

ANDRZEJ KOSTURKIEWICZ, CZESŁAW SZAFRAŃSKI, ANTONI MILER,  
MICHAŁ FIEDLER

**MODELOWANIE STANÓW WODY GRUNTOWEJ  
NA TERENACH BOGATO URZEŻBIONYCH  
JAKO PODSTAWA OCENY CELOWOŚCI MELIORACJI\***

*Z Katedry Melioracji i Kształtowania Środowiska*

**ABSTRACT.** Block scheme of model used for simulation of changes of groundwater level in richly relieved lowland areas is presented in this paper. The model allows to prognose influence of designed land reclamation on changes of groundwater levels in the section of hill slope.

**Key words:** modeling, groundwater, area relief, drainage

### Wstęp

Ocena potrzeb melioracji uwzględniać musi zarówno oczekiwania intensywnego rolnictwa, jak i potrzeby ochrony środowiska. Przedsięwzięcia melioracyjne muszą się więc opierać na prawidłowym rozpoznaniu i sparametryzowaniu środowiska glebowego, a także na dobrej znajomości obiegu wody w zlewni rolniczej (Kosturkiewicz 1992, Marcinek 1992, Szafrąński 1993).

Na bogato urzeźbionych terenach młodoglacjalnych istotnym czynnikiem wpływającym na gospodarkę wodną gleb jest poziom występowania zwierciadła wody gruntowej. Wyniki badań melioracyjnych i gleboznawczych tych terenów wskazują na dużą zmienność stanów wód gruntowych związaną przede wszystkim z rzeźbą terenu (Białousz 1978, Kosturkiewicz i Szafrąński 1983, Marcinek

---

\*Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr 5 P06H 027 09 finansowanego przez KBN.

i **Wiślańska** 1984, **Solarski** 1973). Zróznicowane spadki terenu, a zwłaszcza ich załamania na zboczu, w porównaniu z warunkami glebowymi i długością zboczy decydują o zmianach warunków hydraulicznych odpływu wód i zasilania spływami powierzchniowymi i podpowierzchniowymi charakterystycznych przekrojów w rzeźbie terenu. Przy dobrych warunkach odpływu wód powierzchniowych i gruntowych często zbędne będą środki techniczne do odwodnienia profilu glebowego (**Kosturkiewicz i Szafranski** 1984, **Kosturkiewicz** 1989, **Mioduszewski** 1991, **Szafranski** 1993). Stoki wzniesień bogato urzeźbionych terenów polodowcowych charakteryzują się często dużą zmiennością zasilania i plamistością nadmiernego uwilgotnienia gleb. Najnowsze „Wytyczne drenowania gruntów ornych” (1988) zalecają w związku z tym stosowanie w szerszym zakresie na bogato urzeźbionych terenach młodoglacjalnych drenowań niesystematycznych i częściowych (**Kosturkiewicz i Szafranski** 1988). Pomocniczym narzędziem w ocenie potrzeb i wyborze sposobów melioracji tych terenów mogą być modele fizyczne oparte na bilansach wodnych gleb. Zakłada się, że podstawą programów obliczeniowych w tych modelach mogą być mapy sytuacyjno-wysokościowe oraz dane uzyskane w trakcie gleboznawczych badań przedmelioracyjnych. Modele te umożliwiają prognozowanie wpływu projektowanych melioracji na obieg wody i gospodarkę wodną gleb na zboczach oraz pozwolą na ocenę tych zabiegów i weryfikację przyjętych rozwiązań. Taki tok postępowania zapewni wykonywanie nowych inwestycji melioracyjnych zgodnie z wymogami ochrony środowiska.

### Cel i struktura modelu

Głównym celem przedstawionego w niniejszej pracy modelu jest prognozowanie wpływu sieci drenarskiej na położenie lustra wody gruntowej pierwszego poziomu wodonośnego. Służy on do symulacji stanów wód gruntowych na stokach wzniesień.

Opracowany model ma charakter konceptualny i opiera się na równaniach bilansów wodnych dla charakterystycznych profili glebowych, występujących w przekroju stoku z wydzieleniem: powierzchni terenu, warstwy ornej i podornej ze strefami aeracji i saturacji. Przyjęto, iż w strefie aeracji zachodzi głównie ruch pionowy wody, jest to uproszczenie stosowane powszechnie w modelach opisujących ruch wody glebowej. Ruch poziomy w strefie saturacji opisano równaniem Dupuita. W modelu uwzględniono również występowanie spływów powierzchniowych i podpowierzchniowych, które występują wtedy, gdy zasilanie powierzchni przekroczy zdolność infiltracji do warstwy ornej i podornej. Warstwa podorna jest w modelu dynamicznie dzielona na dwie strefy: aeracji i saturacji w zależności od położenia lustra wody gruntowej.

