadzionych piasków, żwirów, pyłów, mułków i zaplasczonych mułowców. Zmiana własności mechanicznych gruntów, jaka nastąpiła wskutek obniżenia temperatury i zamrożenia wody, widoczna jest z ostatnich trzech wierszy tab. II, w której podano, że czwarto- i trzeciorzędowe skały luźne i słabospoiste w temperaturze 20°C nie wykazują żadnej wytrzymałości na ściskanie. Te same skały w temperaturze -15°C wykazują znaczną wytrzymałość, dochodzącą do 100, a nawet 200 kg/cm² (15).

Wzrost własności wytrzymałościowych i pseudo-sprężystych pod wpływem obniżenia temperatury widoczny jest ponadto z oryginalnych badań przeprowadzonych przez M. Machowskiego i Z. Strzeleckiego (14), których wyniki podano na ryc. 2 w formie zależności wytrzymałości doraźnej na ściskanie i modułu doraźnej sprężystości podłużnej od temperatury próbek gruntu pobranego z terenu LGOM. Na wykresie tym krzywe 5 i 7 podają wytrzymałość doraźną, a krzywe 6, 8 i 9 modułu sprężystości dla różnych próbek. Pokazane krzywe uzyskane z pomia-

rów laboratoryjnych prowadzonych w temperaturze -2,0° do -18,0°C wskazują na silny wzrost wytrzymałości w miarę obniżania temperatury.

Tabela III i wykres na ryc. 2 wskazują, iż nawet zawadzone piaski, które w temperaturach dodatnich lub nawet ujemnych, ale w pobliżu zera mają konsystencję kurzawki w temperaturze -18,0°C i niższych wykazują własności wytrzymałościowe odpowiadające skałom zwięzłym. W takich skałach (mimo ich własności reologicznych) możliwe jest odsłonięcie ociosu (I) i utrzymanie go przez okres potrzebny dla wykonania obudowy zabezpieczającej przed przesuwaniem się ociosu do środka wyrobiska.

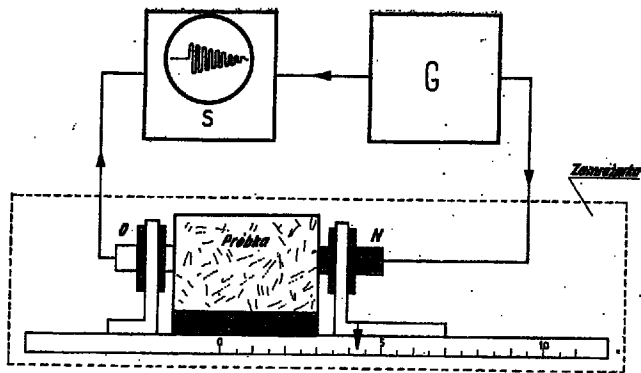
Dla przeanalizowania zmian zachodzących w górotworze pod wpływem obniżenia temperatury poniżej temperatury zamarzania wody przypomnieć należy, że woda ta w ilości 20 — 60% występować może w charakterze wody nabłonkowej, kapilarniej lub wolnej, a struktura omawianych gruntów może być ziarnowa, komórkowa lub kłaczkowa (11).

Struktura ziarnowa jest wynikiem opadania ziarn mineralnych w wodzie. Wskutek tego ziarna są zbite, a porowatość takiej skały jest znaczna i wynosi 18 — 50%.

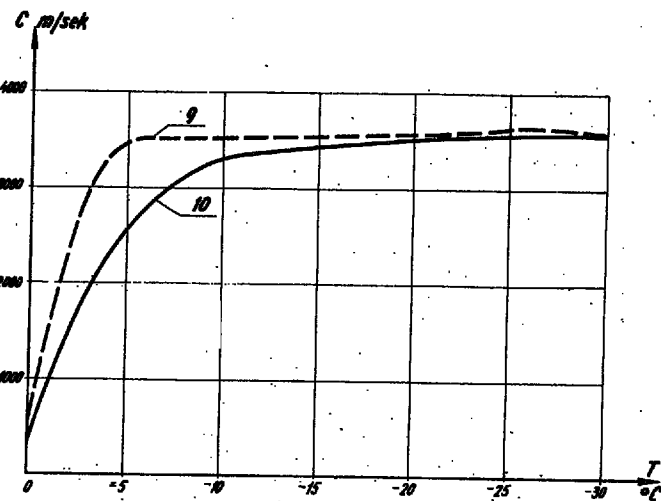
Struktura komórkowa jest charakterystyczna dla skał ilastych, powstających przez sedymentację w wodzie, bez uprzedniego skoagulowania opadających cząstek. Opadające pojedyncze cząstki pyłowe oraz ilowe przy zetknięciu się z innymi cząstkami wcześniej osadzonymi łączą się, tworząc grunty o strukturze komórkowej, której porowatość jest na ogół znacznie większa niż 50%.

