

**Tomasz BRANDYK, Jan SZATYŁOWICZ, Piotr HEWELKE,
Ryszard OLESZCZUK**

Katedra Melioracji Rolnych i Leśnych SGGW

Modelowanie ruchu wody w glebach o zmiennej geometrii

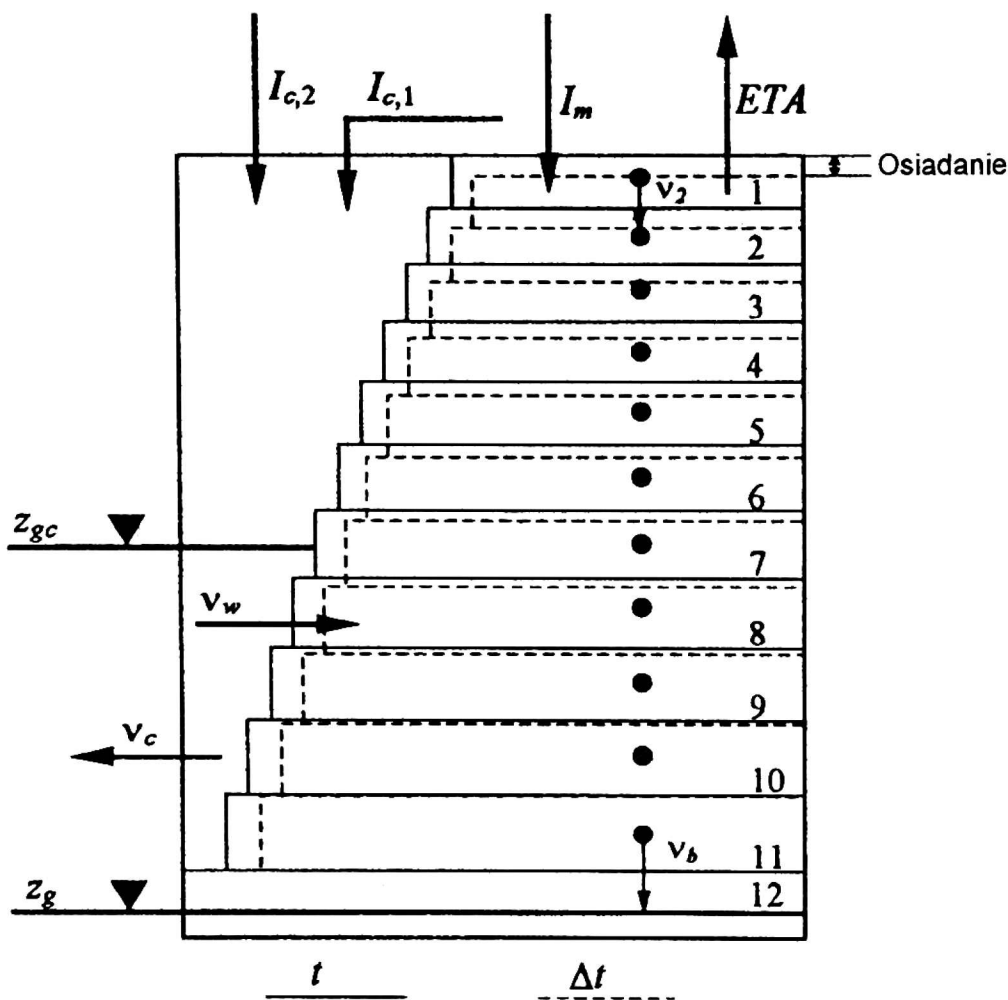
Wstęp

Istnienie w glebach szczelin powstałych w wyniku zmian geometrii gleby powoduje tworzenie się uprzywilejowanych dróg filtracji. Wynikiem tego są sytuacje, w których woda i rozpuszczone w niej substancje chemiczne, wykorzystując uprzywilejowane drogi filtracji, mogą bardzo szybko przedostawać się do wód gruntowych z pominięciem macierzy glebowej. Powoduje to wzrost ryzyka zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych (Thomas i Phillips 1979; Coles i Trudgill 1985).