Na rozpatrywanym stoku wydzielimy, opierając się na wynikach badań przedmelioracyjnych (spadki, warunki glebowe, stany wody gruntowej)  $n$  obszarów o różnych charakterystykach (ryc. 1). W miejscach charakterystycznych, na grani-

cach tych obszarów, poza badaniami gleboznawczymi należy pomierzyć początkowe maksymalne stany wód gruntowych w okresie wiosennym. Przy modelowaniu stanów wód gruntowych w przekroju stoku dzielimy go na  $M$  równych w ramach każdego obszaru odcinków o długości równej średniej rozstawie drenowań dla danych warunków glebowych. W miejscach związanych z  $M$  wydzielonymi odcinkami stoku początkowe stany wód gruntowych należy określić poprzez stosowne interpolacje. Na podstawie stanów wód gruntowych pomierzonych na granicach wydzielonych obszarów zapas wody w warstwie ornej i strefie aeracji warstwy podornej przyjmuje się w okresie początkowym jako równy połowej pojemności wodnej. Obliczenia w modelu prowadzone są dla jednostkowej szerokości stoku równej 1 m przy kroku czasowym równym 1 dobie. Model symuluje średnie stany wody gruntowej dla wszystkich  $M$  odcinków.

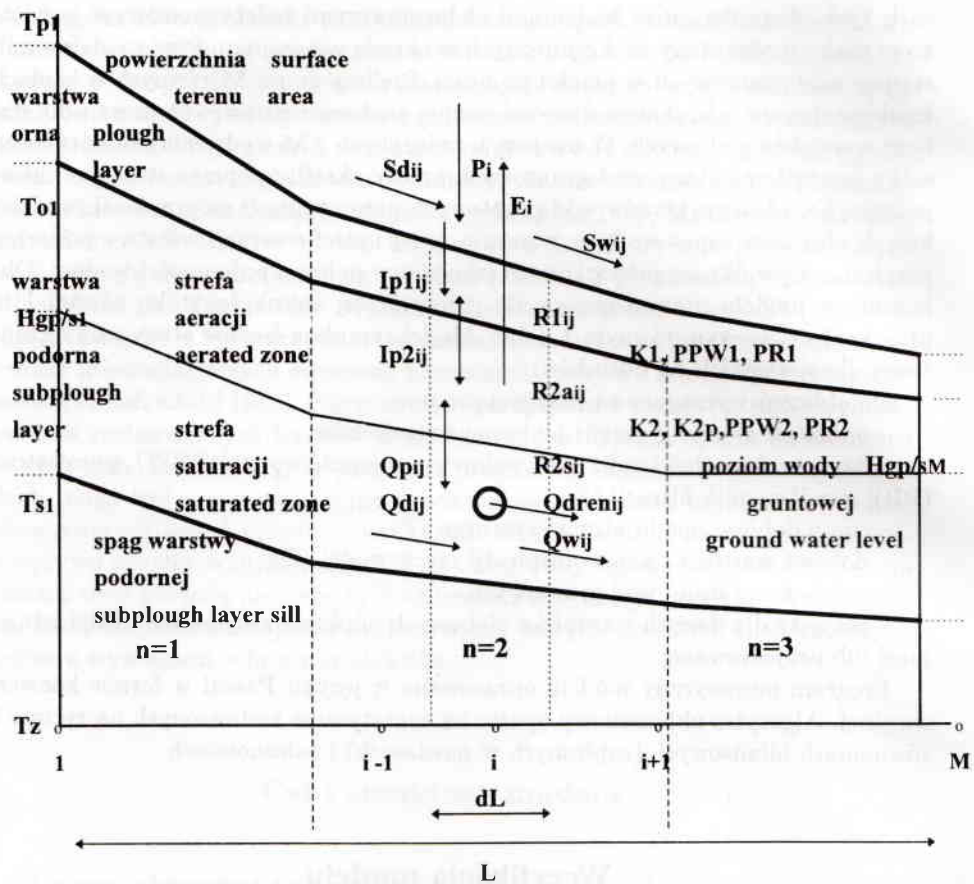
Do obliczeń wymagane są następujące dane:

- położenie warstwy ornej i podornej oraz drenów,
- fizykowodne właściwości gleb: połowa pojemność wodna (PPW), porowatość (PR), współczynnik filtracji (K),
- sumy dobowe opadu atmosferycznego (P),
- dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej (E),
- początkowe stany wód gruntowych,
- przyjęte dla danych warunków glebowych odpływy z sieci drenarskiej istniejącej lub projektowanej.

