

WPŁYW TRANSFORMACJI LESSU NA CECHY FILTRACYJNE

THE IMPACT OF LOESS TRANSFORMATION ON ITS FILTRATION CHARACTERISTICS

ANETA AFELT¹

Abstrakt. Przeanalizowano cechy ilościowe i przeprowadzono analizę stopnia uporządkowania przestrzeni porowej (wymiar fraktalny) lessów świeżych oraz przekształconych filtracyjnie. Wykazano powiązanie między słabą wodoprzepuszczalnością lessu świeżego, a procesem formowania retencji powierzchniowej w wymoku i wynikające z tego konsekwencje dla cech mikrostrukturalnych lessu. Wskazano wymoki, jako strefy preferencyjnej filtracji na obszarach lessowych.

Słowa kluczowe: less, filtracja, przestrzeń porowa, wymiar fraktalny.

Abstract. The quantitative characteristics have been analysed and the analysis of the degree of the pore space structure (fractal dimension) of natural and transformed loesses has been conducted. The relation between poor water permeability and retention in closed depressions has been proved and thus the consequences of that for microstructural characteristics of loess has been revealed. Closed depression has been identified as the areas of preferential filtration in loess areas.

Key words: loess, filtration, pore space, fractal dimension.

WSTĘP

Less należy do grupy skał osadowych. Jego licznym opisom, próbom jednoznacznego zdefiniowania oraz interpretacji genezy poświęcono ponad 200 lat badań w Europie, a pierwsze chińskie zapisy o nim sięgają 4 tys. lat (Smalley i in., 2001, 2011). Charakterystyczna jest wielowątkowość w badaniu osadu: połączenie cech makro- i mikroskopowych z właściwościami geologiczno-inżynierskimi, wodnymi oraz z genezą i warunkami towarzyszącymi depozycji. Właściwości lessu podlegają w środowisku przyrodniczym ewolucji: od procesu depozycji i konsolidacji osadu, przez wykształcenie typowych cech wskaźnikowych, do etapu przemian podepozycyjnych i wykształcenia osadu lessopo-

dobnego. Cykl ten jest konsekwencją właściwości strukturalnych i geochemicznych osadu. Istotne do interpretacji cech skały jest przyjęcie niestacjonarności jej właściwości w czasie. Zmiany cech osadu następują w wyniku interakcji wody ze skałą (Afelt, 2007a).

Z hydrogeologicznego punktu widzenia, less jest uznawany za skałę półprzepuszczalną (Bury, 1991, 1995), z reguły nie tworzy samodzielnych horyzontów wodonośnych. Współczynnik filtracji charakteryzuje się szeroką zmiennością: 0,04–0,4 m d⁻¹ (Mularz, Rybicki, 1999). Wody opadowe i roztopowe na obszarach lessowych podlegają rozdzielaniu na infiltrację oraz odpływ powierzchniowy jako

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Zakład Hydrologii, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa; e-mail: akafelt@uw.edu.pl

efekt spływu ponadfiltracyjnego, będącego konsekwencją niskiej wodoprzepuszczalności.

Przestrzenne zróżnicowanie dystrybucji powierzchniowej wody istotnie modyfikuje rzeźba płatów lessowych, różnicując lokalnie zasilanie. W efekcie, w zależności od położenia morfologicznego obserwuje się zróżnicowanie

cech geochemicznych i mikrostrukturalnych skały (Afelt, 2007c). Powiązanie etapu naturalnej transformacji lessu z cechami warunków filtracji wykazano na przykładzie porównania cech mikrostrukturalnych przestrzeni porowej lessu młodszego górnego (LMg) świeżego i przekształconego filtracyjnie (wymok²).

