

Zależność między wilgotnością a ciśnieniem ssania w profilu mio-plioceńskich ilów na Stegnach

Emilia Wójcik*



The relationship between water content and suction pressure in Mio-Pliocene silts in Stegny profile (Poland).
Prz. Geol., 53: 699–702.

Summary. The soil-water characteristic curve for a soil is defined as the relationship between water content and suction for the soil. It can be used to estimate various parameters which describe unsaturated soil behaviour. The paper presents the results of investigation of cohesive soils from the Warsaw area. As a result of the comprehensive studies the fundamental relationship between the soil suction and water content for mio-pliocene clay from Stegny was established. Using Fredlund and Xing (1994) equation the best-fit curves for experimental data are presented.

Key words: soil suction, soil-water characteristic curve, mio-pliocene clay

Tematyka gruntów nienasyconych dopiero od niedawna znajduje się w kręgu zainteresowań. W zasadzie można powiedzieć, że dyscyplina ta jest zakorzeniona w fizyce gruntów, ponieważ podstawowe badania nad rolą, jaką spełnia woda w porach gruntu, prowadzone były przez fizyków zajmujących się gruntem. Stąd też wywodzą się teoretyczne podstawy wykorzystania parametru zwanego ssaniem do opisu zachowania się gruntu, podane w początkach XX w. Pierwsze próby powiązania ssania z zachowaniem się gruntów nienasyconych w nawiązaniu do problemów inżynierskich i geotechnicznych podjął zespół Corneya w Road Research Laboratory w Londynie w latach pięćdziesiątych XX wieku (Fredlund & Rahardjo, 1993). Opis i praktyczne wykorzystanie zjawiska ssania gruntu rzadko pojawiało się w literaturze przedmiotu. Przyczyną był brak prostych i wiarygodnych metod wyznaczania ssania w ówczesnym okresie. Z drugiej zaś strony, niedoceniano roli jaką odgrywają zmiany wilgotności w gruncie. Dopiero niepokojące statystyki z USA i wielu innych krajów świata zrodziły potrzebę mechaniki gruntów nienasyconych. Koszty związane z usuwaniem szkód budowlanych dwukrotnie przewyższały tu straty spowodowane łącznie przez powodzie, huragany, tornada i trzęsienia ziemi. W USA były to wydatki ok. 2,3 miliarda dolarów rocznie (Fredlund & Rahardjo, 1993). W Polsce nie prowadzi się tego rodzaju szacunków. Jednak od wielu lat odnotowuje się bardzo liczne przypadki szkód budowlanych, np. w rejonie Bydgoszczy (Kumor & Ciesielski, 1984; Kumor, 1990).

Polska znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego, co niewątpliwie ma wpływ na powierzchniowe i płytko zalegające wody gruntowe. W ostatnich latach często obserwuje się obniżenie zwierciadła wód gruntowych, a tym samym wzrost miąższości strefy suchej. W takiej sytuacji następuje przesuszenie podłoża gruntowego i skurcz gruntów. Niedoceniane pozostają czynniki zewnętrzne o długotrwałym działaniu na podłoże, takie jak sposób zagospodarowania i użytkowania budynków i ich otoczenia, a także wpływ rozwoju roślinności (Kumor, 1990). Dlatego szczególne zainteresowanie wielu dyscy-

plin powinno zdyżać w kierunku dokładnego rozpoznania praw rządzących strefą nienasyconą tym bardziej, że coraz częściej buduje się obiekty o kilkudziesięciu kondygnacjach z kilkoma piętrami podziemnych garaży, tunele, metro. Przyjęte do obliczeń projektowych parametry gruntu, między innymi przepuszczalność, muszą być jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych, w jakich będzie pracował grunt.

Ssanie gruntu

Grunty w strefie aeracji znajdują się w stanie nienasyconym i charakteryzuje je ujemne ciśnienie porowe. Ten ujemny potencjał wilgotności nazywany jest powszechnie ssaniem gruntu. Ssanie określa zdolność danego gruntu do wchłonięcia określonej ilości dostępnej wody. Im grunt jest suchszy tym wyższa jest wartość jego ssania. Ssanie jest więc siłą utrzymującą określoną ilość wody w próbce gruntu. Alternatywnie, ssanie można zdefiniować jako potencjalną energię (potencjał) zgromadzoną w próbce gruntu w stosunku do dostępnej wody znajdującej się poza próbką. Energia ta jest źródłem pracy wykonanej w momencie zetknięcia się gruntu z dostępną wodą.

