

**МОДЕЛЬНІ ОЦІНКИ ІНФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ВОЛОГИ КРИЗЬ ҐРУНТОВІ ЕКРАНИ ХВОСТОСХОВИЩ
ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ ПРИДНІПРОВСЬКОГО ХІМІЧНОГО ЗАВОДУ (М. КАМ'ЯНСЬКЕ)**

**MODEL ESTIMATION OF MOISTURE INFILTRATION RATES THROUGH ENGINEERED SOIL COVERS
OF THE URANIUM MILL TAILINGS AT THE PRIDNEPROVSKY CHEMICAL PLANT (KAMIANSKE)**

В.Ю. Саприкін, Д.О. Бугай, О.С. Скальський

Volodymyr Yu. Saprykin, Dmytro O. Bugai, Oleksandr S. Skalskyi

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O.ra St., Kyiv, Ukraine, 01601 (VladimirSaprykin@ukr.net)

Математичне моделювання вологоперенесення застосовано для оцінки діапазону величини інфільтраційних потоків води крізь ґрунтові екрани хвостосховищ відходів переробки уранових руд на території колишнього Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське), що залишився у спадок з радянських часів. Досліджуваний об'єкт знаходиться в зоні помірно-континентального клімату (середня кількість опадів становить 540 мм/рік). Для моделювання вологоперенесення в ґрунтах зони аерації використано програмний пакет HYDRUS-1D. Застосовано так звану «системозалежну» верхню граничну умову для поверхні ґрунтового профілю, на яку впливають атмосферні умови. Для визначення верхньої граничної умови використані метеорологічні дані з метеостанції м. Дніпро (розташована на відстані 40 км). Величини інфільтраційних потоків води оцінені з використанням метеорологічних даних за 5 років (2001-2003; 2005-2006). Розрахунки виконано для двох типів ґрунту: «суглинок» та «супісок» (використані гідрофізичні параметри для ґрунтів «loam» і «silt» з бібліотеки HYDRUS-1D), при потужності ґрунтового профілю 1 і 2 м, при наявності або відсутності рослинності на поверхні ґрунту. Згідно з отриманими результатами, інфільтраційний потік води може становити 107-220 мм/рік (в залежності від типу модельного ґрунту та наявності або відсутності рослинності) або 20-40% річної суми опадів. Потужність ґрунтового екрану (1 або 2 м) має невеликий вплив на результати моделювання. Наявність рослинності (трав'яного покриву) на поверхні ґрунтового екрану зменшує величину річного інфільтраційного потоку приблизно на 30%.

Ключові слова: Придніпровський хімічний завод, інфільтраційні потоки води, ґрунтові екрани, хвостосховища переробки уранових руд.

Mathematical modeling is applied to estimate range of moisture infiltration rates through soil covers of the uranium mill tailings situated at the soviet era uranium production legacy site Pridneprovsky Chemical Plant (PChP, Kamianske City). The study site is characterized by temperate-continental climate (average precipitation rate is 540 mm/year). The HYDRUS-1D software package (Šimůnek et al., 2005) is used for simulation of variably saturated water flow. The so-called 'system dependent' boundary condition is used at the top of soil profile, which is exposed to atmospheric conditions. Meteorological data from Dnipro weather station (situated at 40 km distance) are used to define the upper boundary condition. Infiltration recharge rates are estimated using meteorological data for 5 years (2001-2003; 2005-2006). Calculations are carried out for two soil types: «loam» and «silt» (using default hydraulic parameters from the library of HYDRUS-1D), for cases of 1 m and 2 m thick soil profiles, and assuming presence or absence of vegetation on the top of soil cover. Based on simulation results, moisture infiltration rate is estimated at 107-220 mm/year (depending on modeled soil material, presence or absence of vegetation) or 20-40% of yearly precipitation. The thickness of soil cover (1 or 2 m) has little impact on simulation results. Vegetation (grass) on top of soil cover decreases the yearly infiltration rate approximately by 30%.

Keywords: Pridneprovsky Chemical Plant, moisture infiltration rate, soil covers, uranium mill tailings.

ВСТУП

Нами було застосовано математичне моделювання вологоперенесення для розрахунку інфільтраційного потоку через ґрунтові екрани хвостосховищ переробки уранових руд, розташованих на території колишнього Придніпровського хімічного заводу (ПХЗ, м. Кам'янське – раніше м. Дніпродзержинськ). Представлені нижче дослідження були проведені в рамках оцінки ризиків від міграції техногенних забруднювачів (радіонукліди, токсичні метали) з хвостосховищ терито-

рії ПХЗ до підземних і поверхневих вод. Представлена методика і результати моделювання також можуть бути використані для обґрунтування оптимальної конструкції ізолюючих ґрунтових екранів для тих хвостосховищ, де подібні екрани є відсутніми або вимагають реконструкції.

Ґрунтові екрани застосовуються для зниження ексгаляції радону і мінімізації зовнішнього випромінювання від зосереджених в хвостосховищах радіоактивних відходів, що вміщують дочірні радіонукліди уранового ряду, зокрема

радій-226. Екранування відходів також дозволяє мінімізувати інфільтрацію атмосферних опадів в тіло хвостосховищ, і знизити вилуговування радіонуклідів і хімічних токсикантів із хвостосховищ в підземні води. Так, ґрунтовий екран потужністю 1-2,5 м із суглинистого ґрунту був облаштований в 2001 р. на частині поверхні хвостосховища «Західне», що зазнало водної ерозії. В 2009 р. ґрунтовий екран потужністю 0,5-1,5 м із суглинистого ґрунту був облаштований на хвостосховищі «Південно-Східне». На деяких із хвостосховищ ПХЗ, зокрема на хвостосховищах «Центральний Яр» і «Сухачівське (секція 1)», при консервації не були обладнані інженерні ґрунтові екрани із належними ізолюючими властивостями, і для них є актуальним питання проектування і облаштування надійних ґрунтових екранів.