OBSZAR BADAŃ

Badania zlokalizowano w obrębie płatu lessowego Wyżyny Sandomierskiej, w strefie wododziału Czyżówki i Opatówki (wieś Łukawa Rządowa, 17 km na północ od Sandomierza) (fig. 1). Miąższość pokrywy lessowej przekracza tu 15 m, lokalnie osiąga 30 m (Czarnecki, 1996). Profil stratygraficzny osadu jest pełny (od LS – lessów starszych, po LMg), miąższość najmłodszej facji lessu (LMg) szacowana jest na 8 m (Czarnecki, 1996). Do badań szczegółowych wytypowano 3 pola eksperymentalne, reprezentujące typowe

formy rzeźby terenu (fig. 1): „wymok” (less przekształcony filtracyjnie, okresowo nasycony) oraz „stok” i „dział wodny” (less świeży, nienasycony). W celu zapewnienia jednorodności warunków przebiegu eksperymentu, badania polowe przeprowadzono w obrębie umownej kolumny lessu o górnym i dolnym ograniczeniu: 1,5–5,0 m p.p.t. Dolną granicę wyznaczono arbitralnie, w celu zachowania jednorodności facjalnej obiektu badań (LMg). Eksperyment polowy prowadzono w latach 2002–2004.

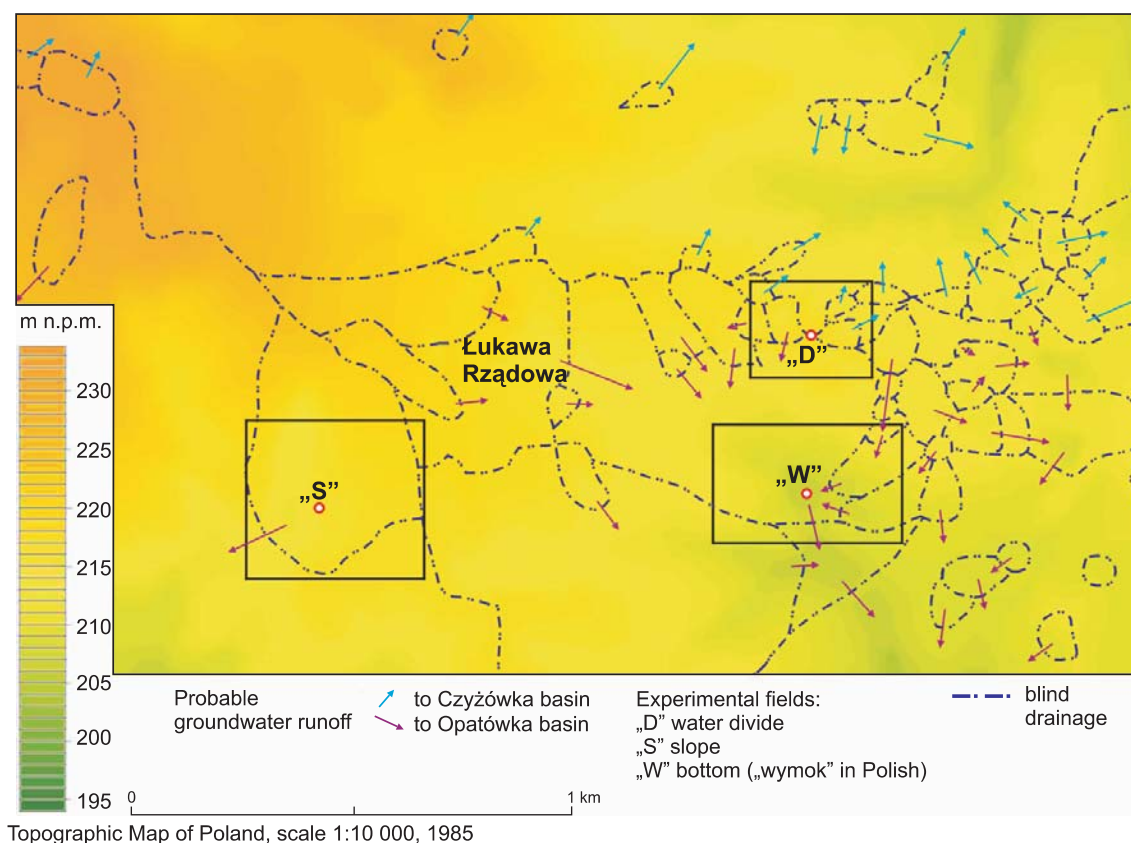


Fig. 1. Obszar badań (Łukawa k. Sandomierza)

