

УДК: 519.6:[556.322+532.685]

В. Саприкін, асп.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РУХУ ВОЛОГИ В ҐРУНТАХ ЗОНИ АЕРАЦІЇ ДІЛЯНКИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОГО "РУДОГО ЛІСУ"

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.Є. Кошляковим)

Наведено методику моделювання вологоперенесення в гумідних кліматичних умовах в ґрунтах зони аерації невеликої потужності (2-3 м), складеної мілкозернистими пісками. Методика базується на використанні комп'ютерної програми HYDRUS-1D (що розв'язує рівняння Річардса). Описано одномірну модель руху води в ґрунтах чорнобильського "Рудого лісу". Особливу увагу приділено питанням параметризації і валідації моделі. Наводяться одержані гідрофізичні параметри ґрунтів.

Methodology of unsaturated moisture flow modeling in shallow unsaturated zone (2-3 m) consisting of fine sands in humid climatic conditions is described. Methodology utilizes HYDRUS-1D computer code (which solves Richard's equation). Description of developed one-dimensional model of unsaturated flow in soil profile of Chernobyl "Red forest" site is presented. Special attention is paid to questions of model parametrization and validation. Hydrophysical parameters of soils obtained as a result of model calibration are given.

Вступ. Метою виконаної роботи є розробка методики моделювання вологоперенесення в гумідних кліматичних умовах в ґрунтах зони аерації невеликої потужності (2-3 м), складеної мілкозернистими пісками, та методики параметризації, калібровки та валідації (перевірки адекватності) моделі.

Математичне моделювання процесів вологоперенесення в ґрунтах зони аерації застосовується для інтер-

претації даних гідрогеологічних спостережень, для оцінки режиму інфільтраційного живлення підземних вод, оптимізації режиму зрошення ґрунтів в сільському господарстві, для прогнозування процесів міграції радіонуклідів і інших забруднювачів із сховищ відходів, т.ін. [4, 5, 6, 8, 13].

При побудові математичної моделі вологоперенесення перед дослідником постають методичні питання:

– вибору програмного забезпечення для розрахунків; – розробки структури та вибору просторової дискретизації моделі; – формулювання граничних і початкових умов; – оцінки параметрів (коефіцієнтів) моделі, а також доведення того, що побудована модель адекватно описує відповідну гідрогеологічну систему (питання валідації моделі).

Слід зазначити, що моделювання процесів вологеперенесення в піщаних ґрунтах є особливо складним завданням у зв'язку із значною нелінійністю гідрофізичних характеристик піщаних порід (тобто залежності між вмістом води і капілярним тиском, і залежності між капілярним тиском і коефіцієнтом волого перенесення) [7].

Нижче представлений наш досвід моделювання вологеперенесення в піщаних ґрунтах зони аерації невеликої потужності (2-3 м) в умовах Українського Полісся. Для калібровки та валідації моделі були використані дані автоматизованих спостережень за режимом ґрунтів зони аерації та метеопараметрами, що проводилися на науковому радіоекологічному полігоні Інституту геологічних наук НАН України, розташованому в Чорнобильському "Рудому лісі" в Зоні відчуження ЧАЕС. Зазначені дослідження виконувалися в рамках програми

комплексних радіоекологічних досліджень з метою прогнозування міграції радіонуклідів із поховань РАВ і оцінки ризиків від геоміграційних процесів [1].

Набір експериментальних даних.

Характеристика полігону. Експериментальний полігон знаходиться в ближній зоні ЧАЕС на території пункту тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) "Рудий ліс" в межах першої надзаплавної тераси р. Прип'ять. На час досліджень полігон був вкритий посадками сосни віком 12-16 р. Зона аерації складається з 3 окремих шарів (будова – рис. 1, гранулометричний склад ґрунтів – табл. 1). Верхній шар (глибини 0-0,5 м) – насипний пісок, який було використано для ізоляції забрудненого радіонуклідами гумусованого шару при створенні поховань РАВ "Рудий ліс". Середній шар (глибини 0,5-0,75 м) – гумусований піщаний ґрунт, що до дезактиваційних робіт 1987 р являв собою приповерхневий шар. Цей шар відрізняється від інших шарів підвищеним вмістом дрібних фракцій. Нижній шар (з глибини 0,75 м та до рівня підземних вод) – дрібнозернистий кварцевий пісок еолового генезису. Загальна потужність зони аерації протягом періоду спостережень складала 2,3-3,9 м.

