

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ІНФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД І ОЦІНКИ КОЕФІЦІЄНТА ВОДОВІДДАЧІ ПІЩАНИХ ҐРУНТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОЛИВАНЬ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД

**В.Ю. Саприкін<sup>1</sup>, Д.О. Бугай<sup>2</sup>, О.С. Скальський<sup>3</sup>, Ю.І. Кубко<sup>4</sup>**

*(Рекомендовано д-ром геол.-мінерал. наук М.С. Огняником)*

<sup>1</sup> *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: VladimirSaprykin@ukr.net  
Провідний гідрогеолог.*

<sup>2</sup> *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна.  
Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.*

<sup>3</sup> *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна.  
Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник.*

<sup>4</sup> *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна.  
Молодший науковий співробітник.*

Розглянуті методичні аспекти оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод (РґВ). Для аналізу використано дані автоматизованого моніторингу РґВ, метеорологічних параметрів, вмісту вологи і капілярного (всмоктуючого) тиску в піщаному ґрунтовому профілі зони аерації експериментального полігону ІГН НАН України в Чорнобильській зоні відчуження в ПТЛРВ «Рудий ліс». Запропоновано вдосконалену процедуру (у порівнянні зі стандартною версією методу) визначення швидкості рецесії РґВ, що є однією з ключових процедур при розрахунках інфільтраційного живлення. Також запропоновано методику для оцінки коефіцієнта водовіддачі ґрунтів зони аерації на основі аналізу коефіцієнтів кореляції між величинами опадів і відповідними інтегральними (з урахуванням рецесії) підвищеннями РґВ. Методики застосовано для розрахунку інфільтраційного живлення підземних вод на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» за період 2000-2012 рр. Оцінена величина коефіцієнта водовіддачі піщаних ґрунтів ПТЛРВ «Рудий ліс» становить  $\mu \approx 0,11$ . Одержана величина середнього річного інфільтраційного живлення сягає 295 мм/рік (210-439 мм/рік для окремих років), або 47% (37-62%) від кількості опадів. Розраховане інфільтраційне живлення добре узгоджується з оцінками, отриманими іншими методами.

*Ключові слова:* зона аерації, інфільтраційне живлення, метод Біндемана, Чорнобильська зона, коефіцієнт водовіддачі.

## METHOD FOR GROUNDWATER RECHARGE AND SPECIFIC YIELD COEFFICIENT ESTIMATION FOR SANDY SOILS USING WATER TABLE FLUCTUATIONS ANALYSIS

**V.Yu. Saprykin<sup>1</sup>, D.O. Bugai<sup>2</sup>, O.S. Skalskyi<sup>3</sup>, Yu.I. Kubko<sup>4</sup>**

*(Recommended by doctor of geological-mineralogical sciences M.S. Ognianyk)*

<sup>1</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: VladimirSaprykin@ukr.net  
Principal hydrogeologist.*

<sup>2</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.  
Candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher.*

<sup>3</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.  
Candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher.*

<sup>4</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.  
Junior researcher.*

© В.Ю. Саприкін, Д.О. Бугай, О.С. Скальський, Ю.І. Кубко, 2015

The article discusses methodical aspects of groundwater recharge estimation using water table fluctuation analysis method (WTF-method). The analysis operates data set of automated monitoring of water table, meteorological parameters, water content and suction pressure in sandy unsaturated zone soil profile of experimental site of IGS NASU situated in Chernobyl exclusion zone in «Red Forest» waste damp area. Improved procedure (in comparison with the standard version of WTF-method) for estimation of water table recession rate, which is one of the key parameters of recharge estimation, is proposed. Also a method for quantification of specific yield of unsaturated zone soils is described. This method is based on analysis of correlation coefficients between amount of precipitations and corresponding integral (taking to account recession) water table rise. Methods were used for quantification of groundwater recharge at experimental site in Chernobyl «Red Forest» for the 2000-2012 years period. The estimated specific yield coefficient for local sandy soils is  $\mu \approx 0.11$ . Obtained average value of annual recharge is 295 mm/year (210-439 mm/year for different years) or 47% (37-62%) of precipitation amount. The calculated values of groundwater recharge are in good agreement with estimates obtained using other methods. *Key words:* vadose zone, groundwater recharge, water table fluctuation method, Chernobyl zone, specific yield.

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД И ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ВОДООТДАЧИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД**

**В.Ю. Сапрыкин<sup>1</sup>, Д.А. Бугай<sup>2</sup>, А.С. Скальский<sup>3</sup>, Ю.И. Кубко<sup>4</sup>**

*(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Н.С. Огняником)*

<sup>1</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: VladimirSaprykin@ukr.net  
Ведущий гидрогеолог.*

<sup>2</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина.  
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.*

<sup>3</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина.  
Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.*

<sup>4</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина.  
Младший научный сотрудник.*