Field study location (Łukawa near to Sandomierz, SE Poland)

² W literaturze funkcjonuje określenie *wymok* lub *werteb* jako nazwa dolnej partii lessowej zlewni bezodpływowej okresowo retencjonującej wodę (Maruszczak, 1954; Czarnecki, 1996); określenie pochodzi od wyrażenia „wymiękanie”, *wymięklisko* – miejsce stagnowania okresowego wód na powierzchni topograficznej powodujące gnicie (wymiękanie) podtopionej roślinności; występują w wierzchowinowej partii płatów lessowych, a w kolumnie skały poniżej cechy geochemiczne i mechaniczne znacząco odbiegają od lessu świeżego (Afelt, 2007a, b)

METODY BADAŃ

W celu stwierdzenia stanu mikrostruktury lessu przeprowadzono analizę stanu przestrzeni porowej skały w profilu pionowym (jednorazowy pobór prób skały o strukturze nie-naruszonej). Próbki pobrano za pomocą ręcznej sondy glebowej Ejikelkamp, w profilu odwiertu z głębokości 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 i 5,0 m p.p.t. Materiał badawczy poddano następnie preparatyce utrwalającej w komorze próżniowej w 2 równoległych cyklach: o przestrzeni porowej wysyconej żywicą termoluminescencyjną oraz w stanie naturalnym. Zdjęcia przestrzeni porowej lessu uzyskano z zastosowaniem SEM (skaningowy mikroskop elektronowy), a charakterystykę statystyczną populacji porów (kształt, średnica, obwód porów, przepuszczalność) obliczono z wykorzystaniem progra-

mu STIMAN. Miarę uporządkowania przestrzennego porów opisano ilościowo za pomocą wymiaru fraktalnego (fraktal pudełkowy, podstawą wymiarowania był obraz przestrzeni porowej uzyskany w SEM metodą katodoluminescencji; powiększenia 50, 100, 200, 400). Analizę ilościową przeprowadzono w płaszczyznach horyzontalnej i wertykalnej.

W profilu pionowym oznaczono ponadto: skład mineralny lessu metodami derywatograficzną (aparatury firmy SetarmLabsysTM TG-DTA12) i rentgenograficzną (Refleksyjny Dyfraktometr Roentgenowski DRON2.0), zawartość węglanów metodą Schaiblera oraz odczyn wyciągu wodnego skały.

Tabela 1

Parametry ilościowe przestrzeni porowej lessu
Quantitative parameters of the loess pore space