W pracy podjęto próbę opisu przepływu wody w glinie bardzo ciężkiej charakteryzującej się występowaniem szczelin. Symulację jednowymiarowego przepływu wody w szczelinach i macierzy glebowej przeprowadzono przy zastosowaniu zmodyfikowanego modelu FLOCR (Bronswijk 1988; Szatyłowicz 1993), a następnie poddano weryfikacji na podstawie pomiarów terenowych.

Model numeryczny

Schemat obliczeniowy wykorzystany w modelu FLOCR przedstawiono na rysunku 1. Głównym założeniem przyjętym w modelu jest podział gleby na dwie umownie wyodrębnione części, tj. tzw. macierz glebową i szczeliny (makropory). Przepływ wody w obrębie macierzy glebowej jest obliczany zgodnie z prawem Darcy'ego. Opad występujący na powierzchni gleby jest dzielony w sposób dynamiczny między infiltrację do macierzy glebowej i część odpływającą do szczelin, która jest dodawana do dna szczeliny. Woda w szczelinach podlega poziomej infiltracji do macierzy glebowej poprzez ich ściany oraz zjawisku odpływu. Model ponadto umożliwia określenie zmian objętości gleby na skutek zjawiska wysychania i zwilżania, wykorzystując pomierzoną charakterystykę kurczenia się gleby. Szczegółowe założenia modelu zostały opisane w pracach



RYSUNEK 1. Schemat profilu glebowego w modelu FLOCR (oznaczenia w tekście)

Oostindie i Bronswijka (1992) oraz Szatyłowicza (1993).

Podstawowymi równaniami przepływu w zastosowanym modelu są: równanie Darcy'ego i równanie ciągłości. Profil glebowy dla celów obliczeniowych dzieli się maksymalnie na 30 przedziałów równej wielkości. Wykorzystując opis funkcji nienasyconej przewodności wodnej w formie wykładniczej (Gardner 1958), przepływ pomiędzy poszczególnymi przedziałami oblicza się następująco (Wind i van Doorne 1975):

$$v = - \frac{k_i - k_{i-1}}{\exp(\alpha \Delta z)} - k_{i-1} \quad (1)$$

gdzie:

v – jednostkowe natężenie przepływu między przedziałami ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),

k – przewodność wodna przy stanie niepełnego nasycenia ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),
 α – stała glebowa (cm^{-1}),
 Δz – długość przedziału (cm),
 i – indeks oznaczający numer kolejnego przedziału (–).

Do określenia zmian objętości gleby wykorzystuje się następujące zależności (Bronswijk 1988):

$$\Delta V = (e_s - e) V_{\text{solid}} \quad (2)$$

$$\Delta Z = Z_s - Z_s \left(\frac{V - \Delta V}{V} \right)^{1/r_s} \quad (3)$$

$$\Delta V_{cr} = \Delta V - Z_s^2 \Delta Z \quad (4)$$

W równaniach (2) – (4) zastosowano następujące oznaczenia:

ΔZ – zmiana długości przedziału wskutek pęcznienia lub kurczenia (m),

V – objętość sześcianu wyodrębnionego z macierzy glebowej przy stanie pełnego nasycenia (m^3),

ΔV – zmiana objętości macierzy glebowej na skutek pęcznienia lub kurczenia się (m^3),

Z_s – długość przedziału obliczeniowego przy stanie pełnego nasycenia (m),

r_s – współczynnik zależny od przebiegu procesów zmian geometrii ($r_s = 3$ dla izotropowych zmian objętości wywołanych kurczeniem),

V_{solid} – objętość fazy stałej gleby (m^3),

ΔV_{cr} – zmiana objętości szczelin (m^3),

e_s – wskaźnik porowatości przy stanie pełnego nasycenia (–),

e – wskaźnik porowatości przy uwilgotnieniu aktualnym (–).

Górny warunek brzegowy opisany jest w formie przepływu przez powierzchnię gleby. Wynika on z jej bilansu wodnego (w obrębie danego kroku czasowego):

$$S = (P - ETA) - R - q \quad (5)$$

gdzie:

S – retencja powierzchniowa (m),

P – opad atmosfery (m),

ETA – ewapotranspiracja aktualna (m),

R – spływ powierzchniowy (m),

q – jednostkowe natężenie przepływu przez powierzchnię gleby (m).