Для моделювання волого- та теплоперенесення в ґрунтових екранах хвостосховищ ми використали програмний пакет HYDRUS-1D, що розв'язує рівняння Річардса (Šimůnek et al., 2005). Були проведені розрахунки для двох типів ґрунту: «супісок» («loam») і «суглинок» («silt»), в умовах присутності або відсутності рослинності на поверхні ґрунту. Можна припустити що в першому наближенні ґрунт типу «супісок» відповідає природному ґрунту території ПХЗ, а ґрунт «суглинок» – матеріалу поверхневих захисних ґрунтових екранів хвостосховищ переробки уранових руд. Були задіяні значення гідрофізичних параметрів і параметрів теплоперенесення ґрунтів з бібліотеки програми HYDRUS-1D (через відсутність достатніх даних про оригінальні характеристики ґрунтів досліджуваних об'єктів).

Для визначення верхньої граничної умови моделей були застосовані метеорологічні дані з метеостанції м. Дніпро (розміщене на відстані 40 км). На нижній межі моделей вологоперенесення ми використали граничну умову «нульового градієнта» з метою змоделювати ґрунтові профілі, волога з яких вільно дрениується донизу.

Для кожного типу ґрунту було виконано два розрахунки для потужності ґрунтових профілів 1 і 2 м з метою оцінити вплив потужності профілю на величину інфільтраційного потоку. Також оцінено вплив наявності або відсутності рослинності на поверхні ґрунтового екрану на величину інфільтраційного потоку.

Математичне моделювання вологоперенесення в зоні аерації (що базується на розв'язанні рівняння Річардса) неодноразово використовувалося в літературі для оцінки інфільтраційного живлення підземних вод (Stothoff, 1997; Kearns

and Hendrickx, 1998; Keese et al., 2005; Leterme et al., 2012; Ries et al., 2015; Šimůnek, 2015; Pasha, 2018).

Через невизначеності в нелінійних залежностях між коефіцієнтом вологоперенесення, всмоктуючим тиском і вмістом вологи оцінка інфільтраційного живлення на основі моделювання вологоперенесення є приблизною, і результати моделювання по можливості слід підтверджувати альтернативними (експериментальними, теоретичними) методами. Загалом, кожному з методів оцінки інфільтраційного живлення притаманні свої складнощі і похибки. Тому для підвищення надійності оцінок інфільтраційного живлення необхідно застосовувати різні методи (Scanlon et al., 2002).

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Метеорологічні дані

Щоденні метеорологічні дані за 2001-2006 рр., використані для розрахунків, були завантажені з вебсайту www.pogodaiklimat.ru. Ці дані зібрані на метеостанції м. Дніпро (40 км від м. Кам'янське). Вони включали: середні добові температури, максимальні і мінімальні температури та кількість опадів.

Клімат території можна охарактеризувати як помірно-континентальний. Середня кількість атмосферних річних опадів протягом 2001-2006 рр. становила 540 мм/рік (рис. 1). Дані за 2004 р. були виключені з розрахунків через екстремальну кількість опадів в цьому році (задача розрахунків була в тому щоб оцінити середні багаторічні величини інфільтраційних потоків). Середня температура теплої половини року (з 15 квітня до 14 жовтня) становить приблизно +18 С°. Середня температура холодної половини року (з 15 жовтня до 14 квітня) становить приблизно 0 С°.

Моделювання вологоперенесення HYDRUS-1D

та головні рівняння волого- та теплоперенесення
Для створення математичної моделі вологоперенесення було використано програмний пакет HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2005). HYDRUS базується на розв'язанні рівняння Річардса для руху вологи в поровому середовищі зі змінною насиченістю та рівнянь конвективної дифузії для перенесення тепла та розчинених речовин.

Програмний пакет складається з комп'ютерної програми HYDRUS та інтерактивного графічного інтерфейсу HYDRUS1D, що спрощує роботу по підготовці вхідних та аналізу вихідних даних. HYDRUS-1D знаходиться у вільному доступі та

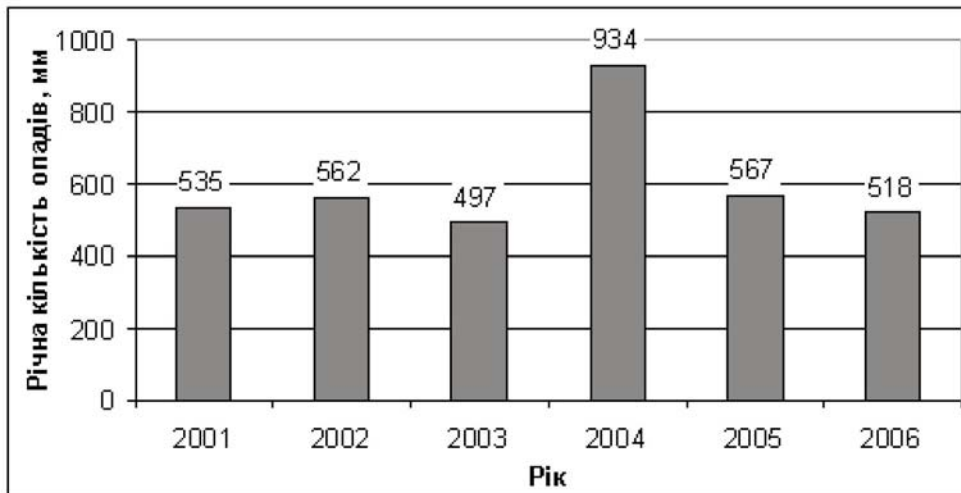


Рис. 1. Сумарні річні атмосферні опади за 2001-2006 рр. (за даними Дніпровської метеостанції).

Fig. 1. Summary meteoric water precipitations for 2001-2006 at Dnipro weather station.

може бути завантажений з офіційного сайту розробника PC-Progress (www.pc-progress.com).