Obiekt	Podstawowe parametry przestrzeni porowej	Głębokość poboru próbki [m p.p.t.]					Wartość średnia
		1,5	2	3	4	5	
Pole „dział wodny”	powierzchnia horyzontalna						
	średnia średnica porów [μm]	16,71	17,79	16,98	16,44	10,09	15,60
	średnia powierzchnia porów [μm^2]	466,06	441,98	365,10	380,52	130,65	356,86
	średni obwód porów [μm]	173,32	181,74	167,30	160,77	111,28	158,88
	wsp. filtracji (mD) [cm/d]	0,7 [0,06]	0,37 [0,03]	0,32 [0,03]	0,44 [0,04]	0,04 [0,003]	0,38 [0,03]
	powierzchnia wertykalna						
	średnia średnica porów [μm]	16,55	13,21	14,68	16,31	8,25	13,80
	średnia powierzchnia porów [μm^2]	365,89	281,15	303,38	426,95	75,96	290,67
	średni obwód porów [μm]	145,35	137,17	142,07	176,04	97,48	139,62
	wsp. filtracji (mD) [cm/d]	0,47 [0,04]	0,46 [0,04]	0,29 [0,024]	0,71 [0,06]	0,02 [0,002]	0,39 [0,03]
Pole „stok”	powierzchnia horyzontalna						
	średnia średnica porów [μm]	13,88	11,88	14,64	13,05	17,32	14,15
	średnia powierzchnia porów [μm^2]	333,81	231,72	398,52	271,08	527,27	352,48
	średni obwód porów [μm]	150,10	131,27	175,69	140,97	202,47	160,10
	wsp. filtracji (mD) [cm/d]	0,75 [0,07]	0,37 [0,03]	0,45 [0,04]	0,44 [0,04]	0,65 [0,05]	0,53 [0,05]
	powierzchnia wertykalna						
	średnia średnica porów [μm]	12,53	22,19	19,92	15,45	12,95	16,61
	średnia powierzchnia porów [μm^2]	270,88	752,06	456,53	399,99	308,62	437,62
	średni obwód porów [μm]	133,73	268,79	215,74	177,14	140,52	187,19
	wsp. filtracji (mD) [cm/d]	0,45 [0,04]	0,48 [0,04]	0,37 [0,03]	0,59 [0,05]	0,45 [0,04]	0,47 [0,04]
Pole „wymok”	powierzchnia horyzontalna						
	średnia średnica porów [μm]	12,34	12,49	15,37	12,67	10,06	12,59
	średnia powierzchnia porów [μm^2]	307,45	290,10	467,57	332,79	140,19	307,62
	średni obwód porów [μm]	142,93	145,01	187,32	154,36	117,59	149,44
	wsp. filtracji (mD) [cm/d]	0,81 [0,07]	0,45 [0,04]	0,94 [0,08]	0,7 [0,06]	0,12 [0,01]	0,6 [0,05]
	powierzchnia wertykalna						
	średnia średnica porów [μm]	12,42	13,34	10,28	10,52	9,41	11,19
	średnia powierzchnia porów [μm^2]	232,44	371,30	174,90	158,38	100,38	207,48
	średni obwód porów [μm]	132,43	154,04	121,75	115,37	104,90	125,70
	wsp. filtracji (mD) [cm/d]	0,49 [0,04]	1,06 [0,09]	0,38 [0,03]	0,15 [0,01]	0,6 [0,05]	0,45 [0,04]

0,06 – wartość minimalna parametru, **1,06** – wartość maksymalna parametru, [0,004] – współczynnik filtracji [cm/d]
0,06 – minimum value, **1,06** – maximum value, [0,004] – filtration coefficient [cm/day]

WYNIKI I Dyskusja

Przeprowadzono diagnozę podstawowych cech geochemicznych lessu w polach badawczych. Less świeży w stowiskach „stok” i „dział wodny” charakteryzuje odczyn bliski obojętnemu (pH 7,2–7,7), a zawartość związków węglanowych wynosi 8–10%. Osad w „wymoku” charakteryzuje kwaśny odczyn wyciągu wodnego (pH 5,5–5,0), a w składzie mineralnym typowy jest brak węglanu wapnia. Charakterystyczna jest również obniżona zawartości minerałów ilastych (10–12%) w stosunku do lessu świeżego (15–20%). Przeważającym minerałem ilastym w „wymoku” jest illit (ok. 70%), jego zawartość w profilu pionowym jest mało zmienna. Jako minerały towarzyszące występują beidelit oraz kaolinit, przy czym udział kaolinitu wzrasta wraz z głębokością; prawidłowości tej nie stwierdzono w lessie świeżym.

Zestawienie średnich wielkości podstawowych parametrów przestrzeni porowej zawarto w tabeli 1. Struktura przestrzeni porowej lessu charakteryzuje się występowaniem przeważająco porów o średnicach 4–20 μm , średnio 8 μm . Typowy jest brak porów o średnicach powyżej 500 μm niezależnie od płaszczyzny zobrażenia. Populacja porów ma

zróżnicowany kształt (pory izo- i anizometryczne w zrównoważonym udziale). W zakresie powierzchni porów do głębokości 3 m p.p.t. ich rozkład w strukturze jest w przybliżeniu wyrównany w poszczególnych klasach w zakresie 17–100 000 μm^2 . Poniżej tej głębokości w „wymoku” w porównaniu do lessu świeżego charakterystyczny jest wzrost populacji porów o malejącej średnicy i powierzchni (do 5500 μm^2) rosnący z głębokością.