Program numeryczny modelu opracowano w języku Pascal w formie konwersyjnej. Algorytm obliczeniowy oparto na syntetycznie zestawionych na rycinie 2 równaniach bilansowych (zapisanych w nawiasach) i zależnościach.

## Weryfikacja modelu

Do symulacji zalegania stanów wody gruntowej podjęto również próbę zastosowania opracowanego wcześniej modelu opartego na równaniach fizyki matematycznej „Modelu” symulacyjnego gospodarki wodnej gleb na stoku (Szafrąński i Szulczewski 1992) oraz profesjonalnego modelu EPIC (Sharpley i Williams 1990). Pierwszy wymieniony model został zweryfikowany dla symulacji spływów powierzchniowych i podpowierzchniowych oraz oceniony jako dobry (Szafrąński 1993). Przy podjętej próbie wykorzystania tego modelu do symulacji stanów wody gruntowej i przeprowadzeniu weryfikacji okazało się, że nie pozwala on na ściśle określenie poziomu tych stanów. Model ten nie podaje zasadniczo głębokości lustra wody. Stabilizuje lustro wody gruntowej na uśrednionym poziomie, w zasadzie niezależnie od przebiegu warunków meteorologicznych. Model EPIC, służący generalnie do symulacji erozji gleb i przemieszczania zanieczyszczeń, zawiera także moduł służący do obliczania stanów wody gruntowej. EPIC jest modelem koncep-



Ryc. 1. Schemat ideowy modelu symulującego zmiany stanów wód gruntowych

Fig. 1. Principle of model simulated changes of ground water levels

Oznaczenia: Notations:

 $i$  -  $i$ -ta doba, day,  $j$  -  $j$ -ty odcinek, segment. $S_{dij}$  - wskaźnik splywu z odcinka wyżej położonego (mm), index of surface runoff from above situated segment. $SW_{ij}$  - wskaźnik splywu z danego odcinka (mm), index of surface runoff from current segment. $P_i$  - dobowy opad atmosferyczny (mm), daily precipitation. $E_i$  - dobowa ewapotranspiracja rzeczywista (mm), daily real evapotranspiration. $I_{p1ij}$  - wskaźnik infiltracji do warstwy ornej (mm), index of infiltration to plough layer. $I_{p2ij}$  - wskaźnik infiltracji lub podsiąku przez spąg warstwy ornej (mm), index of infiltration or upward water movement through plough layer sill.



