

OSIADANIE ZAPADOWE LESSÓW W ŚWIETLE BADAŃ MIKROSTRUKTURALNYCH

UKD 624.131.23'431.4'542 + 552.524''12.086'' : 537.533.6 : 551.793.9(438)

Osiadanie zapadowe lessów jest jednym z bardziej interesujących zjawisk, obserwowanym w określonych litologicznych typach lessów, poddanych nasyceniu wodą.

Istniejąca światowa literatura na ten temat jest niezmiernie bogata. Niełatwe więc byłoby jej uporządkowanie, gdyż autorzy różnych prac, w zależności od stopnia rozpoznania przyczyn warunkujących to zjawisko, podają różne kryteria jego oceny.

W Polsce również wielu badaczy zajmowało się problemem osiadania zapadowego (3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 14 i in.), wiążąc najczęściej wartości i_{mp} ¹ lessów z ich genezą, litologią (i wilgotnością) oraz ogólnie z cechami strukturalno-teksturalnymi (w tym z porowatością).

Wieloletnie badania autorki prowadzone nad lessami różnych regionów Polski wskazują że:

1) osiadanie zapadowe lessów najintensywniej zachodzi w najmłodszych, w danych profilach stratygraficznych, poziomach lessów. Poziomami o nietrwałych strukturach w regionalnej skali Polski są najczęściej młodoplejstocenijskie lessy subaeralne, określone jako lessy młodsze górne (12) i wiązane ze zlodowaczeniem Vistulian,

2) osiadanie zapadowe obserwuje się prawie wyłącznie w lessach wykształconych w facji pylastej (cząstek poniżej 0,002 mm nie więcej niż kilkanaście procent),

3) lessy te, wiązane z pierwotną akumulacją eoliczną, mają na ogół teksturę bezładną (w makro skali), są niezwierniałe, koloru jasnożółtego, węglanów powyżej 5%, zachowują pionową łupliwość ścian i są związane z obszarami wysoczyzn.

Wtórne procesy polegające na cyklicznych zamarzaniach i odmarzaniach, np. w okresach zimowych, mogą również doprowadzić do zwiększenia nietrwałości strukturalnej poziomów lessowych nie tylko młodszych górnych, ale i starszych, znajdujących się w zasięgu oddziaływania przemarzania sezonowego. Nie dziwi zatem lokalnie stwierdzana podwyższona wrażliwość strukturalna starszych plejstocenijskich poziomów lessowych.

Wynika więc z tego, że osiadanie zapadowe w lessach, bądź utworach pyłowych, jest zjawiskiem odzwierciedlającym istnienie struktur pierwotnych i wtórnych. Do czasu jednak zastosowania najnowocześniejszych technik instru-

mentalnych, analiza przyczyn warunkujących osiadanie zapadowe mimo wszystko najczęściej miała charakter jakościowy.

Wprowadzenie do badań lessów elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) znacznie rozszerzyło wiedzę na temat ich cech strukturalno-teksturalnych (1, 6, 7, 15 i in.), a do pogłębienia znajomości charakteru przestrzeni porowej w poważnym stopniu przyczyniły się wyniki badań uzyskiwane z porozymetru ciśnieniowego. Tak więc proces osiadania zapadowego w świetle najnowszych teorii, można by poddać następującej analizie, która oczywiście ogólnie nawiązuje do wcześniejszych pojęć, takich jak: geneza, litologia oraz struktura i tekstura.

Z analiz granulometrycznych wiadomo, że lessy w stanie naturalnym są zbudowane głównie z agregatów i mikroagregatów², a ich naturalna wilgotność (poza strefą aeracji oraz oddziaływania zwierciadła wód podziemnych) na ogół jest niższa od maksymalnej wilgotności higroskopijnej, co oznacza, że zawierają one tylko wodę silnie związaną. Podstawowym elementem strukturalnym lessów jest agregat o wymiarach 0,01–0,1 mm (lub 10–100 μm), mający kształt koncentrycznej globulki kształtu elipsoidalnego.