W płaszczyźnie horyzontalnej w całym badanym profilu stwierdzono istnienie populacji porów o małej liczebności wyróżniających się w strukturze największą średnicą oraz powierzchnią. Grupa (relatywnie) największych porów występuje w zbliżonym udziale (3–5%) w lessach świeżych i niezależnie od tendencji do spadku średnicy porów z głębokością w wymoku. Być może pory te są uprzywilejowanymi drogami przewodzenia wody w skale. Średni współczynnik filtracji obliczony dla mikrostruktury wymoku jest wyższy niż w lessach świeżych – najczęściej powyżej 0,45 mD, ale charakteryzuje się dużą zmiennością w profilu pionowym i poszczególnych płaszczyznach analizy (tab. 1).

Tabela 2

Wymiar fraktalny struktury przestrzeni porowej lessu

The fractal dimension of the loess porous space

Pole badawcze		Wymok				Stok				Dział			
Powiększenie	m p.p.t.	horyz 1	horyz 2	vertical	średnia	horyz 1	horyz 2	vertical	średnia	horyz 1	horyz 2	vertical	średnia
50	1,5	1,80	1,84	1,84	1,74	1,83	1,60	1,87	1,67	1,62	1,53	1,60	1,54
100		1,75	1,81	1,79		1,57	1,63	1,82		1,59	1,47	1,46	
200		1,70	1,79	1,76		1,56	1,57	1,78		1,54	1,53	1,45	
400		1,29	1,74	1,76		1,47	1,64	1,74		1,53	1,68	1,49	
50	2	1,81	1,82	1,81	1,77	1,87	1,89	1,85	1,82	1,73	1,10	1,78	1,49
100		1,78	1,78	1,75		1,77	1,85	1,76		1,64	1,23	1,74	
200		1,77	1,78	1,73		1,75	1,84	1,69		1,61	1,31	1,71	
400		1,73	1,74	1,67		1,73	1,82	2,00		1,46	0,90	1,65	
50	3	1,18	1,25	1,26	1,21	1,93	1,86	1,70	1,56	1,56	1,44	1,51	1,46
100		1,18	1,24	1,25		1,48	1,81	1,48		1,53	1,39	1,42	
200		1,19	1,23	1,25		1,69	1,45	1,22		1,49	1,51	1,40	
400		1,15	1,13	1,24		1,66	1,18	1,30		1,49	1,40	1,34	
50	4	1,84	1,85	1,85	1,80	1,61	1,93	1,84	1,68	1,64	1,61	1,63	1,52
100		1,80	1,81	1,81		1,46	1,79	1,75		1,37	1,52	1,54	
200		1,78	1,79	1,80		1,45	1,65	1,74		1,46	1,50	1,52	
400		1,72	1,77	1,78		1,51	1,73	1,70		1,41	1,49	1,51	
50	5	1,88	1,89	1,89	1,83	1,71	1,75	1,70	1,59	1,89	1,86	1,89	1,84
100		1,85	1,84	1,83		1,59	1,67	1,65		1,85	1,82	1,85	
200		1,82	1,82	1,85		1,45	1,60	1,56		1,85	1,82	1,84	
400		1,78	1,78	1,80		1,32	1,56	1,46		1,84	1,80	1,82	

Płaszczyzny zobrażenia: horyz 1, horyz 2 – horyzontalna, vertical – wertykalna; interpretacja wyniku: 1 – struktura nieuporządkowana, chaotyczna w układzie przestrzennym, 2 – struktura uporządkowana, regularna

Plane Imaging: horyz 1, horyz 2 – horizontal, vertical; interpretation of the result: 1 – the structure of disordered, chaotic, 2 – the structure of an ordered, regular