Całkowity potencjał ssania gruntu składa się z kilku potencjałów składowych: matrycowego, osmotycznego, grawitacyjnego, temperaturowego i gazowego. Natomiast zgodnie z definicją z 1965 r., podaną na konferencji *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils*, a także według ASTM D 5298–94 — całkowite ssanie Ψ_T jest sumą ssania matrycowego (Aitchison, 1965) Ψ_M i osmotycznego Ψ_O :

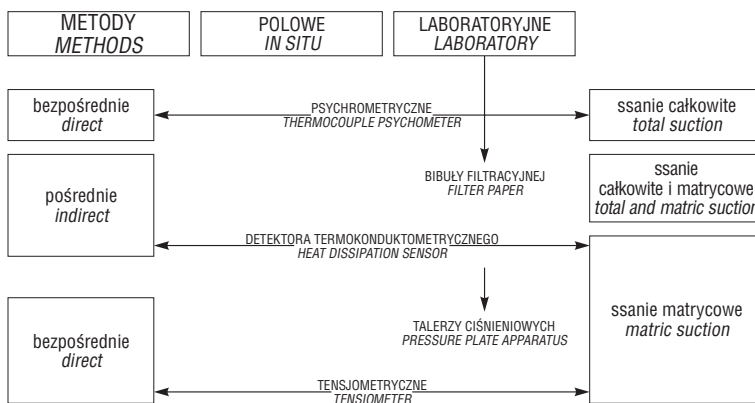
$$\Psi_T = \Psi_M + \Psi_O$$

($\Psi_M = (u_a - u_w)$, gdzie u_a — ciśnienie powietrza w porach gruntu, u_w — ciśnienie wody w porach gruntu).

Ssanie interpretować należy analogicznie do ciśnienia porowego występującego w gruntach nasyconych wodą, dlatego ssanie możemy wyrażać w cm słupa wody. W praktyce, najczęściej stosuje się jednostki pF (*ang. potencial free energy*) jednak wymiennie stosowane są również psi, kPa, atm oraz bary (Ridley & Wray, 1995). Zależność pomiędzy jednostkami pF a wysokością słupa wody w cm przedstawia się następująco: $\log_{10} h = pF$

Istnieje wiele metod wyznaczania ciśnienia ssania. Metody te można podzielić na polowe i laboratoryjne, a także pośrednie i bezpośrednie. Na rysunku przedstawiony

*Uniwersytet Warszawski, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; wojcike@uw.edu.pl



Ryc. 1. Podział metod badania ciśnienia ssania wraz z uwzględnieniem rodzaju pomierzonego ssania

Fig. 1. The methods of soil suction measurement considering the type of measured suction

został podział metod badania ciśnienie ssania wraz z uwzględnieniem rodzaju pomierzonego ssania (ryc. 1).

Krzywa charakteryzująca układ grunt–woda

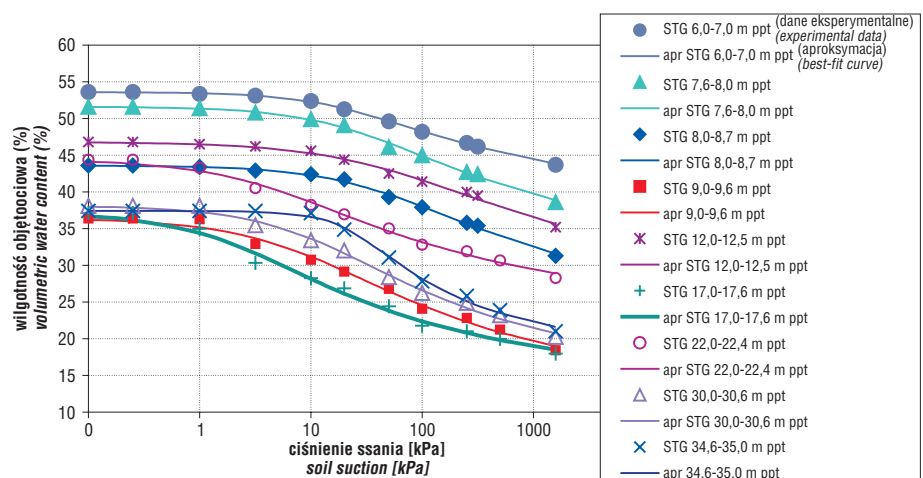
Podstawową charakterystyką opisującą zachowanie się gruntów nienasyconych jest zależność między wilgotnością a ciśnieniem ssania gruntu, określana w literaturze jako krzywa charakteryzująca układ grunt–woda (Fredlund & Xing, 1994). W fizyce gruntów krzywa ta przedstawia najczęściej zależność między wilgotnością objętościową gruntu (Θ) i ciśnieniem ssania wyrażonym w kPa. W praktyce inżynierskiej wilgotność objętościowa często zastępowana jest wilgotnością w procentach masy. Innym jeszcze sposobem przedstawiania tej zależności jest użycie stopnia nasycenia gruntu zamiast wilgotności. Wszystkie powyższe parametry mogą być ponadto użyte w formie znormalizowanej. Ssanie gruntu może być wyrażone jako ssanie matrycowe lub całkowite. Przy wysokich ciśnieniach ssania, powyżej 1500 kPa, ssanie matrycowe i całkowite są generalnie uznawane za równorzędne. Z powyższych względów, krzywa charakteryzująca układ grunt–woda może przybierać różne postacie. W literaturze polskiej zależność tę potocznie nazywa się krzywą retencji lub krzywą pF (Kowalik, 1973) ponieważ ciśnienie ssania wyrażane jest w różnych jednostkach, między innymi pF.