Z przeprowadzonych badań (13) w SEM wynika, że na pierwotnym jądrze (ryc. 1), zbudowanym z kwarcu, rzadziej skalenia, spoczywa cienka otoczka żeluz amorficznej SiO₂, na niej powłoka – „koszulka” drobnodispersyjnego węglanu wapnia (CaCO₃), która jest jakby podziurawiona. Na niej z kolei występuje powłoka polimineralna, zbudowana z minerałów ilastych (tworzących mikroagregaty), tlenków żelaza, amorficznej SiO₂, rozproszonych węglanów i drobnodispersyjnego kwarcu, przy czym zawartość CaCO₃ związanego z otaczającymi jądro powłokami stanowi ponad połowę zawartości węglanów w lessach, w przeliczeniu na całą skalę.

Stwierdzono również, że jądro zbudowane z elementarnego „bloku” kwarcu ma kształt ditrygonalnej piramidy (ryc. 2) o wymiarach rzędu 0,01–0,05 mm (lub 10–50 μm), przy czym kryształy kwarcu składają się z oddzielnych „bloków” formy ditrygonalnej, zbudowanej jak gdyby

² Wg B. Grabowskiej-Olszewskiej, V. Osipova, V. Sokołowa (w druku):

mikroagregat – jest to zespół cząsteczek ilastych lub ilastych oraz piaszczysto-pylastych, trwały w zawiesinie przy braku dyspergatora i zewnętrznych wpływów fizycznych. Najważniejsza cecha jaką jest jego trwałość w wodzie wynika z dużej energii wiązań międzycząsteczkowych, których nie jest w stanie zniszczyć rozprężające oddziaływanie otoczek wodnych;

agregat – jest to duży element strukturalny zbudowany z mikroagregatów oraz pojedynczych ziarn, nietrwały w zawiesinie, o ile nie występują wiązania cementacyjne. Rozmiary agregatów mogą wahać się od pojedynczych mikrometrów do dziesiątków, a niekiedy nawet do setek mikrometrów (w zależności od składu mineralnego i chemicznego). W odróżnieniu od mikroagregatów, agregaty mają zwykle kształty izometryczne.

¹ i_{mp} – wskaźnik osiadania zapadowego, który wyznacza się w badaniach edometrycznych wg wzoru:

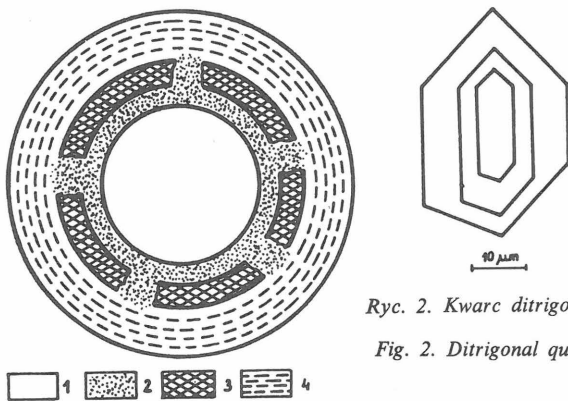
$$i_{mp} = (h' - h'') : h_0$$

gdzie: h_0 – pierwotna wysokość próbki o naturalnej wilgotności przed wywarciem ciśnienia,

h' – wysokość próbki o naturalnej wilgotności pod danym ciśnieniem, np. 0,2 MPa,

h'' – wysokość próbki całkowicie nasyconej wodą, znajdującej się pod tym samym ciśnieniem, np. 0,2 MPa.

Ze względu na wartości i_{mp} określa się rodzaj struktury lessów: przy $i_{mp} \geq 0,02$ – struktura nietrwała, $i_{mp} < 0,02$ – struktura trwała.