Програма HYDRUS може використовуватися для аналізу руху вологи та розчинених речовин в умовах як ненасиченого (вологперенесення), так і насиченого (фільтрація) порового середовища. Програма чисельно розв'язує рівняння Річардса для вологперенесення та рівняння адвекційно-дисперсійного типу для тепло- та масоперенесення шляхом застосування методу лінійних кінцевих елементів типу Галеркіна. Рівняння вологперенесення включає в себе «коефіцієнт поглинання», що дозволяє враховувати відбір вологи корінням рослин. Рівняння конвективної дифузії для одномірного теплоперенесення в поровому середовищі зі змінною насиченістю враховує теплоперенос з водою внаслідок кондуктивного та конвекційного процесів. Програма дозволяє використовувати для верхньої граничної умови реальні кліматичні дані та автоматично розраховувати величину випаровування. Нижня гранична умова може бути задана як «вільне стікання».

Одновимірне вологперенесення в частково насиченому однорідному пористому середовищі описується модифікованою формою рівняння Річардса, враховуючи припущення, що повітряна фаза (пара) відіграє незначну роль у процесі вологперенесення і що перенесення води внаслідок дії теплових градієнтів можна не враховувати:

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

де θ – об'ємна вологість ґрунту, $\text{см}^3/\text{см}^3$;
 t – час, доба; x – просторова координата, см;

ψ – всмоктуючий тиск, см; K – коефіцієнт вологперенесення, $\text{см}/\text{добу}$; S – «коефіцієнт поглинання» (відбір вологи корінням рослин), $\text{см}^3/(\text{см}^3 \cdot \text{добу})$.

Рівняння конвективної дифузії для одномірного теплоперенесення в поровому середовищі зі змінною насиченістю враховує теплоперенесення з водою внаслідок кондуктивного та конвекційного процесів та має такий вигляд (не беручи до уваги ефект дифузії водяної пари на процеси теплоперенесення) (Sophocleous, 1979):

$$C_p(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - C_w q \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

де $\lambda(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту, $\text{г} \cdot \text{см}/\text{добу}^3 \cdot \text{К}$; $C_p(\theta)$ та C_w – відповідно об'ємні теплоємності для порового середовища та рідкої фази, $\text{г}/\text{см} \cdot \text{добу}^2 \cdot \text{К}$; T – температура, К ; q – швидкість вологперенесення за законом Дарсі, $\text{см}/\text{добу}$. Об'ємна теплоємність визначається як добуток об'ємної щільності та гравіметричної теплоємності.

Гідрофізичні характеристики та параметри теплоперенесення ґрунтів зони аерації

Аналітичні моделі гідрофізичних характеристик ґрунтів. Гідрофізичні характеристики – це нелінійні залежності вологості ґрунтів $\theta(\psi)$ і коефіцієнта вологперенесення $K(\psi)$ від всмоктуючого тиску (ψ). Для опису гідрофізичних характеристик ґрунтів в HYDRUS можна обирати кілька альтернативних аналітичних моделей. В нашому випадку було використано модель ван Генухтена (van Genuchten, 1980). Ван Генухтен використав ста-

тистичну модель розподілу розміру пор Муалема, щоб отримати рівняння залежності коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску (Mualem, 1976). Рівняння ван Генухтена має такий вигляд:

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha\psi|^n]^m} & \psi < 0 \\ \theta_s & \psi \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (4)$$

де

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1 \quad (5)$$

S_e – це ефективне насичення (effective saturation, англ.), що може бути розраховане як на основі вологості θ , так і всмоктуючого тиску ψ .

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (6)$$

θ_r , θ_s , α , n , та K_s є незалежними параметрами наведених рівнянь. θ_r – мінімальна вологість для даного ґрунту (residual water content, англ.), cm^3/cm^3 ; θ_s – максимальна вологість (вологість насиченого ґрунту; saturated water content, англ.), cm^3/cm^3 ; K_s – коефіцієнт фільтрації при повному насиченні (saturated hydraulic conductivity, англ.), $\text{cm}/\text{добу}$; a , $1/\text{cm}$; n ; m – емпіричні коефіцієнти рівняння, що відповідають за форму графіка залежності; l – параметр, що пов'язаний із геометрією порового простору (для більшості ґрунтів $l = 0,5$ (Mualem, 1976)).

Величини коефіцієнтів гідрофізичних залежностей. Як було зазначено, гідрофізичні характеристики та параметри теплоперенесення ґрунтів були взяті з бібліотеки програмного пакету HYDRUS-1D. Для розрахунків були використані характеристики двох типів ґрунтів: «супісок» і «суглинок» («loam» and «silt») (табл. 1).

При моделюванні ми виходили з припущення, що властивості природного ґрунту території ПХЗ є наближеними до властивостей ґрунту «супісок» з бібліотеки HYDRUS-1D, а властивості менш проникного матеріалу, що використовувався для створення ґрунтових екранів хвостосховищ відходів переробки уранових руд, близькі до ґрунту «суглинок».

Суглинок (*silt*, англ.) – ґрунт, розмір зерен якого коливається між розмірами зерен глин та пісків (від 0,002 до 0,05 мм – за системою класифікації структури ґрунтів Департаменту сільськогосподарства Сполучених Штатів). Супісок (*loam*, англ.) – ґрунт, складений піщаними, пилуватими та глинистими частинками в приблизно рівних пропорціях: близько 40-40-20%, відповідно (Kaufmann and Cleveland, 2008).

Для відбору води корінням рослин застосовували модель (Feddes et al., 1978).

Параметри теплоперенесення описуються рівняннями, наведеними в (de Vries, 1963; de Marsily, 1986; Chung and Horton, 1987). Були використані відповідні значення коефіцієнтів рівнянь теплоперенесення для ґрунтів «супісок» та «глина» («clay») з бібліотеки HYDRUS-1D (в бібліотеці відсутні значення коефіцієнтів рівнянь теплоперенесення для ґрунту «суглинок» («silt»)).