Таблиця 1

Типовий гранулометричний склад ґрунтів профілю, що моделюється

Вміст фракції, %	Розмір зерен фракції, мм								
	> 0,5	0,5–0,25	0,25–0,10	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,002	0,002–0,001	< 0,001
Техногенний ґрунт	4,9	26,4	54,2	11,8	1,0	0,3	0,2	0,2	1,0
Гумусований ґрунт	4,3	24,6	54,6	12,4	1,4	0,4	0,4	0,4	1,4
Корінний ґрунт	5,2	25,5	53,9	13,6	0,7	0,2	0,1	0,1	0,6

Територія полігону належить до зони помірно-континентального клімату. Річна кількість опадів складає ≈ 600 мм та перевищує величину випаровування (за даними Чорнобильської метеостанції). Величина річного інфільтраційного живлення складає 30-60 % від кількості опадів. РґВ швидко реагує на опади. Макси-

мальні рівні звичайно спостерігаються в травні, після весняного сніготанення, потім відбувається зниження рівня до середини осені. Далі зазвичай спостерігається стабілізація та поступове підвищення РґВ. Величина коефіцієнта фільтрації еолових пісків полігону коливається від 3 до 5 м/добу [1, 2].

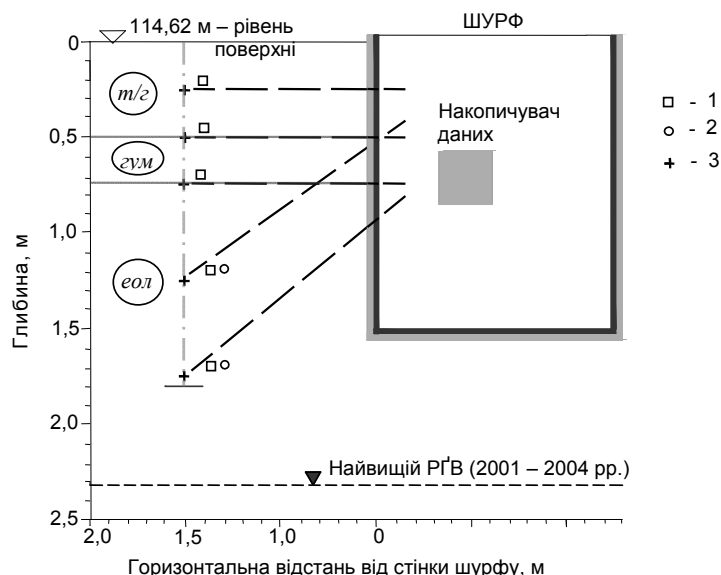


Рис. 1. Станція "Шурф" для спостереження за зоною аерації з вказаним ґрунтовим профілем, що моделюється: 1 – датчик вологості ML2x; 2 – датчик тиску SWТ6; 3 – точки встановлення датчиків (на схемі шурфу); т/г – техногенний шар ґрунту; гум – гумусований шар ґрунту; еол – шар корінного ґрунту (пісок еолового генезису)

Обладнання для спостережень. Для розробки моделі використано дані режимних спостережень за вмістом води в ґрунті, тиском порової води (всмоктуючим тиском) і метеопараметрами. Спостереження проводилися автоматизовано за допомогою станції моніторингу за гідрофізичними характеристиками зони аерації "Шурф" (див. рис. 1), та метеостанції. Дані спостере-

жень реєструвалися електронним логером (нокопичувачем даних). Вміст води визначався на глибинах 0,25; 0,5; 0,75; 1,25; 1,75 м. Всмоктуючий тиск – на глибинах 1,25; 1,75 м. Періодичність замірів гідрофізичних характеристик складала від 4 до 24 год, метеопараметрів – 1 год. Спостереження проводилися протягом 2001-2003 рр. [1]. Детальний опис автоматизованих

систем спостережень, встановлених на експериментальному полігоні, наведено в роботах [1, 2].

Методика моделювання. Для створення математичної моделі вологоперенесення була обрана добре відома програма HYDRUS-1D [12], яка базується на розв'язанні рівняння Річардса для порового насичено-ненасиченого середовища із застосуванням чисельного методу Галеркіна. Програма обладнана зручним графічним інтерфейсом, що спрощує роботу по підготовці вхідних та аналізу вихідних даних. HYDRUS-1D дозволяє моделювати вологоперенесення, масоперенесення, випаровування та транспірацію вологи рослинами, здатна автоматично підбирати ряд параметрів шляхом вирішення обернених задач. Програма HYDRUS-1D знаходиться у вільному доступі та може бути завантажена через Інтернет [16].