Ryc. 1. Schemat budowy agregatu

1 – kwarc, 2 – żel amorficznej krzemionki, 3 – CaCO_3 , 4 – minerały ilaste + Fe_2O_3 + amorficzna SiO_2 + CaCO_3 + kwarc

Fig. 1. Scheme of structure of aggregate

1 – quartz, 2 – gel of amorphous silica, 3 – CaCO_3 , 4 – clay minerals + Fe_2O_3 + amorphous silica + CaCO_3 + quartz

z powkładanych coraz mniejszych ditrygonalnych kryształów.

Formy te są od siebie oddzielone liniowymi defektami („kanałami” dyslokacyjnymi) o szerokości 200–300 nm, zgodnymi z łupliwością kryształu. Przypuszcza się więc na tej podstawie, że procesy mrozowe – zamarzanie i odmrażanie wody w tych „kanałach” również mogą doprowadzać do dezintegracji ziarn kwarcu, a tym samym do podwyższenia ogólnej porowatości lessów.

Lessy, zwłaszcza subaeralne, charakteryzują się najczęściej strukturą szkieletową (7), która jest wykształcona w postaci luźnego szkieletu, z równomiernie rozmieszczonymi porami (ryc. 3)³. Szkielet ten jest zbudowany głównie z agregatów, łączących się bardzo często przez zewnętrzne powłoki polimieralne, tworzące typ „mostków” ilastych (ryc. 4). W związku z tym wiązania typu punktowo-koagulacyjnego między elementami strukturalnymi są uwarunkowane najczęściej siłami o charakterze jonowo-elektrostatycznym. Orientacja elementów strukturalnych w skali mikro nie występuje.

Tak uformowany przestrzenny model budowy wewnętrznej lessów jest układem metastabilnym, gdyż wartość sił działających między poszczególnymi agregatami są każdorazowo uzależnione od wilgotności oraz rozkładu porów w skale i szacowane na ok. $2 \cdot 10^{-8}$ do $4 \cdot 10^{-8}$ N.

Porozymetryczne badania rozkładu porów⁴, wykonane dla wielu próbek o naturalnej wilgotności pochodzących z poziomu lessu subaeralnego młodszego górnego różnych rejonów lessowych Polski i uznanego za poziom charakteryzujący się szczególną zapadowością, wykazuje że:

1) dominujące są mikropory poniżej $1 \mu\text{m}^5$, a ich

³ Wyboru fotografii próbek badanych w SEM (ryc. 3, 4) dokonała mgr Elżbieta Kuźniar.

⁴ Z zastosowaniem porozymetru f-my CARLO-ERBA, Mod. 70.

⁵ Wg klasyfikacji B. Grabowskiej-Olszewskiej, V. Osipowa, V. Sokołowa (w druku), uzupełnionej przez autorkę:

ultrapory – wymiary mniejsze od $0,1 \mu\text{m}$, całkowicie wypełnione wodą silnie związaną;

mikropory – wymiary od $0,1$ do $10 \mu\text{m}$, w których jest możliwe kapilarne podsiąkanie, a przy pewnym gradiencie ciśnienia, także jej filtracja;

mezopory – wymiary od $10 \mu\text{m}$ do $1000 \mu\text{m}$ (1 mm);

makropory – wymiary powyżej $1000 \mu\text{m}$ (1 mm).