Wymiar fraktalny przestrzeni porowej (fraktal pudełkowy) wskazuje na zmienne uporządkowanie przestrzenne rozkładu porów w strukturze lessu (tab. 2). Wyróżnia się słabą organizację wzajemnego układu porów na głębokości 3 m p.p.t., przy czym w „wymoku” przestrzeń porowa ma wysoką organizację i uporządkowanie wzajemnej relacji porów w stropie i spągu badanej kolumny (1,5 oraz 5 m p.p.t.). W powiązaniu z rozkładem średnic i pól porów, wyższy stopień organizacji przestrzeni porowej w spągu „wymoku” wynika ze wzrastającego udziału porów najmniejszych. Wymiar fraktalny przestrzeni porowej lessu świeżego nie tylko nie wykazywał uporządkowania i prawidłowości stwierdzonych w wymoku, ale jest bardzo zróżnicowany na etapie analiz poszczególnych powiększeń obrazu (tab. 2). Less świeży cechuje także słaba zależność uporządkowania porów między płaszczyznami wertykalną i horyzontalną (bardzo niska w „stoku” $R^2=0,07$, wyższa dla „działu wodnego” $R^2=0,6$). Uporządkowanie struktury porów w „wymoku” wykazuje natomiast bardzo wysoką zależność w analizowanych płasz-

czynach ($R^2=0,8$). Świadczy to o potencjalnie jednorodnych warunkach do przewodzenia wody w wymoku.

W obrazie mikrostrukturalnym typowe jest nierównomierne rozłożenie minerałów ilastych między ziarnami pylastymi tworzącymi szkielet skały. Wzajemny układ minerały ilaste – ziarna pylaste wykazuje wyraźną różnicę mikrostrukturalną między wymokiem a lessiem świeżym. Przeanalizowano obecności połączeń typu fazowego (łańcuszki, mostki, podpory): jako typowe stwierdzono ich liczne występowanie dla lessów świeżych, węglanowych, a w wymoku – przy wymyciu związków węglanowych, minerały ilaste nie tworzą struktur o wzajemnym wiązaniu fazowym. W wymoku stwierdzono obecność zerwanych (połamanych) wiązań cementacyjnych między ziarnami szkieletowymi, ale nie jest to sytuacja powszechna. W przestrzeni porowej lessu świeżego typowe są wtórne wytrącenia substancji z roztworu w postaci koncentrycznych pierścieni w świetle kapilar oraz swobodnych kryształów wtórnych. Minerały ilaste są włączone w system struktur wiązań fazowych.

WNIOSKI

Stwierdzono odrębność cech ilościowych środowiska przestrzeni porowej lessu w zakresie średnic, powierzchni porów oraz stopnia ich przestrzennego uporządkowania między lessiem świeżym a przekształconym filtracyjnie. Odrębność cech lessu w wymoku nie jest wynikiem odmiennych warunków sedymentacji osadów: badania prowadzono w obrębie jednorodnych fałdnie lessów młodszych górnych (LMg), dobrze udokumentowanych genetycznie, litologicznie oraz paleogeograficznie. Stawiając hipotezę o pierwotnie jednorodnym w makroskali rozmieszczeniu i cechach elementów mineralnych skały, relacja szkielet skały – wypełnienie powinny zatem charakteryzować zbliżone cechy układu przestrzennego w profilu pionowym.

Woda porowa w procesie filtracji oddziałuje na stabilność warunków mechanicznych lessu: w wymoku pod wpływem zawodnienia, peptyzacji podlegają wiązania fazowe między elementami wypełniającymi szkielet skały. Spada wówczas zwięzłość skały w wyniku rozpadu mikroagregatów i agregatów. Minerały ilaste mogą wówczas podlegać selektywnemu przemieszczaniu ze strumieniem filtracji porami międzyszkieletowymi; czyli aktywowania sufozji mechanicznej³. Proces ten prowadzi do zmiany konfiguracji przestrzeni porowej w zakresie mikro- i mezoporów, prze-modelując warunki filtracji, *vide* wysokie uporządkowanie przestrzeni porowej w wymoku.