Залежності, описані в (Philip and Vries, 1957; Constantz, 1982) були використані для врахування впливу температури на всмоктуючий тиск (ψ) та коефіцієнт вологоперенесення (K), відповідно. Зазначимо, що програма HYDRUS автоматично враховує вплив промерзання ґрунтового профілю на процеси вологоперенесення.

Початкові та граничні умови

Початкові умови. Розв'язання рівнянь волого- та теплоперенесення вимагає знання початкового розподілу всмоктуючого тиску чи об'ємної вологості та температури в ґрунтового профілі. Для отримання початкових розподілів було використано такий алгоритм: спочатку вологість у профілі була задана як така, що дорівнює польовій вологоємності (Twarakavi et al., 2009), а темпе-

Таблиця 1. Величини коефіцієнтів рівнянь ван Генухтена для ґрунтів «супісок» та «суглинок» з бібліотеки HYDRUS-1D
Table 1. Values of van Genuchten equations coefficients of «loam» and «silt» soils taken from HYDRUS-1D library

Ґрунт	$\theta_r, \text{cm}^3/\text{cm}^3$	$\theta_s, \text{cm}^3/\text{cm}^3$	$\alpha, 1/\text{cm}$	n	$K_s, \text{cm}/\text{добу}$	l
Супісок	0,078	0,43	0,036	1,56	24,96	0,5
Суглинок	0,034	0,46	0,016	1,37	6	0,5

ратура – що дорівнює $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Потім було виконано розрахунок волого- та теплоперенесення для першого розрахункового року. Кінцевий розподіл вологості та температури було застосовано для повторного річного розрахунку, і так далі. Мета полягала в тому, щоби добитися квазі-стаціонарного розподілу параметрів – щоби кінцевий розподіл (в кінці розрахункового року) дорівнював початковому розподілу. Одного циклу розрахунку виявилось достатньо, крім випадку 2-метрового профілю ґрунту типу «суглинок», для якого було виконано два цикли розрахунків.

Граничні умови. На нижній межі модельних профілів ми використали граничну умову другого роду (з нульовим градієнтом напору) для волого- та теплоперенесення, щоби змодельовати вільне стікання води з профілів. Ми припускали, що рівень ґрунтових вод (РГВ) та капілярна кайма знаходяться достатньо глибоко та не впливають на вологоперенесення на тих глибинах, які моделюються (1 та 2 м від денної поверхні).

На верхній межі модельного профілю, яка моделює поверхню розділу «ґрунт – атмосфера», ми використали так звану «системозалежну» граничну умову. В цьому випадку потік води, що проходить крізь межу «ґрунт – повітря», контролюється як зовнішніми метеорологічними умовами, так і динамічними умовами вологоперенесення приповерхневої частини ґрунту (Neuman et al., 1974). Системозалежна гранична умова для верхньої межі була задана як така, що здатна до накопичення (безстічні умови) надлишкового шару води на поверхні (коли швидкість інфільтрації перевищує коефіцієнт вологоперенесення).

Для визначення верхньої системозалежної граничної умови були використані щоденні метеодані. Дані про щоденні кількості опадів та величини потенційної евапотранспірації (що включає потенційну величину випаровування з поверхні ґрунту та транспірації рослинами) були застосовані як системозалежна верхня гранична умова для моделювання вологоперенесення. Для розрахунку потенційної евапотранспірації ми використали відому емпіричну залежність Харгрівса (Jensen et al., 1997) та дані про максимальні та мінімальні добові температури. На жаль, доступні через Інтернет дані не включають всіх параметрів, необхідних для застосування комбінованого рівняння Пенмана-Монтейна (рекомендованого (FAO, 1990)).

Для розв'язання рівняння теплоперенесення використано верхню граничну умову типу Діріхле (Dirichlet type). Були задіяні відомі серед-

ні добові значення температури повітря.

Відбір води корінням. На основі натурних спостережень на поверхні хвостосховища «Дніпровське» (територія ПХЗ) було прийнято, що глибина кореневої системи трав'яного покриву в середньому становить 15 см. Розподіл інтенсивності поглинання води корінням було задано як такий, що змінюється лінійно від максимуму (див. рівняння (1)) біля поверхні до 0 на глибині 16 см. Середня висота трав'яного покриву була прийнята як така, що дорівнює 20 см.

Перехоплення дощової води зеленою масою розраховувалося на основі коефіцієнта щільності листяного покриву (LAI) та константи перехоплення (0,25 мм/добу, стандартне значення для рослинності) (van Dam et al., 1997). LAI обчислювалося за висотою трав'яного покриву. На основі LAI та коефіцієнта перехоплення сонячного світла (у нашому випадку заданого рівним 0,463, що є стандартним значенням) обчислювалася також відсоткова частка транспірації та випаровування в сумарній евапотранспірації.

Потужність ґрунтових профілів, що моделюються, та просторова дискретизація

Як вже зазначалося, було проведено по два розрахунки для кожного типу ґрунту («супісок» та «суглинок») – для профілів потужністю 1 та 2 м з метою оцінити вплив цього параметра на величину інфільтраційного потоку на нижній межі профілю.

Була застосована змінна просторова дискретизація профілів. Відстань між вузлами моделі поступово зростала від 1 мм біля поверхні профілю до 1 см на глибині 5 см. Нижче 5 см відстань між вузлами становила 1 см.

РЕЗУЛЬТАТИ

У табл. 2 та 3 представлені результати розрахунку величини інфільтраційного потоку. Як видно з табл. 2, сумарний інфільтраційний потік залежить від властивостей матеріалу ґрунтових екранів, але майже не залежить від потужності екранів. Наявність трав'яного покриву на поверхні ґрунту знижує інфільтраційний потік приблизно на 30% (табл. 3).

Оскільки середня річна сума опадів для 5 років включених до розрахунків, становить 540 мм, інфільтраційний потік за відсутності рослинності сягає приблизно 40% від величини опадів для «супіску» та майже 28% для «суглинка». Більша частина річної кількості опадів випаровується поверхнею ґрунту.