Przy określaniu górnego warunku brzegowego wykorzystuje się ponadto podział opadu na część infiltrującą do macierzy glebowej oraz do szczelin. W

tym celu wykorzystuje się następujące zależności (Bronswijk 1988):

$$- P < I_{max}; I_m = A_m P \quad (6)$$

$$I_c = A_c P$$

$$- P > I_{max}; I_m = A_m I_{max}$$

$$I_{c,1} = A_m (P - I_{max})$$

$$I_{c,2} = A_c P$$

$$I_c = I_{c,1} + I_{c,2}$$

gdzie:

P – intensywność opadu ($m \cdot s^{-1}$),

I_{max} – maksymalna zdolność infiltracyjna macierzy glebowej ($m \cdot s^{-1}$),

I_m – prędkość infiltracji do macierzy glebowej ($m \cdot s^{-1}$),

I_c – prędkość infiltracji do szczelin (przepływ preferencyjny) ($m \cdot s^{-1}$),

A_m, A_c – powierzchnia względna odpowiednio macierzy glebowej i szczelin (–),

$I_{c,1}$ – prędkość infiltracji wody pochodzącej z opadu, która spływa z powierzchni macierzy glebowej na skutek przekroczenia jej maksymalnej zdolności infiltracyjnej ($m \cdot s^{-1}$),

$I_{c,2}$ – prędkość infiltracji wody pochodzącej z opadu, która bezpośrednio trafia do szczelin ($m \cdot s^{-1}$).

Wartość parametru I_{max} określa się przyjmując założenie, że ciśnienie ssące na powierzchni gleby jest równe zeru. W związku z tym wartość przewodności wodnej przy niepełnym nasyceniu równa jest wartości współczynnika filtracji, a maksymalnie możliwy przepływ przez powierzchnię macierzy glebowej obliczany jest z równania (1).

Dolny warunek brzegowy w modelu reprezentowany jest przez tzw. warunek

Cauchy'ego (van Bakel 1986), wyrażający jednostkowe natężenie przepływu pomiędzy nasyconą a nienasyconą strefą gleby (Oostindie i Bronswijk 1992).

W modelu FLOCR zakłada się, że istnieją dwa umowne zwierciadła wody: zwierciadło wody w macierzy glebowej i zwierciadło w szczelinach. Woda pochodząca z opadów atmosferycznych osiąga natychmiast dno szczelin, skąd podlega infiltracji do macierzy glebowej ze stałą prędkością infiltracji I_w , oraz podlega zjawisku odpływu ze szczelin. Jednostkowe natężenie odpływu wody ze szczelin oblicza się jako:

$$v_c = - \frac{k_c A_{cr} z_{gc}}{A_{cr} z_{gc} + k_c} \quad (7)$$

gdzie:

v_c – jednostkowe natężenie odpływu wody ze szczelin ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),

A_{cr} – intensywność odwodnienia szczelin (d^{-1}),

k_c – współczynnik filtracji szczelin ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),

z_{gc} – położenie zwierciadła wody w szczelinach względem położenia zwierciadła wody w macierzy glebowej (cm).