Struktura kłaczkowa powstaje prawie wyłącznie z cząstek ilowych opadających w wodzie z rozpuszczonymi solami, działającymi jako elektrolity. Powodują one rozładowanie ładunków przenoszonych przez cząsteczki gruntu, które łączą się już w czasie opadania w kłaczkę o kształcie komórek i po opadnięciu tworzą komórki drugiego rzędu, charakterystyczne dla struktury kłaczkowej. Struktura kłaczkowa odznacza się dużą porowatością. Struktury taką mają frakcje ilowe, a w tym i płuczka wiertnicza.

Struktury omawianych gruntów składają się z ziarn mineralnych oraz przesterzeń, które dla próbki

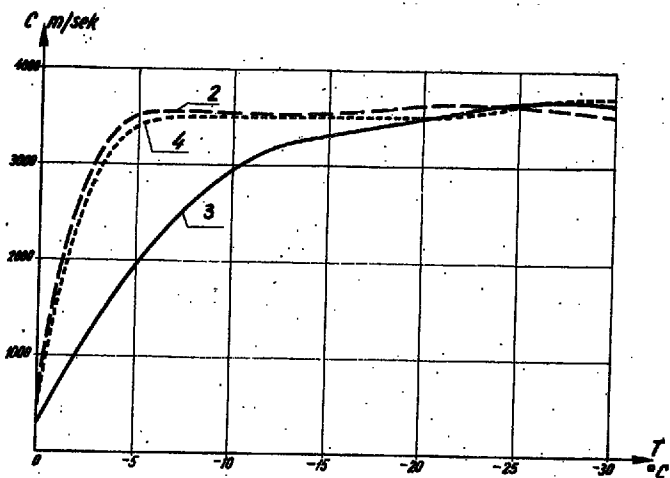


Ryc. 3. Układ pomiarowy.
Fig. 3. Measuring system.



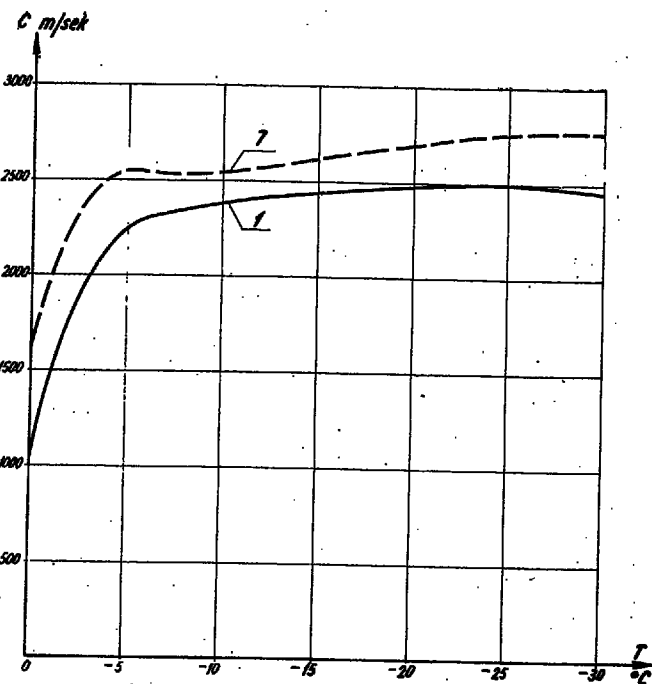
Ryc. 4. Wyniki pomiaru prędkości rozchodzenia się fali akustycznej w funkcji temperatury.

Fig. 4. Results of measuring the rate of acoustic wave propagation in function of temperature.



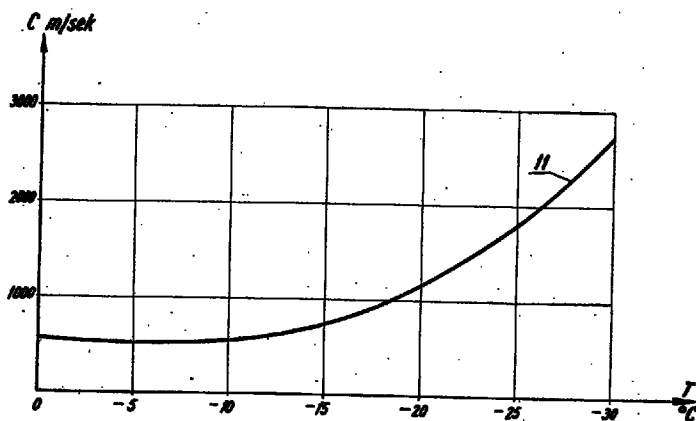
Ryc. 4 b.

Fig. 4 b.