Рівняння Річардса є класичним диференціальним рівнянням нерозривності для ненасиченого порового середовища:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

де θ – об'ємна вологість ґрунту, $\text{см}^3/\text{см}^3$; t – час, дб; x – просторова координата, см; ψ – всмоктуючий тиск, см; K – коефіцієнт вологоперенесення, $\text{см}/\text{добу}$; S – "коефіцієнт поглинання" (відбір вологи корінням рослин), $\text{см}^3/(\text{см}^3 \cdot \text{добу})$.

Для опису гідрофізичних характеристик ґрунтів в HYDRUS можна обирати кілька альтернативних аналітичних моделей. В нашому випадку для апроксимації залежності об'ємної вологості (θ) від всмоктуючого тиску (ψ) було використано модель ван Генухтена [14]:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (2)$$

де S_e – ефективна вологість; θ_r – мінімальна вологість для даного ґрунту, $\text{см}^3/\text{см}^3$; θ_s – максимальна вологість, $\text{см}^3/\text{см}^3$; α , $1/\text{см}$; n ; m – емпіричні коефіцієнти рівняння, що відповідають за форму графіку залежності. Тут та для наступної залежності прийнято, що $m = 1 - (1/n)$.

Залежність коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску апроксимована за допомогою моделі Муалема [9].

$$K = K_s S_e' \left[1 - \left(1 - S_e'^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

де K_s – коефіцієнт фільтрації при повному насиченні, $\text{см}/\text{добу}$; l – параметр, що пов'язаний із геометрією порового простору (для більшості ґрунтів $l = 0,5$). Рівняння ван Генухтена та Муалема пов'язані між собою спільними коефіцієнтами, що під час калібрування моделі підбираються для двох рівнянь одночасно. Рівняння (2), (3) добре апроксимують натурні дані $\theta(\psi)$, $K(\psi)$ для пісків чорнобильського полігону [2]. Більшість коефіцієнтів мають зрозумілий фізичний зміст, завдяки чому можна слідкувати за коректністю отриманих значень.

Структура та дискретизація. Математична модель відтворює частину зони аерації біля станції "Шурф" від поверхні до глибини 1,8 м (див. рис. 1). Рівень ґрунтових вод та капілярна кайма протягом періоду спостережень були нижче цього діапазону глибин. Модель складається з трьох шарів (рис. 2), що відповідають зхарактеризованим вище шарам ґрунту.

При побудові моделі застосована просторова дискретизація з змінним кроком (див. рис. 2), згущена біля меж моделі та границь шарів (від 5 до 1 см). Загальна кількість вузлів чисельної дискретизації – 52. Як відомо, при правильно обраній нерегулярній просторовій дискретизації, розрахунок виконується більш ефективно і точно. Зокрема, важливо щоб біля меж моделі та меж шарів величина просторового кроку складала не більше 1 см, для уникнення похибок при розрахунку потоку [4].

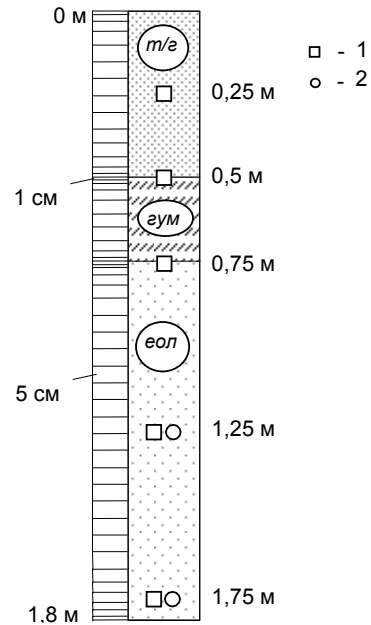


Рис. 2. Структура та просторова дискретизація моделі:
1 – глибина, де був встановлений датчик вологості ML2x;
2 – глибина, де був встановлений датчик тиску SWT6; т/г – техногенний шар ґрунту; гум – гумований шар ґрунту; еол – шар корінного ґрунту (пісок еолового генезису)