Рассмотрены методические аспекты оценки инфильтрационного питания грунтовых вод на основе анализа колебаний уровня грунтовых вод (УГВ). Для анализа использованы данные автоматизированного мониторинга УГВ, метеорологических параметров, влажности грунта и капиллярного (всасывающего) давления в песчаном грунтовом профиле зоны аэрации экспериментального полигона ИГН НАН Украины в Чернобыльской зоне отчуждения в ПВЛРО «Рыжий лес». Предложена усовершенствованная процедура (в сравнении со стандартной версией метода) определения скорости рецессии УГВ, которая является одной из ключевых процедур при расчете инфильтрационного питания. Также предложена методика для оценки коэффициента водоотдачи грунтов зоны аэрации на основе анализа коэффициентов корреляции между величинами осадков и соответствующими интегральными (с учетом рецессии) повышениями УГВ. Методики использованы для расчета инфильтрационного питания подземных вод на полигоне в ПВЛРО «Рыжий лес» за период 2000-2012 гг. Оцененная величина коэффициента водоотдачи песчаных грунтов ПВЛРО «Рыжий лес» составила  $\mu \approx 0,11$ . Полученная величина среднего годового инфильтрационного питания равна 295 мм/год (210-439 мм/год для отдельных лет), или 47% (37-62%) от количества осадков. Рассчитанное инфильтрационное питание хорошо согласуется с оценками, полученными другими методами.

*Ключевые слова:* зона аэрации, инфильтрационное питание, метод Биндемана, Чернобыльская зона, коэффициент водоотдачи.

## Вступ

Метод оцінки величини інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод (РГВ) у російськомовній літературі відомий як метод Біндемана [Биндеман, 1963], а в англійській – як WTF-метод (Water Table Fluctuations) [Healy, Cook 2002]. Метод використовується з 20-х років ХХ ст. [Meinzer, 1923]. Приклади застосування методу із обговоренням його переваг і недоліків наведено в [Healy, Cook, 2002].

Привабливість WTF-методу полягає в його простоті, оскільки для його використання необхідні лише режимні дані вимірювань рівня води в спостережній свердловині (гідрограф свердловини). Такі заміри, як правило, виконуються в рамках програм гідрогеологічного моніторингу і є доступними для аналізу. Метод належить до так званих «графоаналітичних» методів, тобто включає графічний аналіз гідрографа свердловини дослідником, в ході якого можливі суб'єктивні похибки, що є певним недоліком методу. Також для застосування методу необхідно знати величину коефіцієнта водовіддачі ґрунтів зони аерації. Цей коефіцієнт є параметром, специфічним для конкретних гідрогеологічних умов.

Ми застосували WTF-метод для визначення інфільтраційного живлення ґрунтових вод у рамках комплексних гідрогеологічних досліджень на експериментальному полігоні Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України, розташованому в пункті тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) «Рудий ліс» у Чорнобильській зоні відчуження. Розвинуті автоматизовані системи гідрогеологічних спостережень, обладнані на полігоні (див. розд. 1), дозволили одержати комплексний набір даних, що включав детальні дані про режим РГВ, дані моніторингу руху вологи в зоні аерації і метеорологічні спостереження [Бугай та ін., 2007]. Для визначення інфільтраційного живлення застосовувалися кілька альтернативних методів (з метою перекресного підтвердження їх результатів), зокрема гідрофізичний метод, який базується на розрахунку вертикальних потоків вологи в ґрунтовому профілі на основі використання закону Дарсі [Саприкін та ін., 2011].

Комплексний аналіз даних моніторингу РГВ, метеоданих і результатів застосування гідрофізичного методу дозволив детально охарактеризувати чинники, які впливають на

гідрограф РГВ у спостережних свердловинах. На основі аналізу були визначені процедури застосування WTF-методу, що дозволяють вирішити зазначені вище методичні проблеми (тобто виконати коректну оцінку швидкості рецесії РГВ і відповідну графічну екстраполяцію гідрографа свердловини; див. розд. 2). Також запропоновано процедуру для оцінки коефіцієнта водовіддачі піщаних ґрунтів (див. розд. 3).

## 1. Характеристика експериментального полігону та моніторингового обладнання

### 1.1. Характеристика полігону

Полігон розташований в 2,5 км на південний захід від 4-го блоку ЧАЕС в межах «Західного» сліду радіоактивного викиду в ПТЛРВ «Рудий ліс». Після аварії на Чорнобильській АЕС сосновий ліс, який знаходився на цій території, загинув від високих рівнів радіоактивного опромінення і був похований *in situ*.

Експериментальний полігон знаходиться в центральній частині першої тераси р. Прип'ять. Його висота над рівнем моря (за Балтійською системою висот – БСВ) становить 112-115 м. Верхня частина геологічного розрізу складається з кількох шарів піщаних відкладів: техногенні відклади (переміщені при дезактивації ґрунти); відклади верхньоплейстоценового і голоценового віку еолового й алювіального генезисів. Загальна потужність піщаних відкладів сягає 25-30 м. Нижче залягають мергелі (карбонатні глини) київської світи еоцену [Matoshko et al., 2004].