Analizując stwierdzone badaniami właściwości lessu świeżego, decydujące znaczenie w kształtowaniu odrębności

cech lessu w wymoku mają: niski współczynnik filtracji oraz zasoby wód atmosferycznych retencjonowane w dnie zlewni bezodpływowych. Lokalne gromadzenie wody w zagłębieniach sprzyja rozciągniętemu w czasie zasilaniu infiltracyjnemu skały. W relacji do średniego współczynnika filtracji lessu świeżego (tab. 1), już opad o natężeniu powyżej 0,1 mm/10 minut wzbudza formowanie spływu ponadinfiltracyjnego, prowadząc do formowania retencji powierzchniowej w wymoku. Dodatkowo parametry filtracji lessu świeżego są niestacjonarne w czasie z powodu pęcznienia minerałów ilastych wypełniających pory szkieletowe, w wymoku – przy długookresowej podwyższonej wilgotności można uznać, że filtracja przebiega w zbliżonych w warunkach w czasie.

Lokalne wysycenie struktury wodą utrudnia wymianę gazową, sprzyjając przechodzeniu substancji do roztworu i odprowadzanie ich ze strumieniem filtracji. W procesie ługowania (sufozja chemiczna) następuje postępujące ubożenie w stropowej partii osadu substancji rozpuszczonych na rzecz wmywania w dolne partie skały, m.in. objawia się to we współczesnym braku węglanów w składzie mineralnym oraz zaburzonej relacji wapnia do strontu i wapnia do magnezu w roztworze porowym (Afelt, 2007c). Transport substancji rozpuszczonej w profilu lessu w wymoku może zachodzić na dużych dystansach, jako konsekwencja uprzywilejowanej dostawy powierzchniowej wody.

³ Sufozja mechaniczna – proces przemieszczania ze strumieniem filtracji elementów nierozpuszczonych w obrębie szkieletu skały, przegląd definiowania i stanu badań zawarto w Afelt, 2007b

Wymoki pełnią zatem w obrębie pokryw lessowych rolę uprzywilejowanych stref/ kolumn filtracji. Z geochemicznego punktu widzenia przebiegu interakcji skała – woda, sytuacja ta stwarza warunki do naturalnego przeobrażania właściwości mikrostrukturalnych i geochemicznych.

Z antropogenicznego punktu widzenia wymoki retencjonują i przewodzą wodę, która bierze udział w obiegu powierzchniowym naznaczonym przez intensywną gospodarkę rolną, wprowadzającą do środowiska liczne środki ochrony roślin, nawozy sztuczne i substancje pokrewne. Składniki te w postaci roztworu wodnego mogą być akumulowane wraz z retencją powierzchniową a następnie wmywane w wymokach wraz ze strumieniem filtracji. Sytuacja ta może stano-

wić realne zagrożenie, jako punktowe, skoncentrowane źródło zanieczyszczenia wód porowych. Trudności sprawia ilościowa ocena skałi problemu; wymoki są stałym elementem towarzyszącym płatom lessowym (Gillijns i in., 2005), dotychczas jednak nie zinwentaryzowano ich liczby. W Polsce dostępne są jedynie dane dla niewielkich wybranych fragmentów pokryw lessowych. Skałę liczebności dość dobrze przybliżają wyniki badań Czarneckiego i in. (1987) dla międzyrzecza Opatówki i Czyżówki oraz Kołdyńskiej-Gawrysiak i Chabudzińskiego (2012) na Płaskowyżu Nałęczowskim, gdzie stwierdzono średnią gęstość wymoków do 10 obiektów/km², a maksymalnie – nawet 40 obiektów/km².