Таблиця 2. Результати розрахунку величини річних інфільтраційних потоків (мм/рік) для різних типів ґрунту за відсутності рослинності на поверхні

Table 2. Calculated infiltration recharge rate (mm/year) for different soil types in bare soil conditions

Потужність, м	Тип ґрунту	Рік					Середнє
		2001	2002	2003	2005	2006	
1	Супісок	150	230	194	252	263	218
1	Суглинок	90	144	175	165	185	152
2	Супісок	156	194	220	253	243	213
2	Суглинок	104	112	181	187	170	151

Таблиця 3. Розраховані середні (для 5-річного періоду) величини інфільтраційних потоків (мм/рік) для різних типів ґрунтів за відсутності або наявності рослинності

Table 3. Calculated average (for 5 year period) infiltration recharge rate (mm/year) for different soil types when vegetation is present or absent

Наявність рослинності	Тип ґрунту	
	Супісок	Суглинок
Без рослинності	218	152
Трав'яний покрив	150	107

У «суглинку» через нижчу проникність (менший коефіцієнт вологоперенесення) волога довше залишається на глибинах, доступних для випаровування. При наявності трав'яного покриву інфільтраційний потік становить приблизно 28% від величини опадів для «супіску» та майже 20% для «суглинку».

Графіки інфільтраційних потоків води протягом 2001-2003 рр. представлені на рис. 2, 3. Величина потоку води через профілі «суглинків», як правило, менша, ніж така через профілі «супісків». Інфільтраційний потік на глибині 2 м зміщений в часі порівняно з потоком на глибині 1 м. Максимальні швидкості потоку для глибини 2 м менші та досягаються пізніше. В цілому, коливання інтенсивності потоків на глибині 2 м більш «згладжені». При наявності рослинного покриву щоденні значення потоку помітно менші, крім періодів з низькою температурою та надмірним зволоженням.

Раніше були створені 3- та 2-вимірні регіональні моделі фільтрації в ґрунтовому водоносному горизонті для території ПХЗ (Skalskyi et al., 2011). При їх калібруванні були підбрані значення інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту. Наприклад, для території хвостосховища «Дніпровське», вкритого фосфогіпсом, інфільтраційне живлення було оцінено в 110 мм/рік, а для території правобережної тераси р. Дніпро, де розташований проммайданчик ПХЗ, – приблизно 70 мм/рік.

Розраховані за допомогою одномірного моделювання вологоперенесення величини інфільтраційних потоків можна вважати верхньою оцінкою величини інфільтраційного живлення. Величина інфільтраційного потоку приблизно 107 мм/рік для ґрунту типу «суглинок» (з рослинним покривом) майже збігається з оцінкою величиною інфільтраційного живлення для тіла хвостосховища «Дніпровське» за даними калібрування фільтраційної моделі (110 мм/рік). Рельєф поверхні хвостосховища «Дніпровське» сприятливий до акумуляції надлишкової води опадів, що відповідає застосованій авторами при розрахунку інфільтраційних потоків верхній граничній умові (з можливістю до накопичення шару води).

Калібруванням 3- та 2-вимірної регіональних моделей фільтрації інфільтраційне живлення на території тераси р. Дніпро було оцінене на рівні приблизно 70 мм/рік, що помітно менше результатів одномірного моделювання. Інфільтраційне живлення для території тераси р. Дніпро може бути менше за живлення для території хвостосховищ, оскільки тераса має більший нахил у бік річки, що сприяє стіканню частини води під час опадів. Дренажні системи для збору поверхневих вод також здатні зменшити величину інфільтраційного живлення, тому отримана в даному випадку різниця в оцінках є очікуваною.