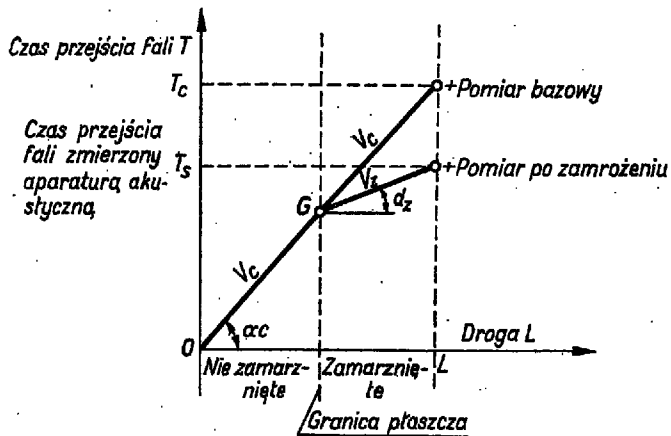
Ryc. 4 c.

Fig. 4 c.



Ryc. 4 d.

Fig. 4 d.



Ryc. 5. Konstrukcja dla wyznaczenia granicy płaszcz mroźniowego.

Fig. 5. Construction for determination of the boundary of freezing mantle.

wysuszonej wypełnione są powietrzem. Dla skał zawodnionych wypełnienie stanowi woda, która w temperaturach obniżonych przechodzi w lód. Przy zamrażaniu górotworu, polegającym na odprowadzeniu odpowiedniej ilości ciepła poza jego ramy, w samym górotworze wydzielić można granicę pomiędzy górotworem zamrażanym a nie zamrażanym. Na granicy zamrażania tworzą się kryształy lodu, które narastają przyciągając do siebie drobiny wody wol-

nej, kapilarnej, a nawet nabłonkowej. Podczas tworzenia się kryształów lodu wydzielane jest ciepło krystalizacji (ok. 80 kal/g). Tworzące się kryształy lodu rosną podlegając naprężeniom w górotworze i występowanie szczelin jako przestrzeni bez ziarna mł-

ramnych. Szczeliny te wypełniają się soczewkami lub pasmami lodu. Decydujący wpływ na mechanizm dalszych zjawisk ma różnica temperatur pomiędzy źródłem zimna a górotworem niezamarzniętym. Ona to przede wszystkim reguluje szybkość zamarzania.

Przy szybkim zamarzaniu wzrost soczewek lodu, a zatem i odprowadzanie wody z górotworu jest utrudnione. Przy wolnym zamarzaniu następuje przyciąganie i migracja wody, a soczewki lodowe mogą osiągnąć grubość do 2 cm. Mechanizm tworzenia soczewek i kryształów jest zależny od składu granulometrycznego górotworu. Piaski i żwirry są na ogół dobrymi przewodnikami ciepła, a to m. in. wskutek lepszego stykania się ziarn (struktura ziarnista), w związku z tym szybkość zamarzania skał o strukturze ziarnistej będzie duża. W tych warunkach o ile górotwór nie posiada frakcji pyłowych i ilowych, zamarzająca woda nie tylko nie przyciąga nowych drobniń wody, ale zwiększając swoją objętość w czasie zamarzania o ok. 9%, wypycha pewną ilość wody poza granicę zamarzliny. Zjawisko to obserwowano w szybie podczas jego głębienia przy tworzeniu się płaszczu lodowego.

W przestrzeni ograniczonej zamarzniętym górotworem poziom hydostatyczny wody w niezamarzniętym rdzeniu znacznie się podnosi. W górotworze ilastym, w którym zawarta jest większa ilość wody tworzą się duże płaskie soczewki. Wskutek oddawania dużej ilości ciepła kryształizacyjny szybkość zamarzania przy tych samych różnicach temperatur jest znacznie mniejsza. Duża ilość wody zawartej w ilach oraz doprowadzonej z zewnątrz wskutek działania sił między cząsteczkowych powoduje powstawanie dużych soczewek lodu. Wahań zawartości wody w jednorodnych ilach i glinach, jakie występują przed zamarznięciem i po zamarznięciu nie są jednak duże, gdyż mała przepuszczalność tych gruntów uniemożliwia przyciągnięcie większych ilości wody z większej odległości, a zwłaszcza z większych głębokości. Następuje tylko miejscowe przesunięcie wody w kierunku do tworzących się soczewek.

W górotworze o przewadze ziarn pyłowych, który odznacza się dużą ilością porów o charakterze włoskowatym i na ogół dużą przepuszczalnością, możliwa jest migracja dużych ilości wody. Jest to przyczyną powstawania dużej ilości soczewek lodowych, odznaczających się mniejszą grubością jak w warstwach ilowych i gliniastych.

Zjawiska powyższe, podane z dużym uproszczeniem, powodują, że własności fizyko-mechaniczne górotworu, znajdującego się w stanie rodzimym, a górotworu w temperaturach poniżej punktu zamarzania wody są zróżnicowane, przy czym różnice własności różnych gruntów dla tej samej różnicy temperatur nie są własnością stałą.