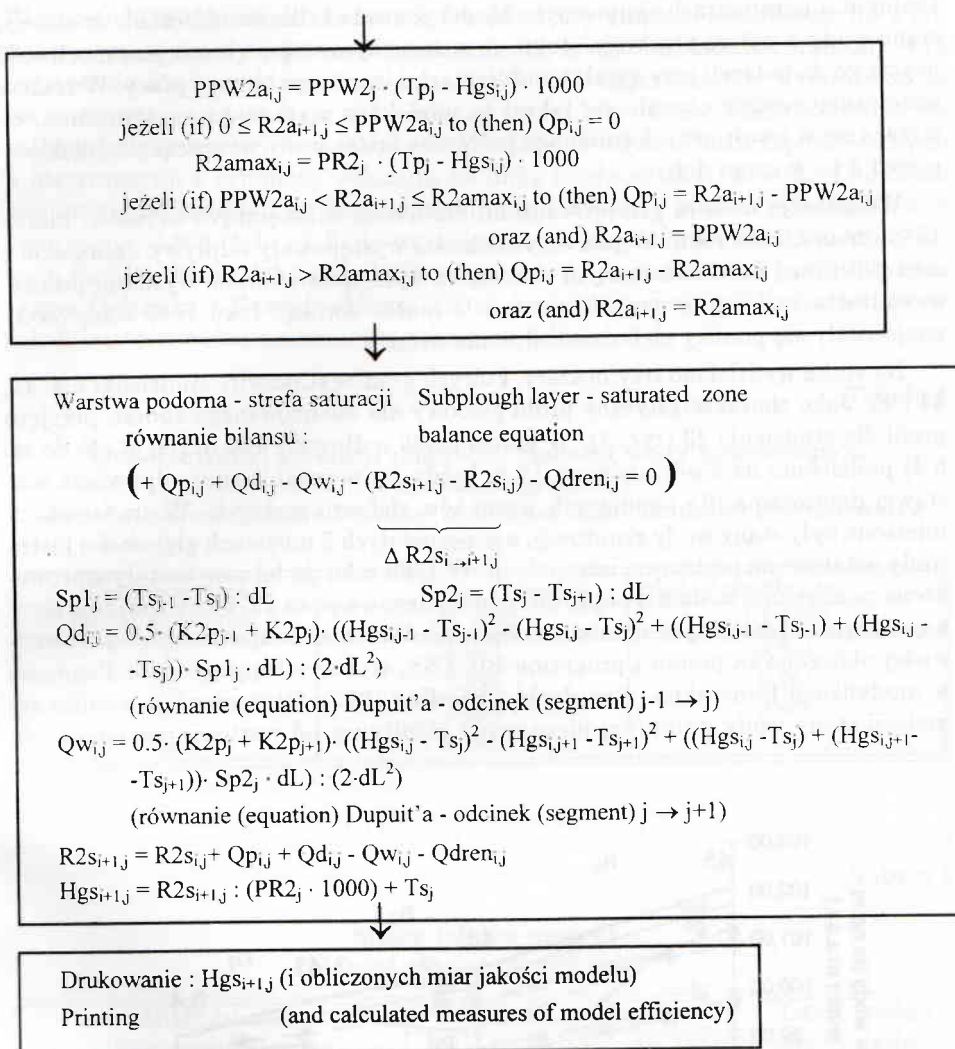
- R1ij – wskaźnik retencji warstwy ornej (mm), index of water storage in plough layer,  
R2aij – wskaźnik retencji strefy aeracji warstwy podornej (mm), index of water storage in aerated zone of subplough layer,  
Qpij – wskaźnik dopływu ze strefy aeracji do saturacji warstwy podornej (mm), index of inflow from aerated to saturated zone of subplough layer,  
R2sij – wskaźnik retencji strefy saturacji warstwy podornej (mm), index of storage in saturated zone of subplough layer,  
Qdij – wskaźnik dopływu strefą saturacji do danego odcinka (mm), index of inflow by saturated zone to current segment,  
Qwij – wskaźnik wypływu strefą saturacji z danego odcinka (mm), index of outflow by saturated zone from current segment,  
Qdrenij – wskaźnik odpływu drenarskiego z danego odcinka (mm), index of drain outflow from current segment,  
Hgp/sij – stan wody gruntowej pomierzony (p), symulowany (s) (m n.p.m.), ground water level measured (p), simulated (s),  
Tz – poziom odniesienia (m n.p.m.), reference level,  
Tpj – położenie powierzchni terenu (m n.p.m.), position of surface area,  
Toj – położenie spągu warstwy ornej (m n.p.m.), position of plough layer sill,  
Tsj – położenie spągu warstwy podornej (m n.p.m.), position of subplough layer sill,  
Tdrenj – położenie drenu w danym odcinku (m n.p.m.), position of drain pipe in current segment,  
L – długość stoku (m), length of slope,  
dL – długość odcinka (m), length of segment,  
n – liczba obszarów charakterystycznych, number of specific areas,  
M – liczba odcinków na stoku, number of segments on slope,  
N – liczba dni symulacji, number of simulated days,  
K1j – współczynnik filtracji warstwy ornej (mm/doba), coefficient of filtration of plough layer,  
K2j – współczynnik filtracji pionowej warstwy podornej (mm/doba), coefficient of vertical filtration of subplough layer,  
K2pj – współczynnik filtracji poziomej warstwy podornej (mm/doba), coefficient of horizontal filtration of subplough layer,  
PPW1j – połowa pojemność wodna warstwy ornej (0-1) (—), field water capacity of plough layer,  
PPW2j – połowa pojemność wodna warstwy podornej (0-1) (—), field water capacity of subplough layer,  
PR1j – współczynnik porowatości warstwy ornej (0-1) (—), void ratio of plough layer,  
PR2j – współczynnik porowatości warstwy podornej (0-1) (—), void ratio of subplough layer