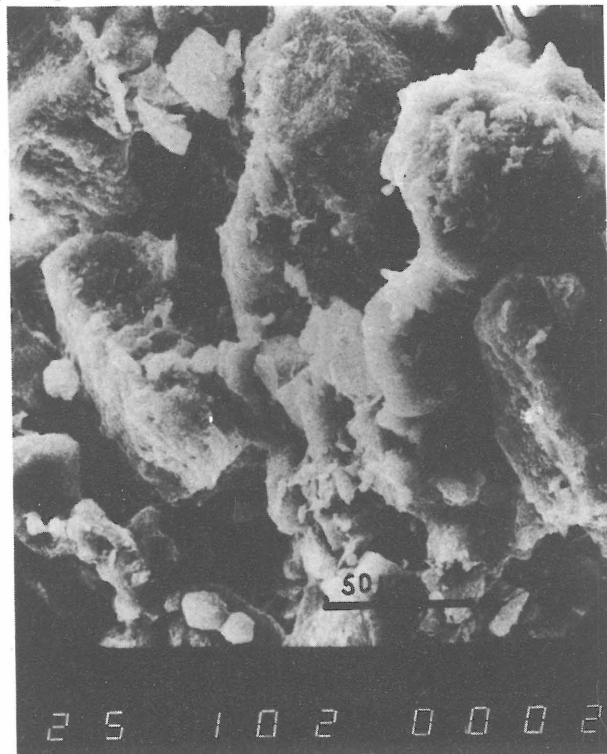
Ryc. 2. Kwarc ditrygonalny

Fig. 2. Ditrigrional quartz

ilościowy udział zamyka się najczęściej w przedziale osiemdziesięciu kilku do dziewięćdziesięciu kilku procent (tab., ryc. 5a);

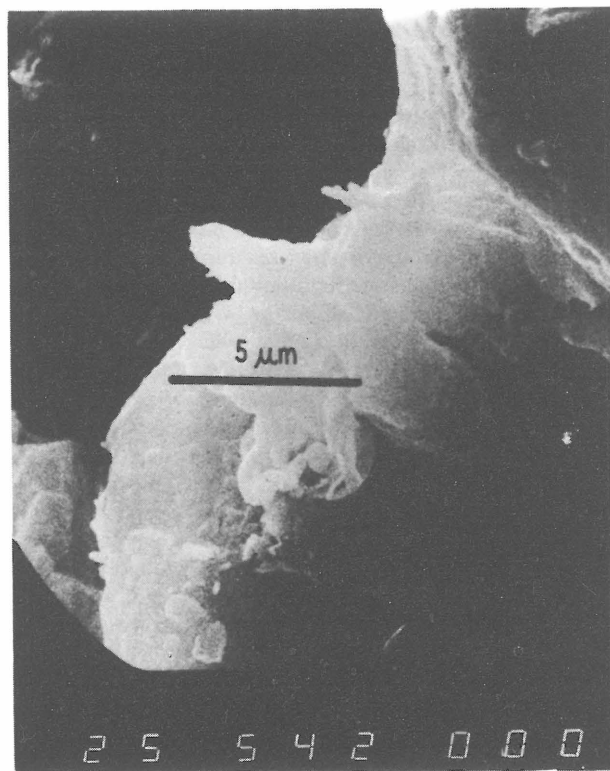
2) mikropory $1-10 \mu\text{m}$ stanowią na ogół kilka procent;

3) mezopory o wymiarach $10-70 \mu\text{m}$ są obecne najczęściej w ilościach od ułamkowych wartości procent do paru procent;



Ryc. 3. Mikrostruktura szkieletowa lessu

Fig. 3. Microstructure of loess skeleton



Ryc. 4. „Mostek” ilasty

Fig. 4. Clay bridge

PRZYKŁADOWE ZESTAWIENIE POROZYMETRYCZNYCH WYNIKÓW BADAŃ LESSÓW MŁODSZYCH GÓRNYCH REJONU ZAMOŚCIA, PRZEWORSKA, ŁAŃCUTA, RZESZOWA