Зона аерації експериментального полігону представлена техногенними ґрунтами (до глибини 0,5 м) й однорідними мілкозернистими кварцовими пісками еолового генезису. Перший від поверхні безнапірний (ґрунтовий) водоносний горизонт розташований у відкладах еолового й алювіального генезисів. Територія експериментального полігону являє собою область його живлення за рахунок атмосферних опадів. Коефіцієнт фільтрації еолових пісків становить приблизно 3-5 м/добу. Глибина до РГВ на ділянці моніторингу зони аерації протягом 2000-2012 рр. коливалася в межах від 2 до 3,7 м. РГВ швидко реагує на опади, досягаючи максимуму через кілька днів після

них. Максимальні рівні звичайно спостерігаються в травні, після весняного сніготанення та дощів, потім до середини осені відбувається зниження РГВ [Бугай та ін., 2007].

## 1.2. Характеристика обладнання

На експериментальному полігоні в 2000 р. була створена комплексна система гідрогеологічного моніторингу, яка включала автоматичну метеостанцію, мережу спостережних свердловин і шурф для моніторингу за вологопереносом у зоні аерації [Бугай та ін., 2007]. Зокрема, свердловини для спостережень за РГВ були обладнані автоматичними датчиками тиску води фірми Van Essen Instruments (Нідерланди), що реєстрували значення РГВ 4 рази на добу.

Для спостережень за гідрофізичними характеристиками ґрунтів по глибині зони аерації (вміст вологи, капілярний тиск, температура) протягом 2001-2005 рр. використовувалася станція автоматизованого моніторингу «Шурф», обладнана сучасними датчиками та системами реєстрації даних. За допомогою зазначеного обладнання було одержано детальний масив даних і оцінено режим інфільтраційного потоку вологи в зоні аерації із застосуванням гідрофізичного методу (що передбачає розрахунки потоку вологи на основі закону Дарсі) [Саприкін та ін., 2011].

## 2. Методичні аспекти оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на основі аналізу коливання РГВ

### 2.1. Стандартна схема застосування WTF-методу

Метод розрахунку інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РГВ (або WTF-метод) відноситься до балансових методів. Метод базується на припущенні, що підвищення РГВ відбувається внаслідок вертикального надходження вологи з поверхні землі. Інфільтраційне живлення ( $w$ ) за період часу  $t$  розраховується за загальною формулою (рис. 1, А):

$$w = \mu (\Delta h + \Delta z) / \Delta t, \quad (1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт водовіддачі ґрунту;  $\Delta L = \Delta h + \Delta z$  – інтегральний підйом РГВ за період  $t$  (м), причому  $h$  – різниця між максимальним значенням РГВ, досягнутим внаслідок надходження інфільтраційної во-

логи (точка С гідрографа РГВ, рис. 1, А) і значенням РГВ до початку підвищення (точка В);  $z$  – різниця між значенням РГВ до початку підвищення (точка В) та екстрапольованим значенням РГВ (точка ), до якого б знизився РГВ за час  $t$  у разі відсутності інфільтрації. Значення  $z$  (точка D, рис. 1, А) визначається графічно шляхом екстраполяції рецесії гідрографа свердловини. Згідно з літературними джерелами [Біндеман, 1963; Nealy, Cook, 2002 та ін.], для того, щоб визначити  $z$ , потрібно графічно екстрапольовати останній відрізок графіку зниження РГВ, що передує наступному підвищенню (від точки А до точки В, на рис. 1, А). Нижче (розд. 2.2) ми покажемо, що до процедури оцінки швидкості рецесії РГВ і відповідної екстраполяції гідрографа в загальному випадку треба ставитись прискіпливіше, враховуючи, зокрема, відомості про попередні атмосферні опади.

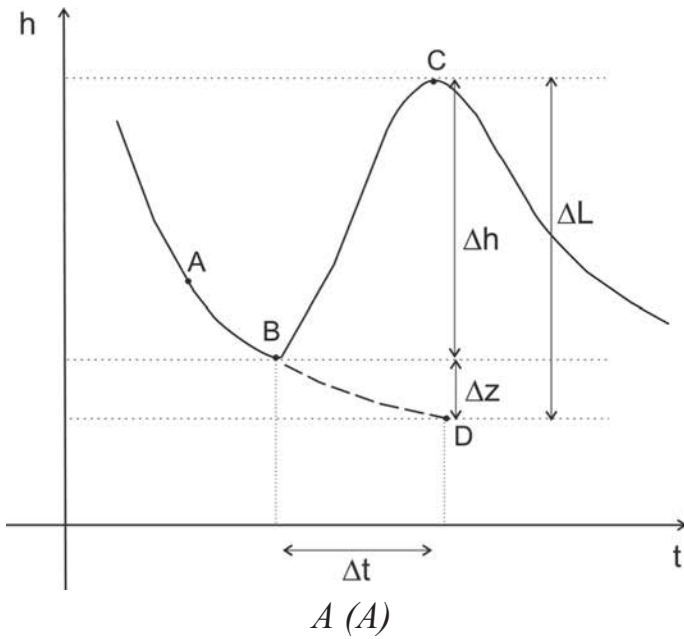
Нагадаємо, що застосування WTF-методу потребує також визначення величини коефіцієнта водовіддачі ґрунту  $\mu$ . Коефіцієнт  $\mu$  є емпіричним параметром, що характеризує баланс вологи в порах ґрунту в зоні коливань РГВ. Питання оцінки коефіцієнта  $\mu$  розглядається у розд. 3.