Do określenia zależności między wilgotnością a ciśnieniem ssania wybrano 17 miopliocenijskich z różnych głębokości z polska badawczego na Stegnach. Badania składu mineralnego wykonane w oparciu o analizę derywatograficzną wykazały, że głównymi składnikami iłów miopliocenijskich są minerały ilaste (od 50 do 84%) i kwarc (od 14 do 46%). Akcesorycznie występuje getyt i syderyt. Generalnie, w badanych próbkach wśród

minerałów ilastych dominuje beidellit i illit (Wójcik, 2003; Barański i in., 2004).

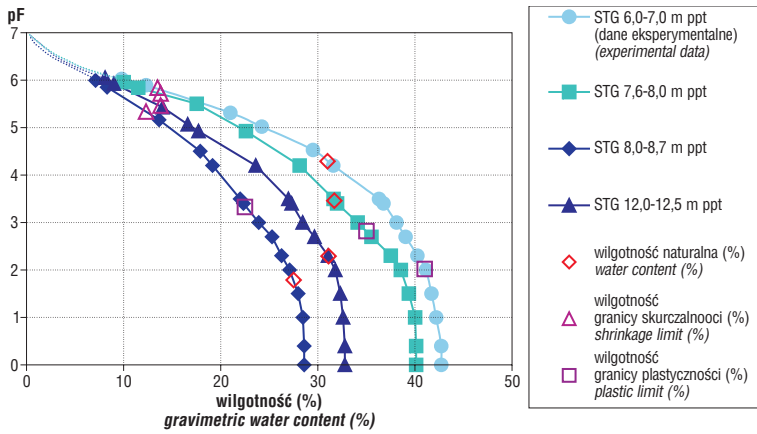
Badania wykonano przy użyciu talerzy ciśnieniowych firmy Soilmoisture Equipment Corporation. Metodę tę opisali Richards i Fireman w 1943 r. (Lee & Wray, 1995). Głównymi składnikami aparatu są: komora ciśnieniowa, porowaty, ceramiczny talerz i kompresor dostarczający ciśnienie. Talerz ceramiczny jest tu wykorzystany jako element zapewniający ciągłość porowatego ośrodka gruntu, umożliwiając przepływ wody z próbki gruntu na zewnątrz układu. Płyta ceramiczna stanowi też granicę pomiędzy wysokim ciśnieniem panującym wewnątrz komory a niskim, atmosferycznym, znajdującym się po stronie zewnętrznej. Na początku badania talerz zostaje nasycony wodą i zamknięty szczelnie w komorze ciśnieniowej. Poziom ssania gruntu jest wymuszony dowolnie ustalonym ciśnieniem panującym wewnątrz komory. Zadane ciśnienie ma na celu wyparcie pewnej ilości wody zawartej w ośrodku ceramicznym oraz zawartej w badanej próbce gruntu i doprowadzenie całego układu do stanu równowagi. Ilość wody, jaka pozostanie w badanym gruncie, jest zależna od przyłożonego ciśnienia zewnętrznego i od zdolności gruntu do zatrzymania określonej ilości wody, czyli od jego ssania. Dzięki tej metodzie można wykonać szereg oznaczeń dla badanego gruntu przy różnych ciśnieniach wewnętrznych. Ssanie wyznaczone tą metodą jest ssaniem matrycowym. Oznaczenia wykonane można na próbkach preparowanych lub na próbkach o niernaruszanej strukturze. Metoda umożliwia pomiar ciśnienia ssania do pF 4,2, czyli do 1600 kPa. W naszej strefie klimatycznej jest to zakres zupełnie wystarczający gdyż grunty rzadko przesuszane są do tak wysokiego poziomu ssania.