Nr próbki	Porowatość %				Procentowy rozkład wymiarów porów w μm					
	z nasycenia	z porozymetru	100–70	70–50	50–40	40–30	30–20	20–10	10–1	poniżej 1
próbki o naturalnej wilgotności										
1	44,57	39,34	0	1,17	4,68	2,34	1,68	1,61	3,56	84,78
2	36,26	31,04	0	0,32	1,29	0,64	1,09	1,30	2,87	92,49
3	44,38	33,51	0	0,29	1,14	0,57	0,77	0,86	5,66	90,71
4	45,28	34,19	0	0,41	1,64	0,82	1,38	1,65	5,73	88,37
5	43,66	33,05	0	0,22	0,90	0,45	0,63	0,72	3,60	93,47
6	44,06	34,65	0	0,26	1,04	0,52	2,06	2,81	4,84	88,46
7	43,93	33,20	0	0,75	0,88	0,58	0,44	2,77	4,47	89,67
próbki całkowicie nasycone wodą pod ciśnieniem 0,2 MPa, a następnie odciążone										
1a	41,24	31,53	0	0,48	1,93	0,97	0,64	0,49	2,22	93,27
2a	36,57	32,14	0	0	0	0	0,48	0,71	2,55	96,26
3a	33,07	25,42	0	0	0	0	0	0	2,77	97,23
4a	38,12	29,31	0	0,38	1,52	0,57	–	–	2,95	89,36
5a	37,76	31,30	0	0,14	0,55	0,27	0,59	0,54	3,21	94,50
6a	38,62	31,35	0	0,20	0,80	0,40	0,57	0,65	3,29	95,10
7a	43,13	30,85	0,10	0,35	0,19	0,33	0,39	2,15	2,23	94,22
próbka całkowicie nasycona wodą pod ciśnieniem 0,3 MPa, a następnie odciążona										
7b	42,01	27,71	0,12	0,37	0,23	0,39	0,47	2,21	1,94	94,16

4) mezopory o wymiarach 70–100 μm nie zostały w zasadzie stwierdzone.

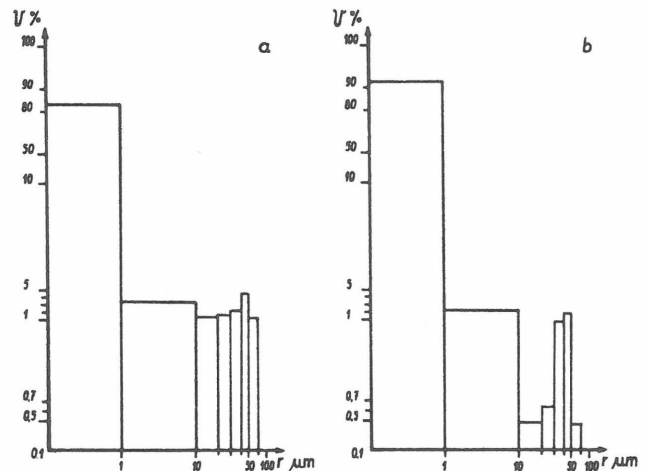
Próbki poddane ciśnieniu 0,2 MPa i 0,3 MPa, nasycone wodą, a następnie odciążane, dające wartości $i_{mp} \geq 0,02$, wykazały wyraźną redukcję udziału mezoporów 1–70 μm , przy wzroście procentowego udziału mikroporów o wymiarach poniżej 1 μm (ryc. 5b). Ten wzrost można by wytłumaczyć zwiększeniem się roli wiązań koagulacyjnych wskutek odciążenia nasyconych próbek wodą. Potwierdzone więc zostały obserwacje autorki (6) o niewielkiej roli wiązań cementacyjnych w lessach subaeralnych młodszych górnych.

Pozostaje jeszcze kwestia udziału w procesie osiadania zapadowego mezoporów o wymiarach 100 μm –1000 μm i makroporów. Jeżeli porówna się wyniki badań porozymetrycznych, które w omawianym wypadku dawały rozkład porów do 100 μm , z porowatością badaną przez nasycenie (tab.), widzi się wówczas, iż wyniki porowatości oznaczonej tymi dwiema metodami różnią się między sobą o około 10% na korzyść wartości uzyskanych metodą nasycenia. Jest to oczywiście uzasadnione, biorąc pod uwagę fakt zakresu stosowalności metody porozymetru.

Rzeczywisty więc udział porów w procesie osiadania zapadowego należy odnieść do niewielkiej redukcji mikro- i mezoporów o wymiarach 1–70 μm (łącznie o kilka procent) oraz dalszej redukcji mezoporów o wymiarach 100–1000 μm (1 mm). Makropory również powinny odgrywać pewną rolę w tym procesie, ale wydaje się, że nie tak znaczną jak to się przyjmuje. Na fakt ten, na podstawie badań eksperymentalnych, zwróciła uwagę autorka (5).