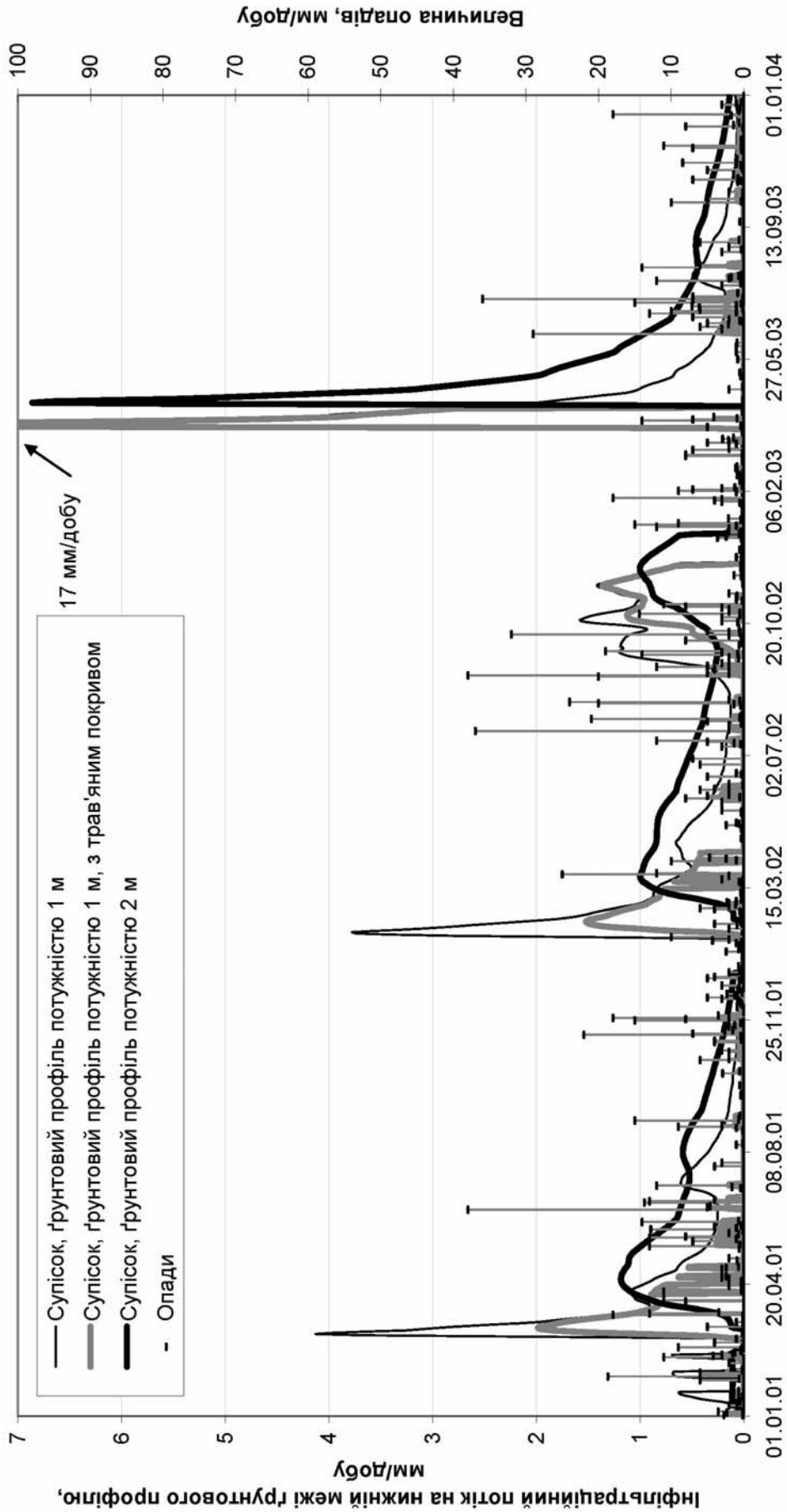


Рис. 2. Розраховані добові величини інфільтраційних потоків для ґрунтових екранів за 2001-2003 рр., складених матеріалом «сулісок» («loam»).

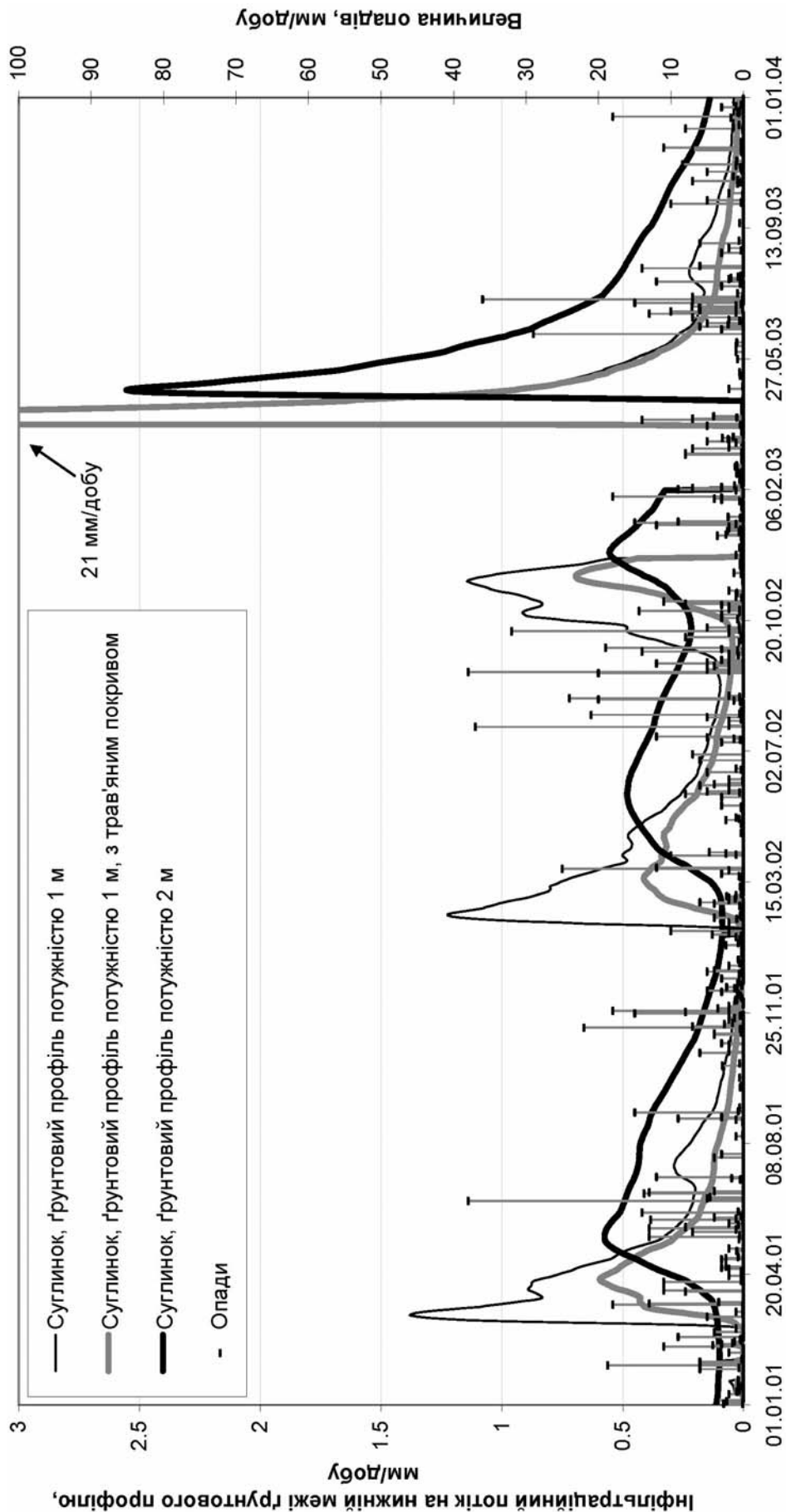


Рис. 3. Розраховані добові величини інфільтраційних потоків для ґрунтових екранів за 2001-2003 рр., складених матеріалом «суглинок» («silt»).