METODY POMIAROWO-KONTROLNE

Do kontroli procesu tworzenia się lodogruntu stosowana była dotychczas metoda „izotermi zerowej”. Polegała ona na mierzeniu temperatury górotworu w odwiertach rozmieszczonych przy spodziewanej wewnętrznej oraz zewnętrznej granicy strefy mrożenia. Na podstawie takich pomiarów wyznaczano przebieg izoterm 0°C i przyjmowano, że pomiędzy nimi znajduje się górotwór zamrożony. Badania ostatniego dziesięciolecia wykazały jednak, że zawodniony górotwór zamarza na ogół przy temperaturze -2°C do ok. -7°C , zależnie od składu chemicznego i ciśnienia wód gruntowych, porowatości, ziarnistości i innych czynników.

Znane są przypadki zamarzania górotworu dopiero w temperaturze kilkudziesięciu $^{\circ}\text{C}$. Dlatego też metodę izotermi zerowej uznano za orientacyjną i dopuszczalną jedynie do chwili opanowania innego, doskonalszego sposobu kontroli. Sposobem takim okazała się metoda akustyczna oparta na obserwacji rozchodzenia się w górotworze fal sprężystych o częstotliwościach od kilku do kilkudziesięciu kHz. Podstawowe parametry propagacji tych fal — prędkość i tłumienie — zależą od stopnia zamrożenia górotworu w sposób dający się określić rachunkowo lub do-

świadczenie. Wystarczy więc zmierzyć jeden z wymienionych parametrów, aby otrzymywać jednoznaczne i dostatecznie dokładne informacje o stanie zamrożenia górotworu.

W praktyce wykorzystuje się pomiar prędkości fali jako łatwiejszy do zrealizowania. Teoria rozchodzenia się fal sprężystych w ponowatym górotworze o temperaturach dodatnich i ujemnych przedstawiona została przez W. Kołtońskiego (12) i dlatego obecnie zajmujemy się sprawą doświadczalnego badania związku pomiędzy stopniem zamrożenia górotworu a prędkością rozchodzenia się w nim fali sprężystej.

Ze względu na szczególną przydatność metody akustycznej do kontroli płaszczu mroźniowego wokół szybów LGOM autorów interesowały bardzo pomiary prędkości fali sprężystej w próbkach skał luźnych, pochodzących z tego rejonu. Próbkę z różnych szybów i różnych głębokości natychmiast po pobraniu umieszczono w hermetycznych pojemnikach i przechowywano w nich aż do rozpoczęcia badań. Badania polegały na stopniowym oziębianiu próbek w zakresie temperatur od 0 do -30°C i mierzeniu co 5°C prędkości rozchodzenia się w nich fali sprężystej. Użyty do tego celu układ pomiarowy pokazano na ryc. 3, a przykładowe wyniki w postaci wykresów na ryc. 4a, 4c.

Pierwsze spostrzeżenie, które nasuwa analiza tych wyników dotyczy znacznego wzrostu prędkości fali akustycznej przy obniżeniu temperatury od 0°C do -10°C . Dla piasków jest on 7–10-krotny, a dla ilów ok. 2-krotny. Jednocześnie, jak wykazały badania przeprowadzone w AGH (13, 14, 16, 17), wzrostowi prędkości fali towarzyszy poważny wzrost wytrzymałości górotworu na ściskanie (por. tab. III). Np. dla piasku przy temperaturze 0°C wytrzymałość ta wynosi ułamek kg/cm^2 , a przy -5°C zwiększa się do przeszło 60 kg/cm^2 ; przy -15°C do ponad 100 kg/cm^2 .

Należy przy tym wyjaśnić, że zgodnie ze wskazaną wyżej teorią (12) oraz ze zdobytą praktyką — zmiany prędkości fali akustycznej w górotworze nie są wywoływane bezpośrednio obniżeniem temperatury, lecz zmianami strukturalnymi ośrodka, spowodowanymi jego zamrażaniem. Dowodzi tego proste doświadczenie z próbki piasku zawilgoconego solanką. Przy temperaturze -10°C , a nawet -15°C prędkość fali w próbce bardzo niewiele różni się od tej, która występuje w temperaturze 0°C , ponieważ piasek wskutek obecności soli nie uległ utwardzeniu mimo znacznego obniżenia temperatury. Poniżej -20°C piasek zaczyna zamarzać i wówczas obserwujemy gwałtowny wzrost prędkości fali sprężystej (por. ryc. 4d). Powyższe fakty pozwalają uważać prędkość fali akustycznej za parametr odzwierciedlający w sposób pewny i obiektywny stopień zestalania luźnego górotworu przez zamarzanie.