Граничні умови. Верхня гранична межа моделі задана як така, що контролюється атмосферними умовами: величиною опадів та потенційним випаровуванням. Її математичний опис виглядає наступним чином:

$$\left| -K \frac{\partial \psi}{\partial x} - K \right| \leq E,$$

за умови:

$$\psi_A \leq \psi \leq \psi_S \quad (4)$$

де E – максимальна потенційна швидкість інфільтрації або евапотранспірації, $\text{см}/\text{добу}$; ψ_A – мінімальний всмоктуючий тиск ґрунту, см; ψ_S – всмоктуючий тиск при повному насиченні, см. Значення ψ_S є рівним атмосферному, яке приймається як 0. При застосуванні наведеної граничної умови величина випаровування або інфільтрації опадів обмежена значенням коефіцієнта вологоперенесення на верхньому "граничному" вузлі моделі.

Потенційне випаровування розраховане з застосуванням методу Пенмана-Монтейна для поверхні "еталонний рослинний покрив". Даний метод рекомендовано Організацією продовольчих товарів та сільського господарства об'єднаних націй [3]. Реальне випаровування для соснового лісу може складати 80-90 % від еталонного. Схематизація передбачала, що 30 % опадів витрачалось на перехоплення кронами соснового лісу [11].

Нижня гранична умова обрана як "вільне стікання":

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

Фізичний зміст цієї граничної умови полягає в тому, що на нижній межі всмоктуючий тиск слабо змінюється по вертикалі і волога рухається внаслідок гравітаційного стікання. Оскільки за даними режимних спостережень рух вологи на глибині 1,8 м постійно направлений донизу, РГВ та капілярна кайма протягом періоду спостережень знаходилися нижче 1,8 м (див. рис. 1), то застосування даної граничної умови є коректним.

Результати.

Параметризація моделі. Для нижнього шару моделі значення коефіцієнтів α , n , K_s залежностей (2), (3) визначені за даними режимних спостережень станції "Шурф" із використанням методу "миттєвого профілювання балансу вологи" [2] (табл. 2, графіки залежностей – рис. 3).

Таблиця 2

Коефіцієнти рівнянь ван Генухтена та Мулеама для різних шарів моделі.

Шар моделі	$\theta_r, \text{см}^3/\text{см}^3$	$\theta_s, \text{см}^3/\text{см}^3$	$K_s, \text{см}/\text{добу}$	$\alpha, \text{см}^{-1}$	n	l
0-0,5 м	0,03	0,31	406	0,04	2,9	0,5
0,5-0,75 м	0,03	0,18	164	0,1	1,4	0,5
0,75-1,8 м	0,03	0,31	350	0,04	2,9	0,5

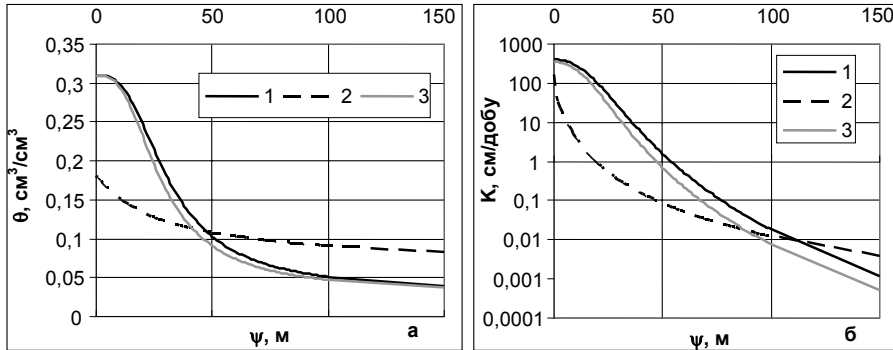


Рис. 3. Гідрофізичні залежності, для шарів математичної моделі:
 а) залежність ван Генухтена (2), б) залежність Мулеама (3), 1 – для техногенного ґрунту, 2 – для гумусованого ґрунту, 3 – для корінного еолового ґрунту

Для середнього (гумусованого) шару ґрунту значення коефіцієнтів α , n було визначено за натурними даними спостережень за вологістю та всмоктуючим тиском в траншеї із захороненим "рудим" лісом. Ці дані можна було застосувати для середнього шару, оскільки траншейний ґрунт аналогічний за режимом вологості і літологічними властивостями до ґрунту середнього шару. Значення K_s підбиралися шляхом калібрування чисельної моделі (на основі розв'язання обернених задач).

Для верхнього шару гідрофізичні параметри підбиралися шляхом калібрування моделі.