Czytanie danych :  $P_i, E_i, Hg_{p0j}, Q_{dren_{ij}}$   
 Reading of data  $K1_j, K2_j, K2p_j, PPW1_j, PPW2_j, PR1_j, PR2_j$   
 $Tp_j, To_j, Ts_j, Tdren_j, Tz, L, M, N (i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M)$   
 $i$  - nr doby, number of day,  $j$  - nr odcinka, number of segment

Powierzchnia terenu Surface area  
 równanie bilansu : balance equation  
 $(+ Sd_{ij} - Sw_{ij} + P_i - Ip1_{ij} = 0)$   
 $Ip1_{ij} = P_i + Sd_{ij}$   
 jeżeli (if)  $Ip1_{ij} > K1_j$  to (then)  $Sw_{ij} = Ip1_{ij} - K1_j$  oraz (and)  $Ip1_{ij} = K1_j$   
 jeżeli (if)  $Ip1_{ij} \leq K1_j$  to (then)  $Sw_{ij} = 0$

Warstwa orna Plough layer  
 równanie bilansu : balance equation  
 $(+ Ip1_{ij} - Ip2_{ij} - E_i - (R1_{i+1j} - R1_{ij}) = 0)$   
 $\Delta R1_{i \rightarrow i+1j}$   
 $R1_{i+1j} = R1_{ij} + Ip1_{ij} - E_i$  ( $\downarrow$  upward water movement)  
 jeżeli (if)  $R1_{i+1j} < 0$  to (then)  $Ip2_{ij}$  (podsiak) =  $R1_{i+1j}$  oraz (and)  $R1_{i+1j} = 0$   
 $PPW1Do_j = PPW1_j \cdot (Tp_j - To_j) \cdot 1000$   
 jeżeli (if)  $0 \leq R1_{i+1j} \leq PPW1Do_j$  to (then)  $Ip2_{ij} = 0$   
 $R1max_j = PR1_j \cdot (Tp_j - To_j) \cdot 1000$   
 jeżeli (if)  $PPW1Do_j < R1_{i+1j} \leq R1max_j$  to (then)  $Ip2_{ij} = R1_{i+1j} - PPW1Do_j$   
 oraz (and)  $R1_{i+1j} = PPW1Do_j$   
 jeżeli (if)  $R1_{i+1j} > R1max_j$  to (then)  $Ip2_{ij} = R1_{i+1j} - R1max_j$  oraz (and)  $R1_{i+1j} = R1max_j$   
 (występuje spływ podpowierzchniowy) (appearing subsurface runoff)

Warstwa podorna - strefa aeracji Subplough layer - aerated zone  
 równanie bilansu : balance equation  
 $(+ Ip2_{ij} - Qp_{ij} - (R2a_{i+1j} - R2a_{ij}) = 0)$   
 $\Delta R2a_{i \rightarrow i+1j}$   
 $R2a_{i+1j} = R2a_{ij} + Ip2_{ij}$  ( $\downarrow$  upward water movement)  
 jeżeli (if)  $R2a_{i+1j} < 0$  to (then)  $Qp_{ij}$  (podsiak) =  $R2a_{i+1j}$  oraz (and)  $R2a_{i+1j} = 0$



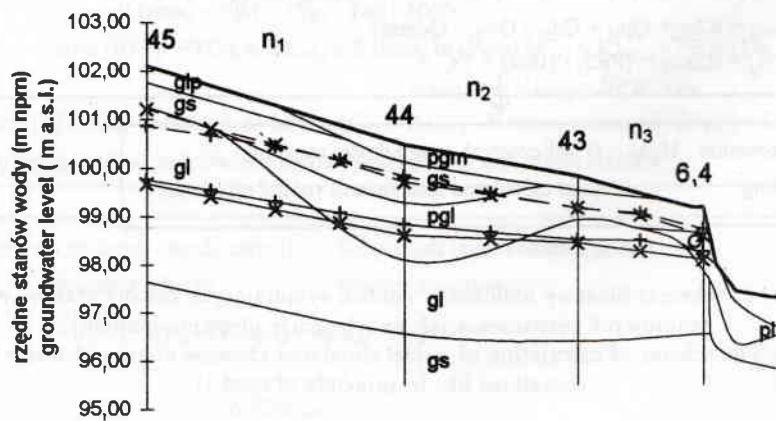
Ryc. 2. Schemat blokowy obliczeń w modelu symulującym zmiany stanów wód gruntowych (oznaczenia jak na schemacie ideowym modelu)

Fig. 2. The scheme of calculation of model simulated changes of ground water levels (notations like in principle of model)

tualnym o parametrach skupionych. Model pozwala tylko na obliczanie średniego stanu wody w całym przekroju stoku, co w znacznym stopniu zmniejsza możliwość użycia go do potrzeb przyjętych w założeniach niniejszego tematu pracy. W trakcie testowania modelu okazało się także, że model ten wykazuje przesterowania, co wyraża się w gwałtownych zmianach położenia lustra wody wynoszących, niekiedy ponad 3 m w ciągu doby.