Przedstawione więc wyniki badań upoważniają do stwierdzenia, że nie ma prostej korelacji między ogólną porowatością a wskaźnikiem osiadania zapadowego, wskazującym na wrażliwość strukturalną. Faktyczną rolę w tym procesie odgrywają mikro- i mezopory (1–1000 μm), przy pewnym udziale makroporów, przy czym ich łączny procentowy udział jest szacowany na około kilkanaście procent porowatości ogólnej, przy i_{mp} średnio 0,03. Resztę, jak wiadomo, stanowią ultra- i mikropory, nie biorące udziału w tym procesie.

Przerwanie więc pod wpływem wody słabych wiązań



Ryc. 5. Typowy rozkład porów

a) próbka o naturalnej wilgotności, b) próbka całkowicie nasycona wodą pod ciśnieniem 0,2 MPa, a następnie odciążona

Fig. 5. Typical distribution of pore size

a – sample with natural moisture, b – sample completely saturated with water under pressure of 0.2 MPa and subsequently relieved

punktowo-koagulacyjnych, utrzymujących „mostki” ilaste w strukturze szkieletowej i redukcję mikro- i mezoporów o wymiarach 1–1000 μm oraz częściowo makroporów, można by uznać za główne przyczyny warunkujące osiadanie zapadowe. Obserwacje w SEM próbek nasyconych wodą i poddanych różnym ciśnieniom, potwierdziły dodatkowo fakt ich przebudowy strukturalnej.

Nasuwa się także wniosek, że prosta korelacja wskaźnika osiadania zapadowego lessów z ich porowatością lub wskaźnikiem porowatości, czy też wilgotnością lub stopniem wilgotności, jest oczywiście daleko posuniętym uproszczeniem. Najprawdopodobniej takie zależności istnieją, ale w odniesieniu do porów o wymiarach powyżej 1 μm . Mikropory natomiast o wymiarach do 1 μm , aczkolwiek

wpływają na wartości porowatości ogólnej, to jednak nie są „odpowiedzialne” za zapadowość lessów.

Z powyższych rozważań wynika, że problem osiadania zapadowego, jak zresztą i wszystkie inne właściwości gruntów, charakteryzujące trójwymiarowy rozkład ziarn i cząstek, muszą być wyjaśniane na podstawie pogłębionej analizy cech strukturalnych, uwarunkowanych budową szkieletu mineralnego, jego przestrzennego rozkładu, stopnia nasycenia wodą i wynikających stąd rodzajów wiązań.

Większość z tych składowych jest zmienna w czasie, zwłaszcza dla takich gruntów, jak lessy. Wynika ona zresztą (co szczególnie ma miejsce w wypadku lessów subaeralnych młodszych górnych) z oddziaływania wód gruntowych, opadowych, procesów mrozowych i innych procesów typowych dla strefy hipergenezy. Stąd więc prowadzone badania potwierdzają słuszność założenia, iż zapadowość (najczęściej stwierdzana w lessach) jest właściwością, która dla tego samego poziomu i tej samej głębokości może się zmieniać w szerokim przedziale wartości i_{mp} , tzn. od wartości poniżej 0,02 (struktury trwałe) do wartości powyżej 0,02 (struktury nietrwałe).

W zakończeniu autor pragnie podkreślić, iż przedstawione tu wyniki są efektem początkowego etapu badań nad problemem wrażliwości strukturalnej lessów na działanie wody. Kontynuacja tych badań niewątpliwie doprowadzi do dalszych uściśleń.