Fig. 3. Calculated daily infiltration rates for 1 and 2 m thick «silt» covers (2001-2003).

ВИСНОВКИ

Величина річних інфільтраційних потоків для різних типів ґрунтів на досліджуваній території колишнього ПХЗ при відсутності рослинного покриву може становити 151-218 мм/рік (28-40% річної суми опадів). При наявності рослинного покриву річний інфільтраційний потік може сягати 107-150 мм/рік (20-28% річної суми опадів).

В результаті моделювання середня річна величина інфільтраційного потоку на нижній межі ґрунтових профілів потужністю 1 та 2 м виявилася майже однаковою. Проте амплітуда коливань добової інтенсивності інфільтраційного потоку на

глибині 2 м менша, ніж така на глибині 1 м, максимальні інтенсивності інфільтрації вологи теж менші.

Представлені в статті модельні оцінки річного інфільтраційного потоку відповідають максимальним значенням інфільтраційного живлення за відсутності поверхневого стоку.

Отримані оцінки, з врахуванням похибок через обмеження розрахункової схеми, близькі до значень інфільтраційного живлення, одержаних раніше при калібруванні 3- та 2-вимірних регіональних моделей фільтрації для території Придніпровського хімічного заводу.

REFERENCES

Chung S.-O., Horton R., 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.* 23 (12): 2175-2186 (In English).

Constantz J., 1982. Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46 (3): 466-470 (In English).

de Marsily G., 1986. Quantitative Hydrogeology. *London: Academic Press*, 464 p. (In English).

de Vries D.A., 1963. The thermal properties of soils. in *Physics of Plant Environment*, ed. R.W. van Wijk. Amsterdam: North Holland, pp. 210-235 (In English).

Feddes R.A., Kowalik P.J., Zaradny H., 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. *New York: John Wiley & Sons*, 188 p. (In English).

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1990. ANNEX V, FAO Penman-Monteith Formula. In: *Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. Rome, Italy, 28-31 May 1990. Comparative analysis crop water requirement methodologies.* Rome (Italy). FAO, 45 p. (In English).

Jensen D.T., Hargreaves G.H., Temesgen B., Allen R.G., 1997. Computation of Eto under nonideal conditions. *J. Irrig. Drainage* 123 (5): 394-400 (In English).

Kaufmann R.K., Cleveland C.J., 2008. Environmental Science. *Boston: McGraw-Hill Higher Education*. 552 p. (In English).

Kearns A.K., Hendrickx J.M.H., 1998. Temporal variability of diffuse groundwater recharge in New Mexico. *Tech. Rep. No. 309. Socorro: N.M. Water Resour. Res. Inst.* 43 p. (In English).

Keese K.E., Scanlon B.R., Reedy R.C., 2005. Assessing con-

Chung, S.-O., Horton, R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.* 1987. 23 (12). Pp. 2175-2186.

Constantz, J. Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1982. 46 (3). Pp. 466-470.

de Marsily, G. Quantitative Hydrogeology. *London: Academic Press*, 1986. 464 p.

de Vries, D.A. The thermal properties of soils. In: *Physics of Plant Environment*, ed. R.W. van Wijk. Amsterdam: North Holland, 1963. Pp. 210-235.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. *New York: John Wiley & Sons*. 1978. 188 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. ANNEX V, FAO Penman-Monteith Formula. In: *Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. Rome, Italy, 28-31 May 1990. Comparative analysis crop water requirement methodologies.* Rome (Italy). FAO, 1990. 45 p.

Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen B., Allen R.G. Computation of Eto under nonideal conditions. *J. Irrig. Drainage*. 1997. 123 (5). Pp. 394-400.

Kaufmann, R.K., Cleveland, C.J. Environmental Science. *Boston: McGraw-Hill Higher Education*, 2008. 552 p.

Kearns, A.K., Hendrickx, J.M.H. Temporal variability of diffuse groundwater recharge in New Mexico. *Tech. Rep. No. 309. Socorro: N.M. Water Resour. Res. Inst.* 1998. 43 p.