Зазначимо, що РГВ у свердловині є результатом інтегрального впливу складових водного балансу для території площею від десятків до тисяч квадратних метрів (в залежності від фільтраційних властивостей порід). Таким чином, WTF-метод є методом інтегральної (по площі) оцінки інфільтраційного живлення, на відміну від методів, які базуються на оцінюванні інфільтраційного потоку в конкретному ґрунтовому профілі (таких як, наприклад, гідрофізичний метод [Саприкін та ін., 2011]).

### 2.2. Вдосконалений варіант оцінки швидкості рецесії РГВ при застосуванні WTF-методу

Як вже зазначалося, в рамках досліджень на експериментальному полігоні ІГН в ПТЛРВ «Рудий ліс» було виконано комплексний аналіз даних моніторингу РГВ, метеоданих, а також одержаних у результаті застосування гідрофізичного методу даних про інфільтраційний потік вологи в зоні аерації [Саприкін та ін., 2011]. Як приклад на рис. 1, Б представлені дані цих спостережень



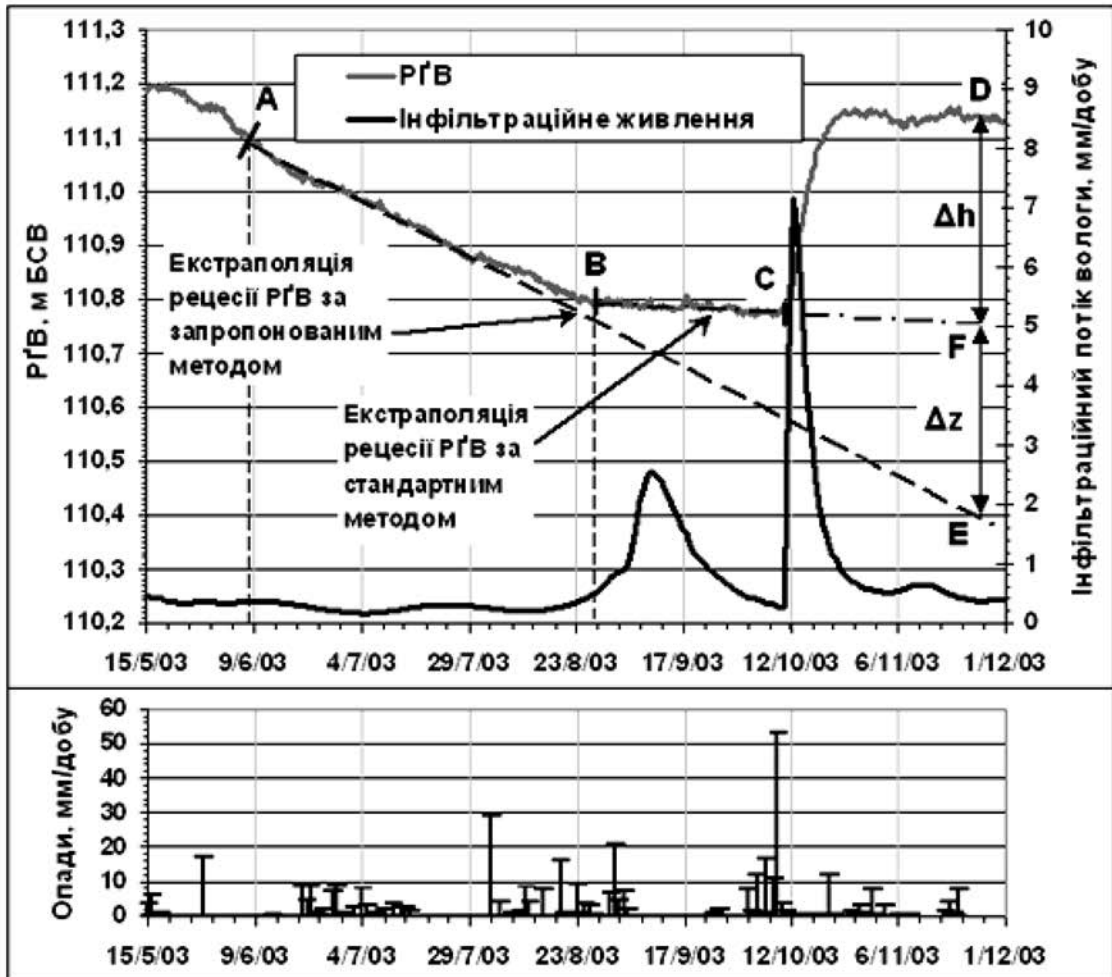


**Рис. 1.** Схеми оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РГВ

A – загальна схема WTF-методу [Healy, Cook, 2002]; B – приклад застосування модифікованого WTF-методу для розрахунку інфільтраційного живлення ґрунтових вод полігону, розташованого в ПТЛРВ «Рудий ліс» для одного з періодів інфільтрації опадів (травень – листопад 2003 р.)