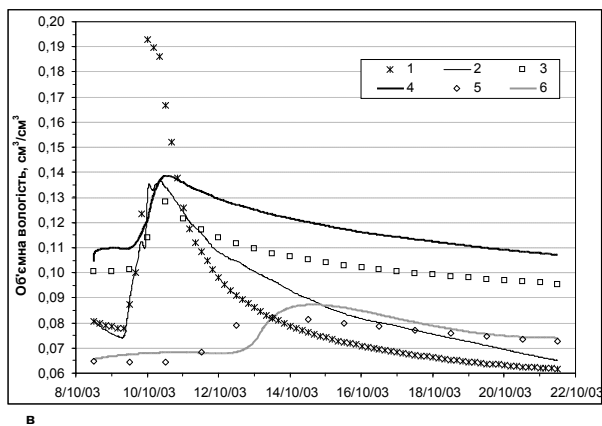
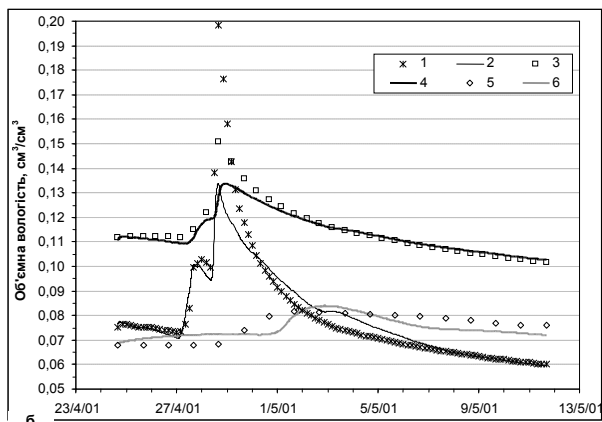
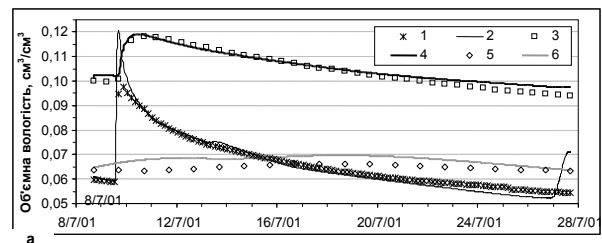
Параметр θ_r був заданий за попередніми лабораторними дослідженнями $0,03 \text{ см}^3/\text{см}^3$ для всіх шарів. Значення коефіцієнту θ_s було задано $0,31 \text{ см}^3/\text{см}^3$ для верхнього та нижнього шарів (за лабораторними дослідженнями). Для середнього шару величина θ_s була підібрана при моделюванні.

Модель калібрувалася відносно відомого режиму вмісту води в модельованому ґрунтовому профілі для глибин 0,25; 0,5; 0,75; 1,25; 1,75 м. При розв'язанні зворотних задач, коефіцієнти підбиралися в декілька кроків. Спочатку α , потім K_s , потім n та K_s . Так було зроблено, щоб спростити процедуру автоматичного підбору [15]. Для K_s було задано діапазон вірогідних значень (50-800 м/добу), на основі попередніх досліджень ґрунтів полігону [1].

За натурними даними спостережень за вологістю та всмоктуючим тиском в ґрунтах зони аерації в інтервалі глибин 0-1,8 м гістерезис гідрофізичних характеристик ґрунтів не спостерігався [2].

Калібрування та валідація моделі. Для моделювання були обрані три часові інтервали, що включали дощовий епізод і наступну інфільтрацію води. Один інтервал (08/07/2001-28/07/2001) був використаний для калібрування, два інші (24/04/2001-12/05/2001; 08/10/2003-22/10/2003) – для перевірки адекватності (валідації) моделі. На рис. 4 наведено графіки порівняння вимірних станцією моніторингу значень вмісту води в ґрунті з отриманими на моделі.

Для визначення якості калібрування моделі використовувалися наступні параметри: середнє квадратичне відхилення модельних значень вологості від вимірних (SSQ), та коефіцієнт кореляції (R^2) між ними. Для "дощового епізоду", використаного для калібрування, одержано $SSQ=0,05$ і $R^2=0,96$ (Рис. 4-а). Відкалібрована модель непогано відтворює режим вологості для другого епізоду того ж 2001 р ($SSQ=0,12$ та $R^2=0,9$; рис. 4-б), але трохи гірше – для 2003 р ($SSQ=0,29$ та $R^2=0,74$; рис. 4-в).