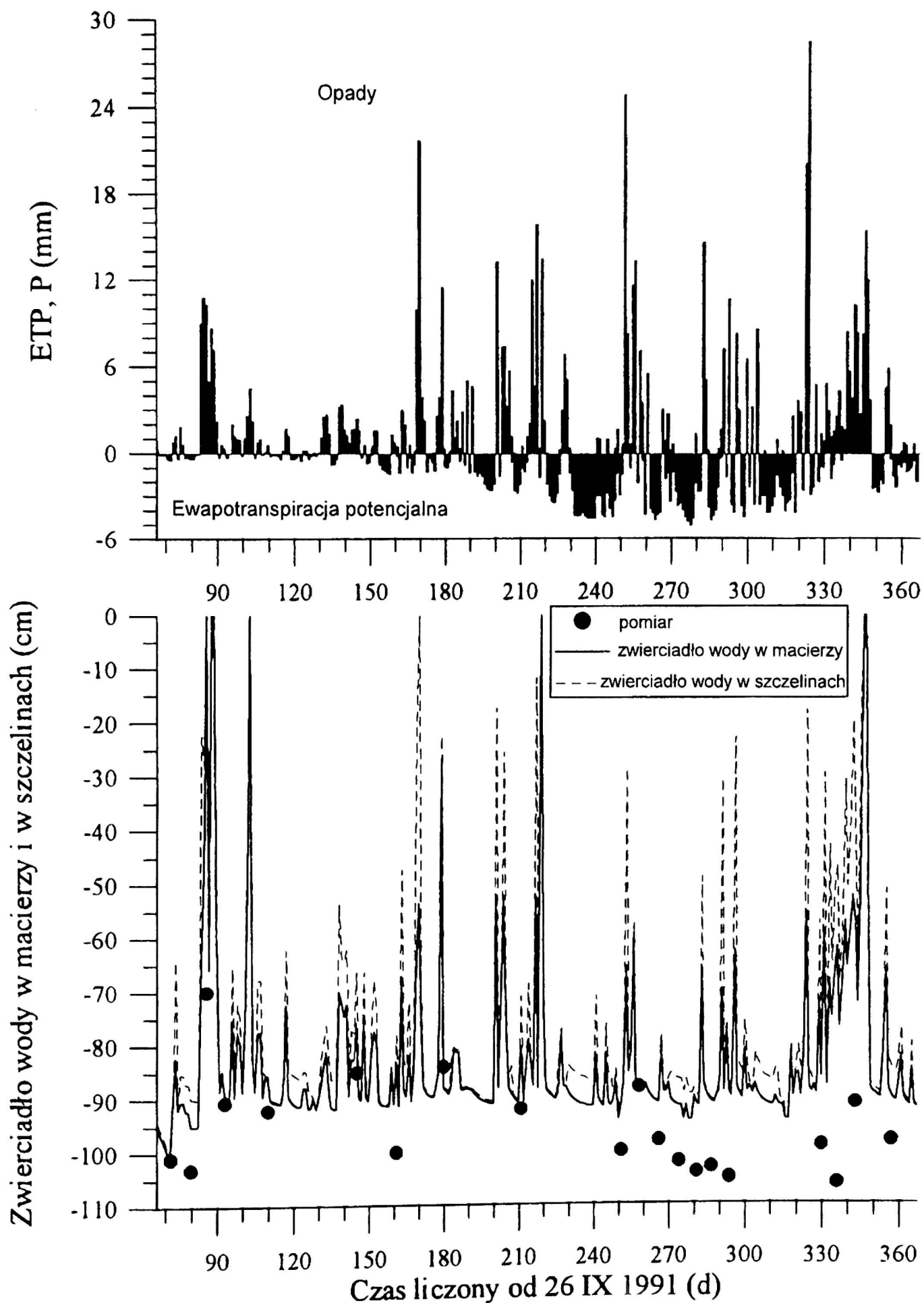
Parametry

Oprócz sformułowania warunków brzegowych i początkowych, do obliczeń symulacyjnych z użyciem modelu FLOCR wymagane jest określenie następujących parametrów: krzywej retencyjności wodnej, krzywej przewodności wodnej przy niepełnym nasyceniu, krzywej kurczenia gleby, współczynnika r_s , prędkości infiltracji ze szczelin do macierzy glebowej I_w ,

intensywności odwodnienia szczelin A_{cr} i współczynnika filtracji szczelin k_c . Weryfikację modelu przeprowadzono dla gliny ciężkiej opisanej w pracy Bronswijka i Evers-Vermeer (1990). Szczegółowy opis wyznaczenia parametrów oraz sposób ich dyskretyzacji znajduje się w pracy Szatyłowicza i wsp. (1994).