Weryfikację modelu przeprowadzono dla dwóch miesięcznych okresów: marca 1988 i marca 1989 roku. W pierwszym okresie występowały odpływy drenarskie z sieci położonej na analizowanym zboczu, co było spowodowane wysokim położeniem lustra wody gruntowej. Natomiast w marcu suchego roku 1989 stany wody znajdowały się poniżej głębokości ułożenia drenów.

Na stoku wydzielono trzy obszary, których granice stanowiły studzienki 6.4, 43, 44 i 45. Jako charakterystyczny profil glebowy dla analizowanego zbocza przyjęto profil dla studzienki 43 (ryc. 3). W modelu stok o długości 120 m (od st. 45 do st. 6.4) podzielono na 8 odcinków po 15 m każdy, co w przybliżeniu odpowiada rozstawie drenowania dla panujących warunków glebowo-wodnych. W studzienkach mierzone były stany wody gruntowej, a w pozostałych 5 miejscach głębokości lustra wody ustalono na podstawie interpolacji. W 1988 roku do bilansu zostały wprowadzone pomierzone wielkości odpływu drenarskiego z sączka 13, który znajduje się w najniższym wydzielonym w modelu obszarze. Wartości ewapotranspiracji rzeczywistej obliczono za pomocą programu BILANS, wykorzystującego wzór Penmana w modyfikacji francuskiej (Przybyła i Fiedler 1992). Otrzymane w wyniku symulacji stany wody gruntowej nieznacznie różniły się od wartości pomierzonych.



Ryc. 3. Pomierzone (x) i symulowane (+) stany wody gruntowej na stoku wzniesienia  
 - - - 23.03.1988, ——— 25.03.1989, ○ sączek drenarski 13

Fig. 3. Measured (x) and simulated (+) groundwater levels on the hill slope - - -  
 23.03.1988, ——— 25.03.1989, ○ drain pipe 13



W marcu 1988 roku maksymalne różnice pomiędzy stanami symulowanymi a pomierzonymi wynosiły  $-34$  cm w studziencie 45, a w studziencie 6.4 wyniosły  $+13$  cm, średnio dla 9 punktów  $11$  cm (ryc. 3). W 1989 roku różnice te wynosiły od  $20$  cm w studziencie 44 do  $6$  cm w studziencie 43, średnio  $13$  cm. Także obliczone dla kolejnych dni symulacji współczynniki korelacji pomiędzy stanami pomierzonymi a otrzymanymi z symulacji wskazują na dużą zgodność stanów wody. Obliczone współczynniki korelacji po 22 dniach symulacji wyniosły w 1989 roku  $0,958$ , a w 1988 roku  $-0,869$  (tab. 1). Są to wartości istotne na poziomie  $\alpha = 0,01$ . Miary jakości modelu dla 22 doby symulacji, proponowane przez **Sarma i in.** (1973) oraz **Ozge-Zielińską i Brzezińskiego** (1994), zestawiono w tabeli 2. Zestawione w tabeli wartości wskazują na dobrą jakość modelu.

Tabela 1

Współczynniki korelacji pomiędzy stanami wody pomierzonymi i symulowanymi  
Correlation coefficients between measured and calculated ground-water levels

Doba symulacji Day of simulation	Okres symulacji – Period of simulation	
	III 1988	III 1989
7	0,988	0,994
14	0,899	0,967
22	0,869	0,958
30	0,765	—

Tabela 2

Miary jakości modelu  
Model efficiency measures

Miara jakości Efficiency measure	Wartość – Value		Jakość modelu Model quality
	III 1988	III 1989	
Współczynnik korelacji liniowej Correlation coefficient	0,869	0,958	zadowalająca fair
Specjalny współczynnik korelacji Special correlation coefficient	0,984	0,989	bardzo dobra very good
Całkowity błąd kwadratowy Integral square error	6,070	5,053	dobra good