LITERATURA

1. Cegła J., Buckley T., Smalley I.J. — Microtextures of particles from some European loess deposits. *Sedimentology* 1972 vol. 17 no. 1/2.
2. Frankowski Z. — Wpływ litogenezy na fizyczno-mechaniczne właściwości lessów określane metodami polowymi. *Prz. Geol.* 1979 nr 1.
3. Grabowska B. — Korelacja pozycji stratygraficznej lessów i ich własności inżyniersko-geologicznych w profilu Gołębic. *Ibidem* 1961 nr 5.
4. Grabowska-Olszewska B. — Własności fizyko-mechaniczne utworów lessowych północnej i północno-wschodniej części świętokrzyskiej strefy lessowej na tle ich litologii i stratygrafii oraz warunków występowania. *Biul. Geol. Wydz. Geol. UW* 1963 t. 3.
5. Grabowska-Olszewska B. — Ocena wrażliwości teksturalnej utworów lessowych dla potrzeb budownictwa. *Prz. Geol.* 1966 nr 1.
6. Grabowska-Olszewska B. — Mikrostruktury utworów lessowych badane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). *Biul. Inst. Geol. Z badań czwartorzędu w Polsce.* 1976 nr 297.
7. Grabowska-Olszewska B., Osipov V., Sokolov V. — Atlas of the Microstructure of Clay Soils. PWN (w druku).
8. Kolasa W. — Geotechniczne własności lessów okolicy Krakowa. *Pr. Geol. Kom. Nauk Geol. PAN Oddz. w Krakowie* 1963 z. 18.
9. Kühn A. — Geologiczno-inżynierska charakterystyka obszaru katastrofalnych szkód budowlanych w Kłodzku. *Biul. Inst. Geol.* 1963 nr 182.
10. Malinowski J. — Uwagi o współczynniku makroporowatości lessów w Polsce. *Ibidem*.

11. Malinowski J. — Budowa geologiczna i własności geotechniczne lessów Roztocza i Kotliny Zamojskiej między Szczepczyszynem i Turobinem. *Pr. Inst. Geol.* 1964. t. 40.
12. Maruszczak H. — Stratigraphy and Chronology of the Vistulian Loesses in Poland. *Quaternary Studies in Poland* 1980 no. 2.
13. Minierwin A.W., Komisarowa N.N. — Formowanie struktury i tektury osadocznnych lessowych porod Minusinskiego Mieźgornogo Progiba. *Inż. Geol.* 1979 z. 1.
14. Rossiński B. — Komunikat dotyczący badań lessów i możliwości wzmocnienia ich struktury. *Konf. Kom. Inż. Łądowej PAN Warszawa* 1959.
15. Smalley I.J., Cabrera I.G. — The shape and surface texture of loess particles. *Geol. Soc. Am. Bul.* 1970 vol. 81 no. 5.

SUMMARY

The paper presents the results of studies on factors determining collapse in loesses, conducted for many years by the present author. Late Pleistocene subaerial loesses and some older ones, occurring within the extent of seasonal frost, were found to be most susceptible for development of this phenomenon.

The collapse takes place due to rupture of weak bonds supporting clay bridges between loess aggregates, resulting from the influence of water. This is accompanied by a change in distribution of size of pores. The collapse appears connected with reduction of micro- and mesopores of 1–1000 μm (1 mm) in size and also a part of macropores. The total percentage of these pores is estimated at about a dozen % of the total porosity. Micropores below 1 μm in size do not take part of this process despite of their marked share in the total porosity.

РЕЗЮМЕ

В статье представлены результаты исследований автора на тему причин обуславливающих просадку лёссов. Установлено, что самыми податливыми в этой области являются субэаральные ранее-плейстоценовые лёссы, а также старшие лёссы находящиеся в области воздействия сезонного промерзания. Просадка происходит в результате перерыва водой слабых связей удерживающих „глинистые мостики” между лёссовыми агрегатами. Это является также причиной изменения процентного распределения величин пор. Установлено также, что в процессе просадки происходит сокращение микро и мезопор размеров 1–1000 μm (1 мм), а также частично макропор, с тем что их общее процентное участие оценивается на около более десяти процентов общей пористости. Микропоры величиной до 1 μm , хотя в большой степени влияют на величину общей пористости, но всё таки не „ответствуют” за просадку лёссов.