Porównując krzywe pomierzone na próbkach piasku spostrzegamy pewne charakterystyczne różnice ich przebiegu, głównie przy obniżaniu temperatury od 0°C do -15°C . W zakresie tym wzrost prędkości fali sprężystej jest znacznie wolniejszy w próbkach 8 i 10 niż w próbkach 2, 4 i 9 (ryc. 4a, 4b). Przyczyną tego jest niejednakowy stopień zawilgoconia piasku. W pierwszym przypadku jest ono niewielkie (5% i 8%) i dlatego proces zamrażania przekracza 20%, co znacznie przyspiesza zestalanie ośrodka w funkcji obniżania temperatury. Poniżej ok. -15°C wpływ wilgotności bardzo maleje.

Opisane wyżej zjawisko występuje również w ilach, lecz w znacznie łagodniejszej formie, ze względu na ich odmienną strukturę oraz inny sposób wchłaniania wody (w porównaniu do piasków). Tą odmienną strukturą, bardziej zwartą, tłumaczy się również fakt, że przy temperaturach 0°C i wyższych prędkości fali sprężystej w ilach są znacznie większe niż w piaskach. Natomiast poniżej -10°C do ok. -15°C sytuacja przedstawia się odwrotnie: w piaskach dostatecznie zawilgoconych wspomniane prędkości przekraczają przeważnie 3500 m/sek , a niekiedy i 4000 m/sek , gdy w ilach nie osiągają 3000 m/sek (ryc. 4c).

Omawiane wyżej pomiary przeprowadzone zostały na próbkach dla widma częstotliwości fal sprę-

zystych zawartego w zakresie od ok. 1 kHz do ok. 25 kHz. Zjawiska dyspersji prędkości fal nie zaobserwowano. Nasuwa się pytanie, jaka jest najkorzystniejsza częstotliwość do badania lodogruntu? Zagadnienie to trzeba rozpatrywać pod kątem widzenia dokładności i zasięgu omawianej akustycznej metody kontrolnej. Otóż uzyskujemy tym większą dokładność, im wyższą zastosujemy częstotliwość, lecz jednocześnie tracimy na zasięgu, ponieważ wraz z podwyższeniem częstotliwości rośnie tłumienie fali sprężystej (akustycznej) przez badany ośrodek. Wybór częstotliwości musi być zatem kompromisowy. W praktyce polega to na stosowaniu pewnego wybranego widma, którego dolne częstotliwości wykorzystywane są wówczas, gdy ważniejszy jest zasięg pomiaru niż jego dokładność, a górne — w przypadku odwiertnym. Widmo takie wytwarza specjalnego typu nadajnik aparatury pomiarowej, omówiony przez W. Kobińskiego w jego artykule (12).

INTERPRETACJA I WYKORZYSTANIE WYNIKÓW POMIARÓW

Pomiar prędkości rozchodzenia się fali akustycznej w górotworze, realizowany przy użyciu aparatury opisanej w dostępnej literaturze (3, 5, 11, 12) wykorzystany jest w budownictwie górniczym przede wszystkim dla wyznaczenia własności płaszczu mroźniowego, wytworzonego sztucznie dookoła projektowanego wyrobiska górniczego. Ponieważ płaszcz mroźniowy traktowany jako swoista konstrukcja zabezpiecza wyrobisko przed odkształceniem ociosu starającego się zacisnąć i wypełnić wybraną przestrzeń, dlatego przy określaniu własności płaszczu mroźniowego należy rozdzielić i wyznaczyć dwa różne parametry, charakteryzujące jego ściskalność. Są to:

- 1) wymiary geometryczne (grubość mierzona po promieniu),
 - 2) graniczna wytrzymałość na ściskanie.
- Wyznaczenie grubości płaszczu mroźniowego sprowadza się do wyznaczenia granicy pomiędzy górotworem zamrażonym a nie zamrażonym. Dla zrealizowania tego zadania zbudowano wspólnym wysiłkiem Instytutu Podstawowych Problemów Techniki i Przedsiębiorstwa Budowy Kopalni Rud Miedzi unikalną aparaturę oznaczoną symbolem „AMA”, za pomocą której mierzy się następujące wielkości:

- a) czasy T_c i T_z przejścia czoła fali akustycznej przez górotwór niezamrożony (ciepły) i zamrożony (zimny);
- b) głębokość $Z = H$, na jakiej pomiar a został przeprowadzony, do tego celu służą głębokościomierze zamontowane w aparaturze AMA;
- c) odchylenia sond pomiarowych od osi odwiertów (2), w których przeprowadza się pomiary (a i b), przy czym znane muszą być współrzędne geograficzne osi odwiertu. W omawianym przypadku pomiar ten przeprowadzony był odchyłomierzem żyroskopowo-grawitacyjnym typu NAUTIK.