Krzywe zostały wyznaczone na podstawie 11 oznaczeń w zakresie od 0,1 do 1600 kPa (od pF 0 do 4,2). Każde oznaczenie wykonano na co najmniej 3 (max 8) identycznych próbkach gruntu, a podane krzywe są średnią arytmetyczną.



Ryc. 2. Krzywa charakteryzująca układ grunt–woda dla iłów miopliocenijskich ze Stegien

Fig. 2. Soil–water characteristic curve for mio-pliocene clay from Stegny



Ryc. 3. Wykresy wilgotności w funkcji ciśnienia ssania z uwzględnieniem granic konsystencji
Fig. 3. Soil-water characteristic curve considering limits of consistence

tyczną uzyskanych wyników (ryc. 2 — *symbolem oznaczono dane eksperymentalne, linią — aproksymacja).

Do interpretacji krzywych charakteryzujących układ grunt-woda zaproponowano szereg równań empirycznych. W niniejszej pracy skorzystano z równania trójparametrowego Fredlunda i Xinga (1994) następującej postaci:

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ 1 + \left[\frac{u_a - u_w}{a} \right]^n \right\}^m}$$

θ_s — wilgotność objętościowa,

θ_w — wilgotność objętościowa w stanie pełnego nasycenia,

$u_a - u_w = \Psi$ — ssanie matrycowe,

a, n, m — parametry aproksymacyjne zależności między wilgotnością objętościową a ssaniem matrycowym

Wykorzystując metodę aproksymacji średniokwadratowej funkcji charakteryzującej układ grunt-woda w wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wystarczającą zgodność krzywej teoretycznej ze zbiorem punktów eksperymentalnych (Wójcik, 2003; Barański i in., 2004).

Określone w badaniach zależności pomiędzy ciśnieniem ssania i wilgotnością wykazały, że wraz ze wzrostem ciśnienia ssania maleje wilgotność. W przypadku badanych iłłów mio-pliocenicznych stwierdza się wprost proporcjonalną zależność między procentową zawartością frakcji iłowej i wilgotnością objętościową stanu pełnego nasycenia. Między zawartością frakcji iłowej (f_i), stopniem plastyczności (I_L) a ciśnieniem ssania ($u_a - u_w$) iłłów

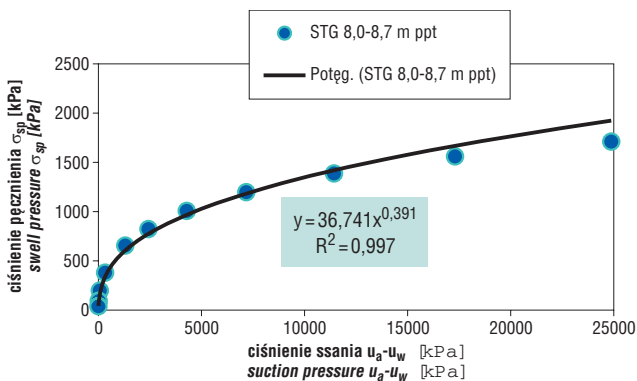
mio-pliocenicznych przy wilgotności naturalnej, istnieje zależność w postaci płaszczyzny o równaniu $\log(u_a - u_w) = -2,46 + 7,53f_i - 7,63I_L$, której kwadrat współczynnika korelacji wynosi 0,943 (Wójcik, 2003).

Wartość ciśnienia ssania zmienia się od zera do wartości bardzo dużych, niekiedy do ponad 100 MPa. Na ryc. 3 przedstawiono zależność wilgotności w procentach masy od ciśnienia ssania dla całego zakresu skali ciśnień ssących dla wybranych próbek. Powyżej wartości ciśnienia pF 4,2 czyli 1600 kPa pomiarów dokonano metodami psychrometrycznymi oraz metodą bibuły filtracyjnej (Wójcik, 2003). Na krzywe retencji naniesiono wartości wilgotności naturalnej, a także granic konsystencji: skurczalności i plastyczności. Dla iłłów mio-pliocenicznych wilgotność granicy skurczalności osiąga wartości ciśnień ssania powyżej 10 000 kPa. Przy wilgotności równej granicy plastyczności wartości ciśnienia ssania iłłów znajdują się w między 10 a 300 kPa. Podobnego rzędu wyniki uzyskali Williams i Pidgeon (1983). Dla gruntów południowoafrykańskich przy wilgotności równej granicy skurczalności ciśnienie ssania osiąga wartość nawet powyżej 100 000 kPa ($pF > 6$) w strefie przypowierzchniowej, na głębokości 6 m ppt ssanie równa się 4,8 pF, na głębokości 15 m — 3,8 pF. Przy wilgotności równej granicy plastyczności wartość ciśnienia ssania utrzymuje się jeszcze powyżej 100 kPa.