**Fig. 1.** Schemes of groundwater recharge estimation using water table fluctuations analysis

A – general scheme of WTF-method [Healy, Cook, 2002]; B – example of modified WTF-method application to estimation of groundwater recharge at «Red Forest» experimental site for one of periods of rainfall infiltration (May – November 2003)



у вигляді графіків за період з травня по листопад 2003 р. Вверху зображено комбінований графік коливання РГВ (ліва вісь ординат, м БСВ) і графік інтенсивності інфільтраційного потоку в зоні аерації на глибині 1,5 м (права вісь ординат, мм/добу). Внизу подано графік атмосферних опадів.

На рис. 1, Б видно, що з травня по липень 2003 р. відбувалася стійка рецесія (зниження) РГВ (відрізок «точка А – точка В» гідрографа, рис. 1, Б): кількість опадів в цей період була незначною та витрачалася на евапотранспірацію; інфільтраційний потік був дуже малим і становив десять частки мм/добу (рис. 1, Б). Дощі, що випали в серпні – вересні (інтенсивність кількох дощів понад 20 мм/добу), спричинили перший пік інфільтраційного потоку (до 3 мм/добу), і швидкість рецесії РГВ суттєво зменшилася (відрізок «точка В – точка С» гідрографа). Серія великих дощів (понад 50 мм/добу) на початку жовтня 2003 р. викликала інтенсивну інфільтрацію (до 7 мм/добу) і суттєве (до 35 см) зростання РГВ (відрізок «точка С – точка D» гідрографа).

Очевидно, що для коректної оцінки інфільтраційного живлення для інфільтраційного епізоду, зображеного на рис. 1, Б, екстраполяцію рецесії РГВ для визначення  $Dz$  (формула (1)) потрібно виконувати, виходячи із швидкості рецесії РГВ на відрізку гідрографа свердловини «точка А – точка В». Відповідна графічна побудова на гідрографі свердловини (пунктирна лінія «точка А – точка В – точка Е») представлена на рис. 1, Б.

Якщо використати для екстраполяції гідрографа інтервал безпосередньо перед підвищенням РГВ (в нашому випадку це відрізок «точка В – точка С»), то швидкість рецесії РГВ буде суттєво занижена (пунктирна лінія «точка В – точка С – точка F»). Відповідно, були б занижені оцінки величини  $Dz$  в формулі (1) і результуюча оцінка інфільтраційного живлення.

Таким чином, запропонована авторами модифікована схема застосування WTF-методу полягає в такому:

1. Виконанні сумісного аналізу даних про гідрограф РГВ у спостережній свердловині та даних про атмосферні опади.

2. Для оцінки швидкості рецесії РГВ для графічної екстраполяції гідрографа спостережної свердловини використовуються

часові інтервали, коли певний час відсутні атмосферні опади або їх кількість та частота є незначними і волога з опадів повністю витрачається на евапотранспірацію, не досягаючи РГВ.

Зазначимо, що для піщаних ґрунтів полігону при потужності зони аерації в кілька метрів суттєве зменшення інтенсивності інфільтраційного потоку спостерігається вже через кілька діб після останнього дощу.

Також слід взяти до уваги, що швидкі підвищення і наступні зниження РГВ безпосередньо після великих дощів можуть бути спричинені ефектами, пов'язаними з впливом капілярної кайми, перепадами атмосферного тиску і затисненням у порах ґрунту повітрям (так званий ефект Ліззе) [Nealy, Cook, 2002]. Тому краще не використовувати інтервали гідрографа РГВ одразу після великих опадів для оцінки швидкості рецесії впродовж більш тривалих і менш динамічних наступних інтервалів.

Наостаннє варто зазначити, що характер коливань РГВ у спостережній свердловині може визначатись не тільки вертикальним надходженням вологи до РГВ та латеральним відтоком води через водоносний горизонт, але й впливом інших чинників, зокрема змінами величини регіонального гідравлічного градієнта в водоносному горизонті, змінами рівнів регіональних дрен (річок, струмків), змінами випаровування та транспірації рослинами та ін. Тому чинники, що впливають на рецесію РГВ, в кожному конкретному випадку є специфічними для відповідних гідрогеологічних умов і вимагають детального дослідження і врахування при аналізі даних спостережень.

### **3. Методика визначення коефіцієнта водовіддачі ґрунтів зони аерації**

Для оцінки інфільтраційного живлення за допомогою WTF-методу необхідно знати коефіцієнт водовіддачі ґрунтів ( $\mu$ ), які потрапляють в зону коливання РГВ. Величина цього емпіричного коефіцієнта суттєво впливає на результати розрахунків.

Розглянемо узагальнений епізод атмосферних опадів (якому відповідає шар води  $P$ ), що викликає інтегральне підвищення РГВ  $\Delta L = \Delta h + \Delta z$ , тобто підвищення РГВ розраховується з урахуванням рецесії РГВ (рис. 1, А).

Враховуючи, що частина атмосферних опадів витрачається на евапотранспірацію (включаючи перехоплення поверхнею рослин, тощо), можна записати таке балансне рівняння:

$$P = w + Tr; \quad (2)$$

де  $P$  – величина дощу (шар води, мм);  $w$  – інфільтраційне живлення, що спричинив дощ (шар води, який досяг РГВ, мм);  $Tr$  – величина евапотранспірації (мм).