Wyniki

Weryfikacji modelu dokonano na podstawie wyników pomiarów zwierciadła wody w macierzy glebowej (1 grudnia 1991 – 25 września 1992 r.). Obliczenia wykonano dla trzech wariantów. W wariacie pierwszym wykorzystano zmodyfikowaną wersję modelu FLOCR, w której uwzględniono interakcję pomiędzy szczelinami i macierzą glebową oraz prędkość infiltracji na powierzchni gleby, którą obliczono na podstawie rzeczywistego czasu trwania opadu. Drugi wariant dotyczył również zmodyfikowanej wersji modelu FLOCR, w której prędkość infiltracji na powierzchni gleby określono dla przedziałów czasowych 0,2 doby, nie uwzględniając rzeczywistego czasu trwania opadu. Natomiast wariant trzeci dotyczył poprzedniej wersji modelu FLOCR (Oostindie i Bronswijk 1992), w której woda ze szczelin infiltrowała w sposób natychmiastowy do macierzy glebowej, a prędkość infiltracji na powierzchni gleby zadawano na podstawie rzeczywistego czasu trwania opadu (jak w wariacie pierwszym). Podczas weryfikacji do porównywania wartości obliczonych i pomierzonych wykorzystano miary statystyczne zaproponowane przez Loague'a i Greena (1991), takie jak: błąd



RYSUNEK 2. Wyniki pomiarów i obliczeń położenia zwierciadła wody w macierzy glebowej i szczelinach (wariant 1)

TABELA. Wyniki weryfikacji modelu FLOCR

Wariant	<i>ME</i>	<i>RMSE</i>	<i>CD</i>	<i>EF</i>	<i>CRM</i>	Ranga
	zakres					
	[0; ∞]	[0; ∞]	[0; ∞]	[∞; 1]	[∞; ∞]	[1;3]
	najlepsza zgodność					
0	0	1	1	0	1	
1	70,0	23,0	0,12	-5,26	0,15	1,4
2	91,0	28,3	0,08	-8,49	0,15	2,6
3	70,0	27,3	0,09	-7,84	0,18	2,4

maksymalny (*ME*), średni błąd kwadratowy (*RMSE*), współczynnik determinacji (*CD*), efektywność modelu (*EF*) i współczynnik odchylenia resztkowego (*CRM*). Wyniki weryfikacji modelu FLOCR zestawiono w tabeli, z której wynika, że najlepszą zgodność pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń uzyskano w przypadku wariantu pierwszego. Wyniki obliczeń i pomiarów zwierciadła wody w macierzy glebowej i szczelinach dla wariantu pierwszego przedstawiono na rysunku 2.

Obliczenia z zastosowaniem modelu FLOCR wykazują, że zwierciadło wody podnosi się szybko po wystąpieniu opadu. Jest to spowodowane tzw. preferencyjnym przepływem wody oraz stromym nachyleniem krzywej *pF* w rozpatrywanej glebie. Wynikiem stromego nachylenia krzywej *pF* jest fakt, że nawet dodanie niewielkiej ilości wody do macierzy glebowej powoduje jej nasycenie i wzrost położenia zwierciadła wody. Z danych przedstawionych na rysunku 2 wyraźnie widać, że wyniki obliczeń modelowych dają wyższe wartości od wyników pomiarów, co wiąże się z nieuwzględnieniem przepływu wody wzdłuż szczelin.