Obróbka uzyskanych w ten sposób wyników pomiarów przeprowadzona może być na drodze analitycznej, przy użyciu znanych metod numerycznych lub na drodze wykresowej. W obu przypadkach liczenie przeprowadza się dla charakterystycznych warstw górotworu, dla których z pomiarów b znana jest głębokość zalegania oraz na podstawie pomiarów geotechnicznych przeprowadzonych w laboratorium. Oprócz określenia krzywej uziarnienia i porowatości wyznaczono również graniczną wytrzymałość przy jednoosiowym ściskaniu. Badania te noszą nazwę parametrycznych (4, 13, 14, 16, 17). Powinny one informować o prędkości przechodzenia fali sprężystej przez próbki w temperaturach dodatnich (np. 20°C) i ujemnych (np. -20°C). Badania tego typu prowadzi Instytut Głębienia Szybów i Obudowy Górniczej AGH (13, 14, 16, 17).

Zasada wykresowego wyznaczenia granicy płaszczu mroźniowego pokazana jest na ryc. 5, gdzie na osi odciętych odmierzone drogę L pomiędzy nadajnikiem N i odwiertnikiem O . Zmierzony czas przejścia fali T , lub T_z odmierza się przy zastosowaniu podziałki mT na osi rzędnych, wykreślając jednocześnie z po-

czątku układu od O prostą V_c nachyloną do osi odciętych pod kątem $\text{tg } X_c = L/T_c$, a z punktu O $\text{tg } V_c = L/T_c$ o współrzędnych (L, T) prostą nachyloną do poziomu pod kątem $V_z = \text{arc } \text{tg } L/T_z$, gdzie $L = \text{droga}$, na jakiej przeprowadzono pomiar dla górotworu zamrażonego. Pomiar ten przeprowadza się najczęściej między odwiertami mroźniowymi, o których wiemy na pewno, że pomiędzy nimi górotwór jest zamrażony. Punkt przecięcia G rzutowany na oś odciętych wyznacza granicę pomiędzy górotworem zamrażonym i niezamrażonym, a odcinek OG pomnożony przez zastosowaną na rycinie podziałkę mL określa grubość płaszczu mroźniowego na głębokości Z .

Punkt G wyznacza chwilową granicę płaszczu mroźniowego, jaka występuje w momencie przeprowadzenia pomiaru. W miarę zmian temperatur w górotworze granica ta może przesuwać się w jedną lub drugą stronę. Wykonując zatem szereg pomiarów w funkcji czasu można obserwować narastanie lub zmniejszanie płaszczu mroźniowego. Przeprowadzając szereg pomiarów podanych w punktach a, b, c dla różnych głębokości można wyznaczyć rozprzestrzenienie płaszczu mroźniowego w funkcji głębokości. Dużą zaletą tej metody jest możliwość określenia zasięgu płaszczu mroźniowego jeszcze przed wykonaniem wyrobiska.

Metoda wykresowego wyznaczenia granicy płaszczu mroźniowego pokazana na ryc. 5 jest słuszną o ile znana jest odległość pomiędzy odwiertami, do których opuszczono sondy pomiarowe (2). Wskutek technologicznych odchyień osi odwiertów od pionu odległość L wyznaczona na tarczy szybowej na różnych głębokościach przyjmuje wartości $(L \pm \Delta L)$, gdzie ΔL jest odchyleniem sondy od osi odwiertu. Wielkość tę wyznaczyć można z potrzebą dla dalszej obróbki matematycznej (dokładność na podstawie wyników uzyskanych z pomiarów odchyłomierzem (inklinometrem) typu NAUTIK. W przypadku występowania takich odchyień wykresowe wyznaczenie granicy płaszczu mroźniowego występującego na długości kilkusetmetrów jest bardzo uciążliwe i pracochłonne. W tych przypadkach do opracowania wyników pomiarowych stosowane są metody analityczne. Metody te opisane są w dostępnej literaturze technicznej (2, 4).

Drugim parametrem potrzebnym do określenia wytrzymałości płaszczu mroźniowego, potraktowanego jako swoista konstrukcja, chroniąca odstonięty ocios wyrobiska jest k_c dopuszczalne naprężenie na ściskanie skał, znajdujących się w stanie zamrożonym. Wartość tę można wyznaczyć w przybliżeniu, stosując metody analityczne do opracowania wyników pomiarów podanych pod a, b, c oraz do badań laboratoryjnych przeprowadzonych na modelach odwzorowujących zmiany zachodzące w czasie zamrażania próbek gruntu, zbliżonych własnościami do gruntu zawartego w płaszczu mroźniowym.

Wyniki takich badań są przybliżeniem wartości występujących w rzeczywistości dla gruntów płaszczu mroźniowego. Przybliżenie to jest m.in. spowodowane umownym przyznaniem skałom zamrażonym, a znajdującym się w płaszczu mroźniowym, własności sprężystych, zgodnych z prawem Hoocka, gdy w rzeczywistości warstwy te wykazują własności reologiczne (9), gdzie odkształcenia przy stałych naprężeniach zmieniają się w funkcji czasu.