## Podsumowanie

Przedstawiony w pracy schemat blokowy modelu, służący do symulacji i przebiegu stanów wody gruntowej na stokach wzniesień w terenach bogato urzeźbionych pozwala, na podstawie opracowanego programu obliczeniowego, na prognozowanie wpływu projektowanych melioracji na zmiany tych stanów. Weryfikacja modelu i związanego z nim programu obliczeniowego, opartych na prowadzonych obserwacjach stanów wody gruntowej i pomiarach odpływów z sieci drenarskiej wykazała, że model można ocenić według przyjętej w literaturze skali jako dobry.

## Literatura

- Białousz S. (1978): Wpływ morfogenezy Pojezierza Mazurskiego na kształtowanie się gleb. *Rocz. Nauk Roln. Ser. D*, 166.
- Kosturkiewicz A. (1989): Ochrona zasobów wodnych w krajobrazie rolniczym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 375: 73-87.
- Kosturkiewicz A. (1992): Melioracje i kształtowanie środowiska rolniczego Wielkopolski. *Mater. Konf. Nauk. „Ochrona i racjonalne wykorzystanie zasobów wodnych na terenach rolniczych w Regionie Wielkopolski”*. Poznań: 71-83.
- Kosturkiewicz A., Szafrąński Cz. (1983): Spływy powierzchniowe i podpowierzchniowe w bilansie wodnym gleb. *PTPN, Pr. Kom. Nauk Roln. Kom. Nauk Leśn.* 55: 127-144.
- Kosturkiewicz A., Szafrąński Cz. (1984): The role of surface and subsurface flow in the natural drainage of soil profile. *Int. Comm. Irrigation and Drainage*. 12th Congr.: 827-834.
- Kosturkiewicz A., Szafrąński Cz. (1988): Stosowanie drenowań niesystematycznych. Załącznik do „Wytycznych drenowania gruntów ornych”. *Mater. Instr.* 65, Inst. Melior. Użyt. Ziel., Falenty: 1-10.
- Marcinek J. (1992): Parametryzacja środowiska glebowego w aspekcie gospodarki wodnej gleb. *Probl. Agrofiz.* 40: 20-52.
- Marcinek J., Wiślańska A. (1984): Asocjacje czarnych ziem i gleb płowych falistej moreny dennej Równiny Kościańskiej. *Rocz. AR Pozn.* 149, 5: 65-81.
- Mioduszeński W. (1991): Wpływ melioracji na środowisko przyrodnicze. *Biul. Inf. Melior. Roln.* 2: 6-15.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. (1994): *Hydrologia stosowana*. PWN, Warszawa.
- Przybyła Cz., Fiedler M. (1992): Sterowanie nawodnieniami - teoria i praktyka. *Rocz. AR Pozn.* 234, 10: 101-108.
- Sarma P.B.S., Delleur J.W., Rao A.R. (1973): Comparison of rainfall-runoff models for urban areas. *J. Hydrol.* 18: 329-347.
- Sharpley A.N., Williams J.R. (1990): EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator. U.S. Dept. Agric. Tech. Bull. 1768.
- Solarski H. (1973): Charakterystyka odpływu wód z sieci drenarskiej na Pojezierzu Mazurskim. *Wiad. Inst. Melior. Użyt. Ziel., Falenty*, 11: 2.
- Szafrąński Cz. (1993): Gospodarka wodna gleb terenów bogato rzeźbionych i potrzeby ich melioracji. *Rocz. AR Pozn. Rozpr. Nauk.* 244.

Szafrański Cz., Szulczewski W. (1992): Model symulacyjny i program obliczeniowy gospodarki wodnej gleb na stoku. Maszyn. Kat. Melior. Kształt. Środ. AR Poznań. Wytyczne drenowania gruntów ornyczych. (1988). Inst. Melior. Użyt. Ziel., Falenty.

## MODELLING GROUNDWATER LEVELS ON RICHLY RELIEFED AREAS AS BASIS FOR MELIORATION DESIGN

### S u m m a r y

Block scheme of model used for simulation of changes of groundwater level on richly relieved lowland areas is presented in this paper. The main aim of the model, and related with it computer implementation, is forecasting influence of projected land reclamation on changes of groundwater levels. The model verification, performed on the basis of measured groundwater levels and drainage outflows, shows that the model can be estimated as good.