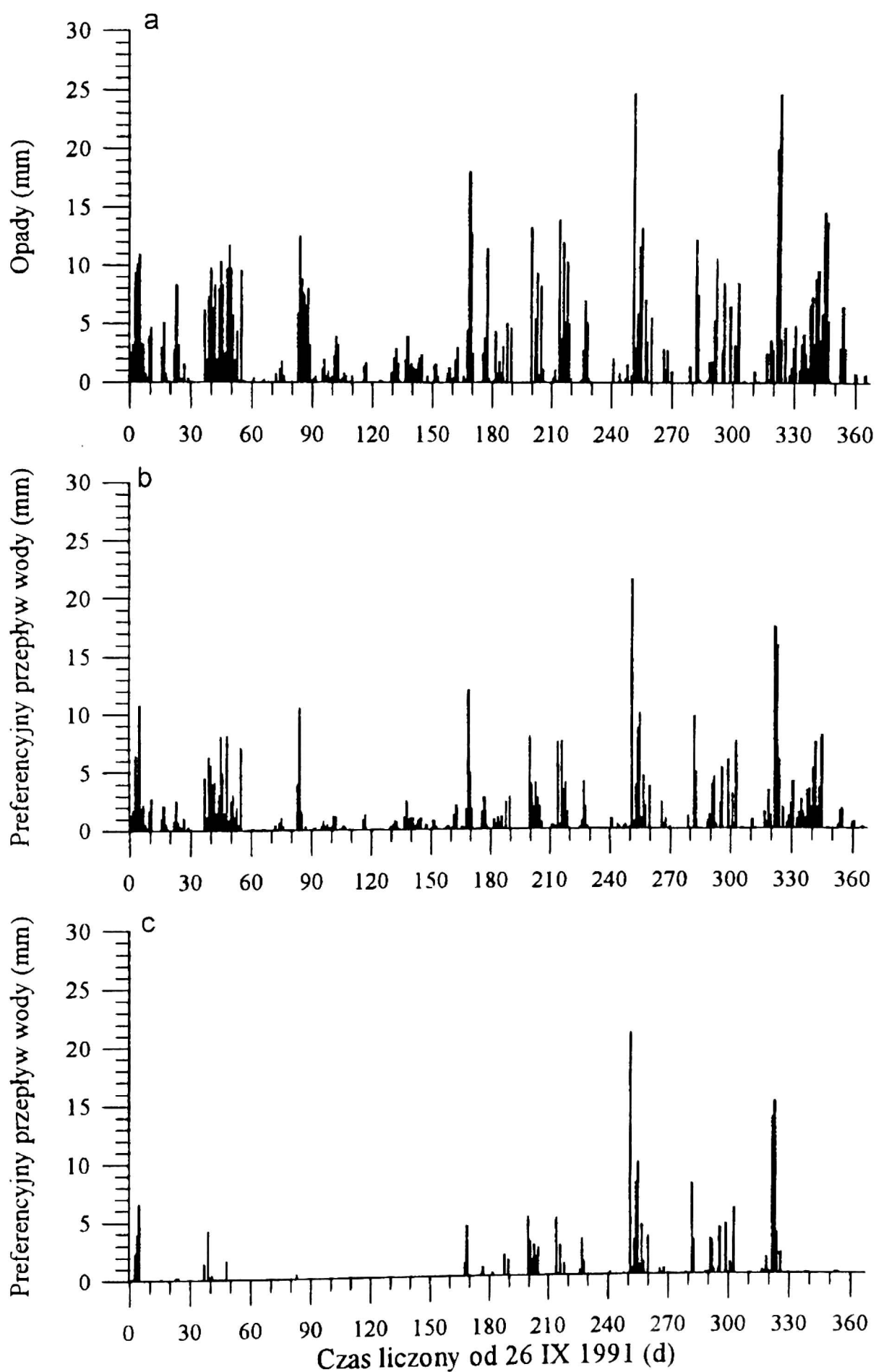
Założenia o natychmiastowym docieraniu wody z opadów do dna szczelin można uważać za możliwe do przyjęcia

w okresach posusznych, kiedy w glebie występują głębokie szczeliny o znacznych rozmiarach. Bardziej realistycznym założeniem odnoszącym się do sytuacji rzeczywistych powinno być przyjęcie dystrybucji infiltrującej wody ze szczelin wzdłuż całego profilu glebowego. Wyższe wartości zwierciadła wody w obliczeniach w porównaniu z wynikami pomiarów mogą być spowodowane nieuwzględnieniem w modelu zjawiska intercepcji, co powoduje, że nawet niewielki opad w znaczący sposób podnosi zwierciadło wody.

Wyniki obliczeń przepływów preferencyjnych wody na tle opadów atmosferycznych dla wariantu pierwszego i drugiego przedstawiono na rysunku 3. Wielkość przepływu preferencyjnego wody w wariacie pierwszym stanowiła 43%, a w wariacie drugim 22,2% opadu. Wynika z tego, że przy modelowaniu przepływu preferencyjnego konieczne jest dokładne uwzględnianie czasu trwania i intensywności opadów atmosferycznych.