Dla wyznaczenia granicznej wytrzymałości na ściskanie warstw otaczających drażone wyrobisko posłużyć się należy metodami analitycznymi, przedstawiając zmierzone wartości do związków podanych w dostępnej literaturze naukowo-technicznej (3, 2). Złożona postać tych związków oraz liczba poziomów, dla jakich należy przeprowadzić te obliczenia, preferują stosowanie numerycznych maszyn matematycznych (4). Grubość płaszczu mroźniowego i graniczne wielkości wytrzymałości na ściskanie, wyliczone dla poszczególnych warstw otaczających szyb, prognozowane warunków, z jakimi spotyka się górnik po wydrążeniu wyrobiska. W oparciu o takie profile można z większym jak dotychczas bezpieczeństwem

prowadzić głębienie wyrobiska oraz z większą pewnością i dokładnością projektować obudowę.

Określanie wymiarów płaszcz mroźeniowego na podstawie pomiarów przeprowadzonych "in situ", jak to opisano poprzednio, daje znacznie dokładniejsze wyniki niż przy wyznaczaniu płaszcz mroźeniowego metodą "izoterm zerowej" lub na podstawie wyliczenia w oparciu o bilans termodynamiczny przy przyjęciu własności termicznych skał odspojonych, o naturalnym ociosie i zmierzonych metodami laboratoryjnymi. Dowodem tego są wyniki obliczeń i bezpośredniego pomiaru prędkości. Na ryc. 1 podano na wstępie linię schodkową (a) wyznaczoną metodą obliczeniową na hydrointegratorze Łukianowa (15), natomiast zakreślona powierzchnia (c) przedstawia wyniki pomiarów temperatur dokonanych po odsłonięciu ociosu i dna szybu. Linia ta wskazuje, iż pomimo równomiernego mrożenia całego obwodu szybu temperatury w warstwach węgla brunatnego nie osiągnęły wartości niższych od 0°C, czyli w tych warstwach nie został utworzony płaszcz mroźeniowy. Natomiast wyniki obliczeń przedstawione linią schodkową (a) wskazują, iż w warstwach tych istniał płaszcz mroźeniowy o grubości okł. 4 m.

WNIOSKI

1. Metoda izoterm zerowych daje tylko przybliżone określenie wymiarów geometrycznych płaszcz mroźeniowego, nie dając informacji o jego wytrzymałości. Przyczyną jest nieścisłe założenie, że zawodniony luźny grunt w temperaturach poniżej 0°C przechodzi w lodogrunt.

2. Metoda akustyczna badania własności górotworu otaczającego wyrobisko górnicze, a szczególnie płaszcz mroźeniowego, jest oparta na obiektywnych przesłankach, tj. związku pomiędzy szybkością przechodzenia czoła fali sprężystej przez ośrodki, a jego własnościami sprężystymi. Z tego powodu jest ona dokładniejsza, niż metoda „izoterm zerowej”.

3. W wyniku kilkuletniej wyteżonej pracy nad uściśleniem metod kontroli własności „płaszcz mroźeniowego” wytworzonego sztucznie dookoła wyrobiska, drążonego w zawodnionym luźnym górotworze, osiągnięto następujące wyniki:

a) w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki (PIAN) zbudowano unikalną aparaturę akustyczną (10, 11, 12), sprawną w warunkach budownictwa szybowego, co wypróbowano kilkakrotnie na terenie LGOM;

b) w Przedsiębiorstwie Budowy Kopalń Rud Miedzi zbudowano zespół urządzeń pomocniczych złożony z przenośnych kołowrotów, mechanizujących pomiar w przypadku budownictwa szybowego (5);

c) w Katedrze Głębienia Szybów i Obudowy Górniczej w AGH opamowano metodykę i zbudowano aparaturę do pomiaru parametrów luźnych skał zawodnionych w warunkach laboratoryjnych (13, 14);

d) jeden ze współautorów (2, 3, 4) opracował metodykę kontroli płaszcz mroźeniowego, tj. obliczenia grubości lodogruntu na podstawie pomiarów przeprowadzonych aparaturą akustyczną (a), a przy wy-

SUMMARY

Physic-mechanical properties of water-saturated loose rocks of Tertiary and Quaternary age undergo changes during their petrification, e.g. during the artificial freezing. The changes in these properties may be useful in determining the extent of ice-ground and of its compressive strength.

The paper deals with the purpose of applying such measurements, and the method of their use.

korzystaniu dodatkowo pomiarów parametrycznych (c) na szacunkowe określenie wytrzymałości na ściskanie.