с. 4. Порівняння режиму природної вологості та розрахованої в результаті моделювання для обраних періодів:
 1 – натурні дані, глибина 0,25 м; 2 – "модельні" дані; 3 – натурні дані, глибина 0,5 м; 4 – "модельні" дані; 5 – натурні дані, глибина 1,25 м; 6 – "модельні" дані

Це може бути пов'язано з посиленням кореневого відбору соснами на полігоні внаслідок їх росту з 2001 р (вік сосен 14 р) до 2003 р (вік сосен 16 р). На наступних етапах досліджень планується більше уваги приділити в тому числі динаміці зміни кореневого відбору вологи лісовими насадженнями на полігоні.

Висновки. Наведена в статті методика загалом показала свою ефективність для прогнозування вологоперенесення в зазначених ґрунтових та кліматичних умовах. Для апроксимації гідрофізичних залежностей піщаних ґрунтів зони аерації доцільно використовувати рівняння ван Генухтена та Мулеама. Зокрема, наведена методика моделювання може бути застосована для прогнозування режиму ґрунтів зони аерації, складеної піщаними відкладами, і розрахунку інфільтраційного живлення підземних вод. Одержані параметри вологоперенесення можуть бути використані для розрахунку міграції радіонуклідів в ґрунтах на ділянці "Рудого лісу" та для інших радіаційно-небезпечних об'єктів, розташованих в ближній зоні ЧАЕС.

1. Бугай Д.О., Девієр Л., Скальський О.С. та ін. Дослідження міграції радіонуклідів на експериментальній ділянці-полігоні в ПТЛРВ "Рудий ліс". Ч. 2: Міграція радіонуклідів в геологічному середовищі // Чорнобильський науковий вісник. – 2007. – № 2 (30). – С. 16-33. 2. Саприкін В.Ю., Бугай Д.О., Скальський О.С., Джемло С.П., Ван Меєр Н., Кубко Ю.І., Сімонуччі К. Режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод на ділянці чорнобильського "Рудого лісу" // Зб. праць ІГН НАН України. – 2011. – С. 141-151. 3. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop

evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements // FAO Irrigation and Drainage Paper. – Rome, 1998. – No. 56. – 4. Carrera-Hernández J.J., Smerdon B.D., Mendoza C.A. Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization // Journal of Hydrology. – 2012. – V. 452-453. – P. 90-101. 5. Johansson P.O. Estimation of groundwater recharge in sandy till with two different methods using groundwater level fluctuations // J. Hydrol. – 1987. – V. 90. – P. 183-198. 6. Keese K.E., Scanlon B.R., Reedy R.C. Assessing controls on diffuse groundwater recharge using unsaturated flow modeling // Water Resour. Res. – 2005. – V. 41. – P. 1-12. 7. Kool J.B., Parker J.C., van Genuchten M.Th. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models – a review // J. Hydrol. – 1987. – V. 91. – P. 255-293. 8. Leterme B., Mallants D., Jacques D. Estimation of future groundwater recharge using climatic analogues and Hydrus-1D // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. – 2012. – V. 9. – P. 1389-1410. 9. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res. – 1976. – V. 12. – P. 513-522. 10. Scanlon B.R., Christman M., Reedy R.C., Porro I., Simunek J., Flerchinger G.N. Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions // Water Resour. Res. – 2002. – V. 38, № 12. – P. 59-1-59-16. 11. Shuttleworth W. J. Chapter 4. Evaporation // Handbook of Hydrology / aft. red. Maidment D. R. – New York, 1993. – P. 4.1-4.53. 12. Simunek J., Šejna M., van Genuchten M. T. HYDRUS-1D, version 4.14, code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated porous media // Tech. rep. – University of California, Riverside, 2005. 13. Stauffer F., Kinzelbach W. Cyclic hysteretic flow in porous medium column: model, experiment, and simulations. Journal of Hydrology. – 2001. – V. 240. – P. 264-275. 14. van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am J. – 1980. – V. 44. – P. 892-898. 15. Yeh W.W.-G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem // Water Resour. Res. – 1986. – V. 22, № 2. – P. 95-108. 16. PC-PROGRESS. Engineering software developer. www.pc-progress.com/en/Default.aspx.

Надійшла до редколегії 02.10.12