Wnioski

1. Przedstawiona w pracy zmodyfikowana wersja modelu FLOCR daje wyniki obliczeń zwierciadła wody grunto-



RYSUNEK 3. Wyniki obliczeń przepływów preferencyjnych wody w profilu bardzo ciężkiej gliny: a – opady atmosferyczne, b – wariant 1, c – wariant 2

wej bardziej zbliżone do pomiarów terenowych niż poprzednia wersja tego modelu, która nie uwzględniała poziomej infiltracji wody ze szczelin do macierzy glebowej oraz odpływu szczelinami.

2. Wyniki obliczeń położenia zwierciadła wody wykazują większe wartości od pomierzonych w polu, co może być spowodowane nieuwzględnieniem zjawiska intercepcji oraz dystrybucji infiltrującej wody ze szczelin w obrębie nienasyconej strefy profilu glebowego.

3. Zmodyfikowany model FLOCR umożliwia określenie przepływów preferencyjnych wody w profilu glebowym, przy czym dokładność ich określenia w bardzo dużym stopniu zależy od danych dotyczących opadów atmosferycznych (wielkość i czas występowania).

Literatura

- BAKEL P.J.T. VAN, 1986: *A systematic approach to improve the planning, design and operation of regional surface water management systems. A case study.* ICW Report 13. Institute for Land and Water Management Research, Wageningen.
- BRONSWIJK J.J.B. 1988: *Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils.* J. Hydrol. 97; 199–212.
- BRONSWIJK J.J.B., EVERS-VERMEER J.J. 1990: *Shrinkage of Dutch clay soil aggregates.* Neth. J. Agric. Sci. 38; 175–194.
- COLES N., TRUDGILL S.T. 1985: *The movement of nitrate fertilizer from the soil surface to drainage waters by preferential flow in weakly structured soils, Slapton, S. Devon.* Agric. Ecos. and Env. 13; 241–259.
- GARDNER W.R. 1958: *Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table.* Soil Sci. 85; 228–232.
- LOAGUE K., GREEN R.E. 1991: *Statistical and graphical methods for evaluating solute*

transport models. Overview and application. J. Contam. Hydrol. 7; 51–73.

- OOSTINDIE K., BRONSWIJK J.J.B. 1992: *FLOCR – A simulation model for the calculation of water balance, cracking and surface subsidence of clay soils.* Report 47. DLO The Winand Staring Centre, Wageningen.
- SZATYŁOWICZ J. 1993: *Application of revised FLOCR model for water regime description of Bruchem heavy clay soil.* Wageningen Agric. Univ. Wageningen.
- SZATYŁOWICZ J., BRANDYK T., HEWELKE P., SKĄPSKI K. 1994: *Zastosowanie modelu FLOCR do opisu ruchu wody w profilu gliny bardzo ciężkiej o zmiennej geometrii.* Roczn. AR Pozn. CCLXVIII, Melior. Inż. Środ. 15, cz. 2: 183–195.
- THOMAS G., PHILLIPHS R.E. 1979: *Consequence of water movement in macropores J.* Environ. Qual. 8; 149–152.
- WIND G.P., DOORNE VAN W. 1975: *A numerical model for the simulation of unsaturated vertical flow of moisture in soils.* J. Hydrol. 24; 1–20.

Badania zrealizowano w ramach projektu Nr 5 PØ6H 019 08 pt. "Środowiskowe skutki preferencyjnego przepływu wody w glebach o zmiennej geometrii" finansowanego przez KBN.

Summary

Modelling of unsaturated water flow in swelling-shrinking soils. The application of computer model FLOCR for the description of water flow in swelling-shrinking soils is presented. The description of the model procedures, model parameters and the results of model validation and application for determination of preferential flow are also shown.

Authors' address

T. Brandyk, J. Szatyłowicz, P. Hewelke,
R. Oleszczuk

Warsaw Agricultural University – SGGW
02–787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166
Poland