Ciśnienie pęcznienia i ciśnienie ssania zależą od wielu czynników, między innymi od wilgotności gruntu. Wraz ze wzrostem wilgotności wartości obu ciśnień maleją. Zależność funkcyjna między ciśnieniem pęcznienia a ciśnieniem ssania może być źródłem informacji potrzebnych do prognozowania zachowania się gruntów poddanych zmianom wilgotności. Na podstawie powyższej zależności oraz znajomości ciśnienia ssania można szybko przewidzieć podatność danego gruntu na pęcznienie. Przedstawiona zależność wskazuje na wzrost ciśnienia pęcznienia wraz ze wzrostem ciśnienia ssania (ryc. 4).

Podsumowanie

Ssanie najdokładniej opisuje stan gruntu nienasyconego. Znajomość tego parametru wykorzystywana w analizie głównych zagadnień mechaniki gruntów takich jak wytrzymałość, odkształcalność i przepuszczalność (Fredlund, 1995). Krzywa charakteryzująca układ grunt-woda daje wiele informacji odnośnie potencjalnej możliwości danego gruntu wchłonięcia wody lub jej utraty przy przejściu z danego poziomu ssania na wyższy lub niższy poziom,



Ryc. 4. Zależność między ciśnieniem pęcznienia a ciśnieniem ssania dla iłłów mio-pliocenicznych

Fig. 4. Relationship between swell pressure and suction pressure for mio-pliocene clay

a także aktualnego poziomu ssania na podstawie informacji o aktualnej wilgotności/nasytenu badanego gruntu. Mając takie informacje można wnioskować o skurczu lub pęcznieniu gruntu, a więc prognozować procesy deformacji podłoża.

Znajomość krzywej charakteryzującej układ grunt-woda jest, między innymi, przydatna w rolnictwie i hodowli roślin do określenia ilości wody potrzebnej do nawodnień. Eksperymentalne obserwacje wskazują, że przy ssaniu powyżej 4,2 pF woda zawarta w gruncie nie jest już dostępna dla roślin. Wartość tę określono jako punkt więdnienia roślin. Jednocześnie określono dolną granicę ilości wody, która może być zmagazynowana w glebie (wg różnych autorów są to wartości pF 2, pF 2,4 lub pF 2,57). Poniżej tych wartości rośliny wykazują oznaki braku tlenu w glebie, co objawia się zahamowaniem ich wzrostu. Krzywa charakteryzująca układ grunt-woda (krzywa pF) dostarcza zatem informacji co do ilości wody, jaka może być optymalnie wykorzystana przez rośliny.

Między krzywą charakteryzującą układ grunt-woda a zachowaniem się gruntu istnieje wyjątkowy związek, dlatego krzywa ta może być podstawą do szacowania parametrów gruntów nienasyconych (Fredlund & Xing, 1994). Na jej podstawie obliczane są przepływy w nienasyconych ośrodkach gruntowych. Istnieje kilka empirycznych rozwiązań zagadnienia przepływu w gruntach nienasyconych. Bazują one na znajomości dwóch zasadniczych charakterystyk: zależności między wilgotnością a ciśnieniem ssania (krzywa charakteryzująca układ grunt-woda) oraz współczynnika przepuszczalności w stanie pełnego nasycenia (współczynnika filtracji).