Keese, K.E., Scanlon, B.R., Reedy, R.C. Assessing controls on

- trois on diffuse groundwater recharge using unsaturated flow modeling. *Water Resour. Res.* 41: 1-12 (In English).
- Leterme B., Mallants D., Jacques, D., 2012. Sensitivity of groundwater recharge using climatic analogues and HYDRUS-1D. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (8): 2485–2497 (In English).
- Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522 (In English).
- Neuman S.P., Feddes R.A., Bresler E., 1974. Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants. *Third Annual Report, Project ALO-SWC-77. Technion, Haifa, Israel: Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Lab.*, 208 p. (In English).
- Pasha E., 2018. *Quantifying Groundwater Recharge Under Dynamic Seasonality in Cold Climates. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Masters of Science in Earth Sciences.* Waterloo, Ontario, Canada (In English).
- Philip J. R., de Vries D.A., 1957. Moisture movement in porous media under temperature gradients. *Eos Trans. AGU* 38 (2): 222-232 (In English).
- Ries F., Lange, J. Schmidt, S., Puhlmann H., Sauter M., 2015. Recharge estimation and soil moisture dynamics in a Mediterranean, semi-arid karst region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19 (3): 1439–1456 (In English).
- Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.*, 10: 18-39 (In English).
- Simunek, J., 2015. Estimating Groundwater Recharge Using HYDRUS-1D. *Engineering Geology and Hydrogeology.* 29: 25-36 (In English).
- Šimůnek J., van Genuchten M.Th., Šejna M., 2005. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 3.0. *HYDRUS Software Series 1. Riverside: University of California, Department of Environmental Sciences*, 240 p. (In English).
- Skalskyi O., Bugai D., Voitsekhovitch O., Ryazantsev V., Avila R., 2011. Groundwater monitoring data and screening radionuclide transport modeling analyses for the uranium mill tailings at the Pridneprovsky Chemical Plant Site (Dneprodzerginsk, Ukraine). In: *The New Uranium Mining Boom: Challenge and lessons learned.* ed. B. Merkel, M. Schipek. Berlin: Springer-Verlag, P. 219-228 (In English).
- Sophocleous M., 1979. Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media. *Water Resour. Res.* 15 (5): 1195-1206 (In English).
- Stothoff S.A., 1997. Sensitivity of long-term bare soil infiltration diffuse groundwater recharge using unsaturated flow modeling. *Water Resour. Res.* 2005. 41. Pp. 1-12.
- Leterme, B., Mallants, D., Jacques, D. Sensitivity of groundwater recharge using climatic analogues and HYDRUS-1D. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. 16 (8). Pp. 2485–2497.
- Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 1976. 12. Pp. 513-522.
- Neuman, S.P., Feddes, R.A., Bresler, E. Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants. *Third Annual Report, Project ALO-SWC-77. Technion, Haifa, Israel: Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Lab.* 1974. 208 p.
- Pasha E. *Quantifying Groundwater Recharge Under Dynamic Seasonality in Cold Climates. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Masters of Science in Earth Sciences.* Waterloo, Ontario, Canada, 2018. 141 p.
- Philip, J. R., de Vries, D.A. Moisture movement in porous media under temperature gradients. *Eos Trans. AGU.* 1957. 38 (2). Pp. 222-232.
- Ries, F., Lange, J., Schmidt, S., Puhlmann, H., Sauter, M. Recharge estimation and soil moisture dynamics in a Mediterranean, semi-arid karst region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2015. 19 (3). Pp. 1439–1456.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.* 2002. 10. Pp. 18-39.
- Simunek, J. Estimating Groundwater Recharge Using HYDRUS-1D. *Engineering Geology and Hydrogeology.* 2015. 29. Pp. 25-36.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 3.0. *HYDRUS Software Series 1. Riverside: University of California, Department of Environmental Sciences*, 2005. 240 p.
- Skalskyi, O., Bugai, D., Voitsekhovitch, O., Ryazantsev, V., Avila, R. Groundwater monitoring data and screening radionuclide transport modeling analyses for the uranium mill tailings at the Pridneprovsky Chemical Plant Site (Dneprodzerginsk, Ukraine). In: *The New Uranium Mining Boom: Challenge and lessons learned.* ed. B. Merkel, M. Schipek. Berlin: Springer-Verlag, 2011. Pp. 219-228.
- Sophocleous, M. Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media. *Water Resour. Res.* 1979. 15 (5). Pp. 1195-1206.
- Stothoff, S.A. Sensitivity of long-term bare soil infiltration sim-

tion simulations to hydraulic properties in an arid environment. *Water Resour. Res.* 33: 547-558 (In English).

Twarakavi N.K.C., Sakai M., Šimůnek J., 2009. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. *Water Resour. Res.* 45: 1-9 (In English).

van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898 (In English).

van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Valsum P.E.V., Groenendijk, P., van Diepen, C.A., 1997. Theory of SWAP, version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. *Dept. Water Resources, WAU, Report 71, DLO, Technical Document 45. Wageningen: Winand Staring Centre.* 167 p. (In English).

ulations to hydraulic properties in an arid environment. *Water Resour. Res.* 1997. 33. Pp. 547-558.

Twarakavi, N.K.C., Sakai, M., Šimůnek, J. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. *Water Resour. Res.* 2009. 45. Pp. 1-9.

van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am J.* 1980. 44. Pp. 892-898.

van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Valsum, P.E.V., Groenendijk, P., van Diepen, C.A. Theory of SWAP, version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. *Dept. Water Resources, WAU, Report 71, DLO, Technical Document 45. Wageningen: Winand Staring Centre,* 1997. 167 p.

Manuscript received November 7, 2019;
revision accepted December 5, 2019

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ВЛАГИ ЧЕРЕЗ ГРУНТОВЫЕ ЭКРАНЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ПРИДНЕПРОВСКОГО ХИМИЧЕСКОГО ЗАВОДА (г. КАМЕНСКОЕ)

В.Ю. Сапрыкин, Д.А. Бугай, А.С. Скальский

Математическое моделирование влагопереноса в зоне аэрации выполнено для оценки диапазона величины инфильтрационных потоков влаги через грунтовые экраны хвостохранилищ отходов переработки урановых руд на территории бывшего Приднепровского химического завода (г. Каменское), который остался в наследство с советских времен. Исследуемый объект находится в зоне умеренно-континентального климата (среднее количество осадков составляет 540 мм/год). Для моделирования влагопереноса в грунтах зоны аэрации использован программный пакет HYDRUS-1D. Применено так называемое «системозависимое» верхнее граничное условие для поверхности грунтового профиля, на которую влияют атмосферные условия. Для определения верхнего граничного условия использованы метеорологические данные с метеостанции г. Днепр (расположена на расстоянии 40 км). Величины инфильтрационных потоков влаги оценены с использованием метеорологических данных за 5 лет (2001-2003; 2005-2006). Расчеты выполнены для двух типов грунта: «суглинок» и «супесок» (использованы гидрофизические параметры для грунтов «loam» и «silt» из библиотеки HYDRUS-1D), при мощности грунтового профиля 1 и 2 м, при наличии или отсутствии растительности на поверхности грунта. Согласно полученным результатам, инфильтрационный поток влаги может составлять 107-220 мм/год (в зависимости от типа модельного грунта и наличия или отсутствия растительности) или 20-40% годовой суммы осадков. Мощность грунтового профиля (1 или 2 м) имеет незначительное влияние на результаты моделирования. Наличие растительности (травяного покрова) на поверхности грунтового экрана уменьшает величину годового инфильтрационного потока приблизительно на 30%.

Ключевые слова: Приднепровский химический завод, инфильтрационные потоки влаги, грунтовые экраны, хвостохранилища переработки урановых руд.