Підставивши в рівняння (2) формулу (1) для  $w$ , маємо:

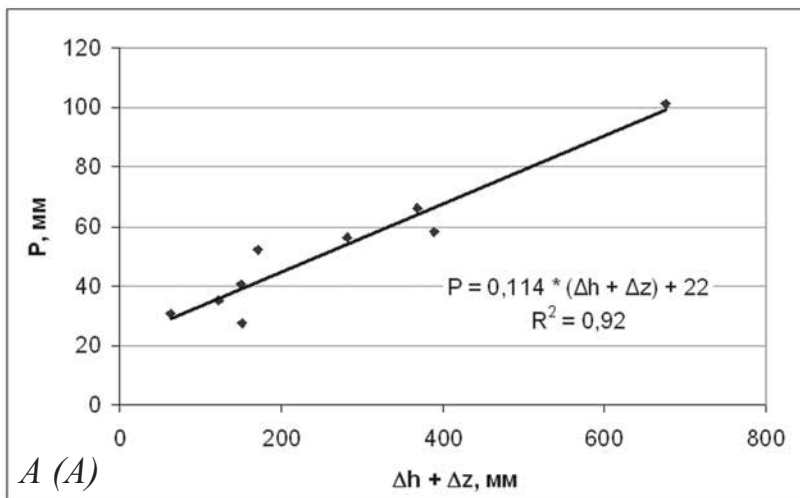
$$P = \mu (\Delta h + \Delta z) + Tr. \quad (3)$$

Зазначимо, що величина евапотранспірації  $Tr$  залежить головним чином від температури повітря; до другорядних чинників належать попередні умови зволоження поверхні ґрунту, вологість повітря та ін. Для теплого періоду року (весна – літо – осінь), коли температурні коливання не є знач-

ними, коефіцієнт  $Tr$  можна вважати в першому наближенні константою.

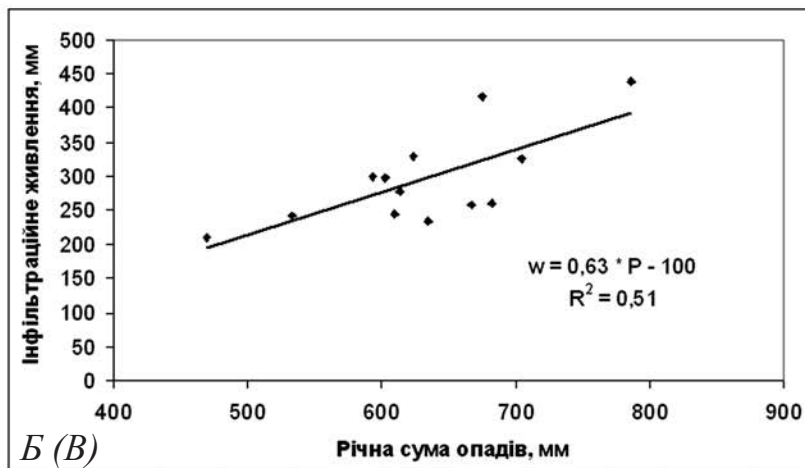
Таким чином, при наявності експериментального набору даних про величини окремих дощів та відповідні інтегральні підвищення РГВ  $\{(P_i, \Delta L_i), i = 1, \dots, N\}$  величини  $\mu$  та  $Tr$  можуть бути емпірично визначені за допомогою лінійної регресії по цьому набору даних. Одержані у такий спосіб значення  $\mu$  та  $Tr$  є усередненими за всім набором даних.

Даний метод оцінки  $\mu$  було застосовано до експериментального набору даних, одержаних на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс». Результати лінійної регресії представлені на рис. 2, А. Оцінені величини коефіцієнтів становлять:  $\mu = 0,114$  (95%-ий довірчий інтервал дорівнює 0,08-0,14);  $Tr = 22$  мм (95%-ий довірчий інтервал дорівнює 12-32 мм). Відхилення точок у бік від лінійного графіка пояснюється насамперед тим, що величина евапотранспірації для кожного епізоду



**Рис. 2.** Кореляційний аналіз залежностей між параметрами із застосуванням лінійної регресії

А – залежність між кількістю опадів та відповідними інтегральними підвищеннями РГВ (дані спостережень на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» за 2001-2005 рр.); Б – залежність між річною сумою атмосферних опадів й інфільтраційним живленням, оціненим за WTF-методом



**Fig. 2.** Correlation analysis of relationships between parameters using linear regression

A – relationship between precipitation amounts and corresponding integral water table rises (monitoring data from the «Red Forest» experimental site for 2001-2005); B – relationship between the annual amount of precipitation and groundwater recharge values estimated using WTF-method

відрізняється від усередненого значення (22 мм) в залежності від конкретних метеорологічних умов. Одержане значення  $\mu = 0,11$  близьке до мінімального значення для дрібнозернистих пісків (0,1), яке відоме з літератури [Healy, Cook, 2002]. Середнє значення випаровування приблизно 22 мм для окремого дощу також виглядає реалістично, оскільки, згідно з моніторинговими даними, в теплий період року на полігоні волога дощів величиною менше 20 мм, як правило, майже повністю випаровується і не викликає помітної реакції РГВ.