Literatura

- AITCHISON G. D. 1965 — Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas. Statement of the Review Panel, Engineering Concepts of Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils. Butterworth. London: 7–22.
- ASTM D 5298–94 — Standard test methods for measurement of soil potential (suction) using filter paper. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- BARAŃSKI M., KACZYŃSKI R., BOROWCZYK M., KRAUŻLIS K., TRZCIŃSKI J., WÓJCIK E., GRANACKI W., SZCZEPAŃSKI T., ZAWRZYKRAJ P. 2004 — Ocena zachowania się ilów plicieńskich ze Stegien w warunkach naprężeń efektywnych. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN Nr 5T12B 041 22. Archiwum Wydziału Geologii.
- FREDLUND D.G. 1995 — The scope of unsaturated mechanics: An overview. W: Unsaturated soils. Alonso, E.E., Delage, P. (eds): 1155–1177. Balkema.
- FREDLUND D.G. & RAHARDJO H. 1993 — Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- FREDLUND D.G. & XING A. 1994 — Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31: 521–532.
- KOWALIK P. 1973 — Zarys fizyki gruntów. Politechnika Gdańska. Gdańsk.
- KUMOR M.K. 1990 — Awaria budynków posadowionych na ekspansywnych ilach trzeciorzędowych w Bydgoszczy. Przegląd Budowlany, 11: 471–476.
- KUMOR M.K. & CIESIELSKI Z. 1984 — Awaria budynku mieszkalnego posadowionego na ile plicieńskim. Inżynieria i Budownictwo, 10: 372–375.
- LEE H.C. & WRAY W.K. 1995 — Techniques to evaluate soil suction — A vital unsaturated soil water variable. W: Alonso i Delage (eds) Unsaturated soils, p. 615–622.
- RIDLEY A. M. & WRAY W. K. 1995 — Suction measurement: A review of current theory and practices. W: Alonso i Delage (eds) Unsaturated soils, p. 1293–1322.
- WILLIAMS A.A. & PIDGEONT J.T. 1983 — Evapo-transpiration and heaving clays in South Africa. Géotechnique, 33: 141–150.
- WÓJCIK E. 2003 — Wpływ ciśnienia ssania na przepuszczalność wybranych gruntów spoistych Warszawy. Rozprawa doktorska. Wydział Geologii UW. Warszawa.

UWAGA! ZASADY PRENUMERATY:

Prenumeratę krajową przyjmują jednostki kolportażowe RUCH, właściwe dla miejsca zamieszkania lub siedziby prenumeratora. Prenumeratę ze zleceniem wysyłki za granicę przyjmuje RUCH S.A., ul. Jana Kazimierza 31/33, 01-248 Warszawa, konto PBK SA, IV Oddział Warszawa, nr 68124010531111000004430494. Dostawa odbywa się pocztą zwykłą w ramach opłaconej prenumeraty, z wyjątkiem zlecenia dostawy pocztą lotniczą, której koszt w pełni pokrywa zamawiający. Zlecenia na prenumeratę dewizową, przyjmowane od osób zamieszkałych za granicą, są realizowane od dowolnego numeru w danym roku kalendarzowym. Informacje o warunkach prenumeraty i sposobie zamawiania udziela RUCH S.A., tel. 53-28-812; 53-28-813.

Wpłaty na prenumeratę są przyjmowane wyłącznie na okresy kwartalne, a terminy przyjmowania wpłat — na teren kraju i za granicę — są następujące: do 20.11 — na I kwartał następnego roku, do 20.02 — na II kwartał danego roku, do 20.05 — na III kwartał, do 20.08 — na IV kwartał. Cena prenumeraty kwartalnej wynosi **36 zł**, a za granicę jest o 100% wyższa.

Dostawa zamówionej prasy następuje:

- przez jednostki kolportażowe RUCH — w sposób uzgodniony z zamawiającym,
- ponadto istnieje możliwość indywidualnej i zbiorowej prenumeraty *Przeglądu Geologicznego*

— bezpośrednio w Państwowym Instytucie Geologicznym,

Prenumeratę można zamawiać, wnosząc opłatę z góry, przy czym przez cały czas prenumeraty będzie obowiązywała cena z dnia jej rozpoczęcia.

Zgłoszenia na prenumeratę przyjmuje w Państwowym Instytucie Geologicznym **Sekcja Dystrybucji Wydawnictw PIG**, gmach A, pokój 1 (parter), tel. 849-53-51 wew. 403 lub 229. Prenumeratę można też zgłaszać listownie na ten adres: Państwowy Instytut Geologiczny, **Sekcja Dystrybucji Wydawnictw PIG**, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa.

Podstawą przyjęcia prenumeraty będzie nadesłanie na nasz adres zamówienia oraz kopii dowodu wpłaty, dokonanej na konto Państwowego Instytutu Geologicznego w BPHPBK S.A., Oddz. w Warszawie ul. Jasna 1, nr 79 1060 0076 0000 4010 2000 2100.