LITERATURA

- AFELT A., 2007a — Cechy hydrochemiczne wód przesiąkowych w lessach. *W: Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce*. Wyd. UŁ, Łódź, **5**: 275–282.
- AFELT A., 2007b — Sufozja: proces filtracyjnego przekształcania skały, *Prace i Studia WGSR*, **38**: 157–172.
- AFELT A., 2007c — Wpływ rzeźby i zasilania na właściwości wód porowych w lessach, *Annales UMCS*, **62**: 223–242.
- BURY W., 1991 — Badanie szybkości migracji znacznika przez lesy jako typowe utwory półprzepuszczalne strefy aeracji, V Ogólnopolskie Sympozjum. Współczesne Problemy Hydrogeologii, Prace CPBP 04.10.09. Wyd. SGGW – AR Warszawa.
- BURY W., 1995 — Prognozowanie pionowej migracji zanieczyszczeń konserwatywnych przez utwory przepuszczalne i półprzepuszczalne przy wykorzystaniu znaczników naturalnych i sztucznych, *Współczesne Problemy Hydrogeologii*, t. VII, Kraków–Krynica.
- CZARNECKI R., 1996 — Wyżyna Sandomierska – część wschodnia, Warszawa.
- CZARNECKI R., LEWARTOWSKA-URBAŃSKA M., 1987 — Wymoki okolic Sandomierza, *Przeg. Geogr.*, PWN, Warszawa, **59,3**: 385–397.
- GILLIJNS K., POESEN J., DECKERS J., 2005 — On the characteristics and origin of closed depression in loess-derived soils in Europe – a case study from central Belgium, *Catena*, **60**: 43–58.
- KOŁDYŃSKA-GAWRYSIAK R., CHABUDZINSKI L., 2012 — Morphometric features and distribution of closed depressions on the Nałęczów Plateau (Lublin Upland, SE Poland), *Annales UMCS*, **67,1**: 45–61.
- MARUSZCZAK H., 1954 — Warteby obszarów lessowych Wyżyny Lubelskiej, *Annales UMCS*, sec. B, **8**: 123–237.
- MULARZ S, RYBICKI S., 1999 — Geologiczno-inżynierskie uwarunkowania deformacji terenu i szkód budowlanych w staromiejskiej dzielnicy Sandomierza, *Przeg. Geol.*, **47,12**.
- SMALLEY I.J, JEFFERSON I.F, DIJKSTRA T.A, DERBYSHIRE E., 2001 — Some major events in the development of the scientific study of loess, *Earth-Science Review*, **54**, Elsevier
- SMALLEY I., MARKOVIĆ S.B., SVIRCEV Z., 2011 — Loess is [almost totally formed by] the accumulation of dust, *Quatern. Internat.* **240**: 4–11.

SUMMARY

The research has been conducted in the range of homogeneous Upper Young Loess facies, well documented genetically, itologically and paleogeographically (Lukawa near to Sandomierz, SE Poland, Fig. 1). On the basis of the quantity characteristics and the penetration degree of pore space (fractal dimension) analysis, there has been revealed the distinction in diameter range of pore surface (Tab. 1) and the degree of spatial structure (Tab. 2) between fresh and transformed loesses. Two decisive factors in forming of the characteristics distinction of transformed loesses are as follows: low permeability coefficient and atmospheric water, retentioned in the closed depression bottom surface. Surface water storage conduces for the long-term infiltration discharge of rock. Local saturation of loess with water impedes oxidation, thus conducing to the movement of the substance into solution [here: dissolution

of rock] and its transfer along with influent seepage. The process of solution deposit may occur at long distances. Closed depressions in the range of loess layer function as preferential areas/columns of infiltration process. Since loess areas are under the influence of intensive agriculture, along with the surface runoff, numerous fertilizers, plant protection products and related substances may be accumulated in the form of water solution along with surface retention in closed depression and then washed in along with influent seepage into subsurface water or saturated zone. This state may pose a real threat as punctual, concentrated contamination source of pore waters. Difficulties are caused by the quantitative estimation of the problem range. Closed depressions are amongst constant elements which accompany loess areas. Their number has as far not been catalogued yet.