LITERATURA

1. Bielecka B., Plesniak J. — Rozkład temperatury mrożonej kopalni Polkowice — Prz. Inform. PBKRM, 1968, nr 46/47.
2. Bek J., Calikowski R. — Analiza błędów popełnionych przy pomiarach, odległości pomiędzy odwiertami mroźeniowymi. Krajowa narada S/IGórn. Lubin, 1967.
3. Calikowski R. — Pomiar „in situ” własności fizyko-mechanicznych gruntów. III Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących. Warszawa, 1966.
4. Calikowski R. — Wykreślne i numeryczne metody wyznaczania granicy płaszcz mroźeniowego szybu. Rudy i Met. nieżel. 1967, nr 11.
5. Calikowski R., Kołtoński W. — Wykorzystanie fal akustycznych w budownictwie górniczym. Prz. gór. 1967, nr 11.
6. Calikowski R. — Analiza niektórych zjawisk występujących w obudowie szybu głębionego w zawodnionym luźnym górotworze. Zesz. naukowe AGH, 1969.
7. Calikowski R., Kumala J. — Analiza zmian temperatury w obudowie szybu w czasie jego głębienia. Rudy i Met. nieżel. 1968.
8. Kisiel J. — Reologia w budownictwie. Arkady, 1967.
9. Kwajewski R., Śmietanski Z., Calikowski R. — Hydrointegrator Łukianowa i jego zastosowanie do obliczania grubości płaszcz mroźeniowego. Zesz. naukowe AGH, 1964, nr 11.
10. Kołtoński W. — Propagacja fal ultradźwiękowych w skałach i jej praktyczne zastosowanie. PWN, 1959.
11. Kołtoński W. — Badanie niektórych własności strukturalnych górotworu metodą akustyczną. Rozpr. inż. 1965, nr 1.
12. Kołtoński W. — Nowoczesne zastosowanie akustyki w geofizyce i górnictwie. Prz. geol. 1968, nr 3 i 4.
13. Machowski M., Trutwin W. — Badanie płaszcz mroźeniowego z zastosowaniem metod ultradźwiękowych w skali laboratoryjnej. Maszynopis, AGH, Kraków, 1965.
14. Machowski M., Strzelecki Z. — Laboratoryjne badania szybkości przechodzenia czoła fali sprężystej przy różnych stopniach zamrożenia próbek. (na prawach rękopisu AGH, 1965).
15. Posyłek E. i in. — Wytyczne do rozmrażania i uszczelniania szybu. Prace GDG, 1967.
16. Strzelecki Z., Machowski M. — Wyznaczenie parametru „c” dla zamrożonych skał. (na prawach rękopisu AGH, 1965).
17. Trutwin W., Machowski M., Strzelecki Z., Calikowski R. — Parametryczne badania składowe zamrożonych prowadzone metodą akustyczną. Zesz. naukowe AGH, 1964, nr 11.

РЕЗЮМЕ

Физико-механические свойства обводненных рыхлых пород третичного и четвертичного возраста изменяются во время их уплотнения (петрификации) например под влиянием искусственного замораживания. Изменение этих свойств можно использовать в определении распространения мерзлоты и ее устойчивости на сжатие.

В работе описываются цели таких измерений и способ их использования.

6. Krzywe interpretacyjne firmy Schlumberger Well Surveying Corporation — tłum. polskie, wyd. Geofizyka i Geologia Naftowa, 1966.
7. Wendelsztejn B. Ju. — Album nomogramm i paletok dla interpretacji danych geofizycznych metodami badania skwazin. Gostoptiechizdat, Moskwa, 1963.

SUMMARY

A correlation between the EPS (or PS) values and Cw mineralization (resistivity R_w) of depositional waters in carbonate deposits of Jurassic formations has been ascertained on the basis of the results of a regional analysis of geophysical materials from the bore holes made in the Warszawa synclinorium, and on those obtained from the laboratory research of the depositional waters.

Regressive analysis of the materials collected has been made, reducing the multiple correlation to binary one. A function $EPS = f(H, R_f, R_w)$ has been obtained in the form of an equation of linear regression, and the functional relation between these parameters has been determined on the basis of mathematical statistics. It has also been ascertained that the probability of this relation exceeds 0.9. A nomogram has been elaborated for interpreting the PS results to determine the resistivity, thus also the mineralization of depositional waters that saturate the Jurassic limestones in the Warszawa synclinorium area.

8. Wesołowska M. — Analiza statystyczna, związku pomiędzy współczynnikiem porowatości i parametrem porowatości dla piaskowca cenomańskiego. Geofizyka i Geologia Naftowa 1967, nr 11—12.

РЕЗЮМЕ

В итоге регионального анализа материалов промышленной геофизики по буровым скважинам, пройденным на площади Варшавского синклинория, а также данных лабораторного исследования подземных вод, опробованных в этих скважинах, была выявлена зависимость между величинами EPS (по PS) и минерализацией Cw (сопротивлением R_w) подземных вод в юрских карбонатных породах этого региона.

Был проведен регрессивный анализ данных с приведением множественной корреляции к двойной корреляции. Получена функция $EPS = f(H, R_f, R_w)$ в виде уравнения линейной регрессии. Функционное соотношение между параметрами определено по принципам математической статистики. Констатировано, что вероятность этого соотношения превышает 0.9. Составлена номограмма интерпретации результатов PS с целью определения сопротивлений, а следовательно и минерализации подземных вод в юрских карбонатных породах Варшавского синклинория.