Варто зазначити, що описаний метод оцінки коефіцієнта водовіддачі загалом можна рекомендувати для використання за умови доброго зв'язку режиму РГВ із атмосферними опадами, що зазвичай має місце, коли зона аерації складена добре проникними, зокрема піщаними, ґрунтами.

#### **4. Результати розрахунків інфільтраційного живлення ґрунтових вод на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» за 2000-2012 рр.**

Результати розрахунків інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РГВ на полігоні ІГН НАН України в ПТЛРВ «Рудий ліс» наведено в таблиці. Розрахунки виконувалися за методикою, описаною в розд. 2.2, і використовували оцінену в розд. 3 величину  $\mu = 0,11$ . Приклад розрахунку інфільтраційного живлення в графічному вигляді показано на рис. 1, Б (для періоду 15.05-01.12.2003 р.).

За результатами розрахунків середня величина річного інфільтраційного живлення за 13 років становить 295 мм/рік, або 47% від середньобагаторічної величини опадів (631 мм). Величина річного інфільтраційного живлення змінюється від 210 мм/рік (2002 р.) до 439 мм/рік (2012 р.), або відповідно від 37 до 62% від річної кількості опадів.

На рис. 2, Б представлені результати кореляційного аналізу із застосуванням лінійної регресії залежності між річною сумою атмосферних опадів і оціненими величинами інфільтраційного живлення. Спостерігається добре виражена тенденція до зростання інфільтраційного живлення із збільшенням річної суми опадів. На основі ривняння лінійної регресії інфільтра-

ційне живлення може бути наближено оцінене величиною в 63% від річної суми опадів мінус 100 мм (рис. 2, Б).

Зазначимо, що отримані WTF-методом оцінки інфільтраційного живлення для 2001, 2003 та 2004 рр. добре узгоджуються з оцінками гідрофізичним методом (див. таблицю), що свідчить про коректність отриманих оцінок. Нагадаємо, що гідрофізичний метод ґрунтується на прямому розрахунку потоку вологи в зоні аерації на основі закону Дарсі; докладний опис методу наведений в [Саприкін та ін., 2011].

Середньорічні оцінки величини інфільтраційного живлення в період 2000-2012 рр. за WTF-методом ( $w \approx 295$  мм/рік, див. таблицю) є дещо більшими, ніж оцінки на основі датування віку підземних вод і калібруванням моделі фільтрації для досліджуваної території ( $w \approx 200$  мм/рік; в середньому за останні 50 років) [Бугай та ін., 2010]. Різниця в оцінках може бути зумовлена тим, що з початку 50-х років ХХ ст. та до Чорнобильської аварії в межах теперішнього ПТЛРВ «Рудий ліс» існувала стабільна лісова екосистема (сосновий ліс), для якої були характерні більші величини евапотранспірації вологи у порівнянні із умовами станом на 2000-2012 рр.

#### **Висновки**

Нами запропоновано і застосовано на практиці вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РГВ. Зокрема, задіяно відмінний від стандартного підхід до екстраполяції швидкості рецесії РГВ при графічній екстраполяції гідрографа спостережної свертловини, що є важливим розрахунковим етапом WTF-методу. Також запропоновано метод оцінки коефіцієнта водовіддачі піщаних ґрунтів ( $\mu$ ) на основі регресійного визначення коефіцієнтів лінійної залежності між величиною опадів та інтегральним (з урахуванням рецесії) підвищенням РГВ (для відповідного набору експериментальних даних). Для практичного застосування методу, окрім даних про гідрограф РГВ у спостережних свертловинах, важливо мати відомості про величину атмосферних опадів для досліджуваного району (бажано з інтервалом спостережень не менше ніж 1 доба).



**Оцінка інфільтраційного живлення за 2000-2012 рр. на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» в Чорнобильській зоні відчуження методом аналізу коливань РГВ та порівняння з даними гідрофізичного методу**

**Estimation of groundwater recharge at the «Red Forest» experimental site in Chernobyl exclusion zone for 2000-2012 using WTF-method and comparison with results of Darcian flux calculation method**

Рік	Кількість опадів, мм	Інфільтраційне живлення, мм			
		Гідрофізичний метод*	% від опадів	WTF-метод	% від опадів
2000	624	—	—	329	53
2001	668	265	40	257	39
2002	470	—	—	210	45
2003	533	240	45	242	45
2004	675	429	63	417	62
2005	704	—	—	326	46
2006	635	—	—	234	37
2007	682	—	—	259	38
2008	603	—	—	298	49
2009	614	—	—	277	45
2010	593	—	—	300	51
2011	610	—	—	245	40
2012	787	—	—	439	56
Середнє	631	311	49	295	47

\* За даними [Саприкін та ін., 2011].

Розроблені методи було застосовано для аналізу даних моніторингових спостережень за 2000-2012 рр., одержаних на експериментальному полігоні ІГН НАН України в ПТЛРВ «Рудий ліс». Оцінена величина коефіцієнта водовіддачі для піщаних ґрунтів полігону становить  $\mu = 0,11$ . Середня за період спостережень величина інфільтраційного живлення дорівнює 295 мм/рік. На основі аналізу із застосуванням лінійної регресії інфільтраційне живлення може бути наближено оцінене величиною в 63% від річної суми опадів мінус 100 мм.

Коректність отриманих оцінок підтверджується їх узгодженістю із результатами застосування гідрофізичного методу.

Запропонована процедура застосування WTF-методу може бути використана при визначенні інфільтраційного живлення в аналогічних гідрогеологічних і кліматичних умовах. Важливо відмітити, що достовір-

ність результатів застосування методу залежить від детальності наборів даних, які використовуються для аналізу. Бажано, щоб для аналізу застосовувалися дані спостережень за гідрогеологічними і метеорологічними параметрами, які проводились не рідше ніж раз на добу.

Представлені в цій статті результати досліджень одержані авторами в рамках міжнародних радіоекологічних науково-дослідних проектів «Чорнобильський пілотний майданчик» (Chernobyl Pilot Site Project, 1999-2003) й «Експериментальна платформа в Чорнобилі» (Experimental Platform in Chernobyl, 2004-2011), що виконувалися протягом 2000-2011 рр. під егідою партнерської програми Українського науково-технологічного центру і за фінансової підтримки Інституту радіаційного захисту і ядерної безпеки (IRSN, Франція), а також в межах бюджетної теми Національної академії наук України III-11-06.

## Список літератури / References

1. Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод: методическое руководство. Москва: Госгеолтехиздат, 1963. 203 с.
1. Bindeman N.N., 1963. Estimation of exploitation reserves of groundwater: methodical guide. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 203 p. (in Russian).
2. Бугай Д.О., Девієр Л., Скальський О.С., Джепо С.П., Кашпаров В.О., Ардуа К., Ван Меєр Н., Кубко Ю.І., Ткаченко Є.Ю. Дослідження міграції радіонуклідів на експериментальній ділянці-полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс». Ч. 2: Міграція радіонуклідів в геологічному середовищі. *Чорнобил. наук. вісн.* 2007. № 2 (30). С. 16-33.
2. Bugai D.O., Dewiere L., Skalskyi O.S., Dzhepo S.P., Kashparov V.O., Ardois C., Van Meir N., Kubko Y.I., Tkachenko E.Y., 2007. Studies of radionuclide migration at the experimental polygon in the "Red Forest" waste dump area. Part 2. Radionuclide migration in the geological environment. *Chornobyl'skiy naukovyy visnyk*, № 2 (30), p. 16-33 (in Ukrainian).
3. Бугай Д.А., Фурре Э., Жан-Баптист П., Дапонья А., Бомьер Д., Ле Галь Ла Саль К., Ланселот Ж., Скальський А.С., Ван Меєр Н. Оценка водообмена подземных вод в ближней зоне ЧАЭС на основе данных изотопного датирования и гидрогеологического моделирования. *Геол. журн.* 2010. № 4 (333). С. 119-124.
3. Bugai D.A., Furre E., Jean-Baptiste P., Dapogny A., Baumier D., le Gal la Salle K., Lancelot J., Skalskyi A.S., van Meir N., 2010. Estimation of groundwater exchange at Chernobyl site using the data of the isotope dating and hydrogeological modeling. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (333), p. 119-124 (in Russian).
4. Саприкін В.Ю., Бугай Д.О., Скальський О.С., Джепо С.П., Ван Меєр Н., Кубко Ю.І., Сімонуччі К. Режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод на ділянці чорнобильського «Рудого лісу». *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України.* 2011. Вип. 4. С. 141-151.
4. Saprykin V., Bugai D.O., Skalskyi O.S., Dzhepo S.P., Van Meir N., Kubko Yu., Simonucci C., 2011. The infiltration recharge regime to groundwater at the Chernobyl «Red Forest» site. *Zbirnyk naukovykh prats' Instytutu Geologichnykh Nauk NAN Ukrainy*, vol. 4, p. 141-151 (in Ukrainian).
5. Healy Richard W., Cook Peter G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal.* 2002. № 10. P. 91-109.
5. Healy Richard W., Cook Peter G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, № 10, p. 91-109 (in English).
6. Matoshko A., Bugai D., Dewiere L., Skalskyi A. Sedimentological study of the Chernobyl NPP site to schematize radionuclide migration conditions. *Environmental Geology.* 2004. Vol. 46. P. 820-830.
6. Matoshko A., Bugai D., Dewiere L., Skalskyi A., 2004. Sedimentological study of the Chernobyl NPP site to schematize radionuclide migration conditions. *Environmental Geology*, vol. 46, p. 820-830 (in English).
7. Meinzer O.E. The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles. *US Geol Surv Water-Supply Pap.* 1923. Vol. 489. 321 p.
7. Meinzer O.E., 1923. The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles. *US Geol Surv Water-Supply Pap.*, vol. 489, 321 p. (in English).

Стаття надійшла  
27.05.2014