

**В. Ю. Саприкін<sup>1</sup>, Д. О. Бугай<sup>1</sup>, О. С. Скальський<sup>1</sup>, С. П. Джепо<sup>1</sup>, Н. Ван Меєр<sup>2</sup>, Ю. І. Кубко<sup>1</sup>, К. Сімонуччі<sup>2</sup>**

## **РЕЖИМ ІНФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ДІЛЯНЦІ ЧОРНОБИЛЬСЬКОГО «РУДОГО ЛІСУ»**

**V. Saprykin, D. A. Bugai, A. S. Skalskyy, S. P. Dzhepo, N. Van Meir, Yu. Kubko, C. Simonucci**

## **THE INFILTRATION RECHARGE REGIME TO GROUNDWATER AT THE CHERNOBYL «RED FOREST» SITE**

Описана методика та результати дослідження режиму інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту на експериментальному полігоні, розташованому на ділянці поховання радіоактивних відходів у «Рудому лісі» на відстані 2 км від ЧАЕС. Застосовується гідрофізичний метод, який базується на законі Дарсі і використовує дані автоматизованих спостережень за вмістом вологи та всмоктуючим тиском у піщаних ґрунтах зони аерації потужністю 2,5–3 м. Величина інфільтраційного живлення для періоду 2001–2004 рр. становила в середньому 311 мм/рік (або 49% кількості опадів). Розмір інфільтрації та її розподіл упродовж року суттєво відрізнялися для кожного року в залежності від погодних умов. Одержані результати узгоджуються з іншими методами оцінки інфільтраційного живлення (метод аналізу гідрографу свердловин, ізотопні датування віку підземних вод).

*Ключові слова:* зона відчуження, вологоперенесення, зона аерації, моніторинг.

Описана методика и результаты исследований режима инфильтрационного питания ґрунтового водоносного горизонта на экспериментальном полигоне, размещенном на участке захоронения радиоактивных отходов в «Рыжем лесу» на расстоянии 2 км от ЧАЭС. Применяется гидрофизический метод, который базируется на законе Дарси и использует данные автоматизированных наблюдений за содержанием влаги и всасывающим давлением в песчаных грунтах зоны аэрации мощностью 2,5–3 м. Величина инфильтрационного питания для периода 2001–2004 гг. составила в среднем 311 мм/год (или 49% количества осадков). Размер инфильтрации и ее распределение на протяжении года существенно отличались для каждого года в зависимости от погодных условий. Полученные результаты согласуются с другими методами оценки инфильтрационного питания (метод анализа гидрографа скважин, изотопные датирования возраста подземных вод).

*Ключевые слова:* зона отчуждения, влагоперенос, зона аэрации, мониторинг.

The methodology and results are presented of the infiltration recharge regime analyses for the unconfined aquifer at experimental site, situated in the Chernobyl exclusion zone in the «Red Forest» radioactive waste dump site at 2 km distance from the Chernobyl nuclear power plant. The Darcian flux calculations method is applied, which uses data of automated observations of soil moisture content and suction pressure in the 2,5–3 m deep unsaturated zone which composed of sandy soil. The infiltration recharge rate determined for the period 2001–2004 years is on average 311 mm/year (or 49% of annual precipitations). The amount of recharge and its distribution throughout the year was specific for each particular year, depending on weather conditions. The obtained results are in a good agreement with alternative methods of recharge rate estimation (such as water table fluctuation method, and isotope dating of groundwater age).

*Keywords:* exclusion zone, water flow, unsaturated zone, monitoring.

### **ВСТУП**

Представлена стаття продовжує серію публікацій [1, 2, 4, 6, 7, 9], що висвітлюють результати міжнародних радіоекологічних науково-дослідних проєктів «Чорнобильський пілотний майданчик» (Chernobyl Pilot Site Project, 1999–2003) та «Експериментальна платформа в Чорнобилі» (Experimental Platform in Chernobyl, 2004–2008), які виконувалися протягом 2000–2008 рр. Інститутом геологічних наук НАН України у співпраці з Інститутом радіаційного захисту і ядерної безпеки (IRSN, Франція). В рамках зазначених досліджень в 1999–2000 рр. у Чорнобильській зоні відчуження на ділянці по-

хованого радіоактивного «Рудого лісу» (соснового лісу, що загинув від радіації в 1986 р.) на відстані 2,5 км від ЧАЕС було організовано експериментальний полігон для комплексних гідрогеологічних і радіоекологічних досліджень. У наступний період на полігоні виконувалися моніторингові спостереження за метеорологічними, гідрогеологічними, геохімічними і біогенними процесами та обумовленою ними міграцією радіонуклідів у природно-техногенній екосистемі поховань радіоактивних відходів (ПВ) «Рудого лісу» [1, 6]. З цією метою на полігоні були обладнані автоматизовані системи спостережень за метеорологічними параметрами і гідрофі-

зичними характеристиками гідрогеологічного середовища на основі сучасних електронних датчиків і систем реєстрації даних.

Вивчення процесів інфільтраційного живлення першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту (грунтових вод) було одним із пріоритетних напрямів досліджень, оскільки інфільтрація порових розчинів із джерела забруднення (розташовані в зоні аерації радіоактивно-забруднені ґрунти) являла собою основний чинник міграції радіонуклідів за межі поховань РАВ у геологічне середовище і підземні води.

Протягом 2000–2004 рр. на полігоні працювала автоматизована станція моніторингу за процесами вологоперенесення в зоні аерації «Шурф», за допомогою якої було зібрано унікальний за детальністю набір моніторингових даних. Це дозволило застосувати нові методичні підходи до оцінки *in situ* гідрофізичних характеристик ґрунтів (залежність між вмістом вологи і всмоктуючим тиском ґрунтів, коефіцієнт вологоперенесення) і для інтерпретації даних режимних спостережень із застосуванням гідрофізичного методу (метод розроблено А.Б. Ситніковим, С.П. Джепо та ін. [3, 5, 10]). В результаті одержані дані про особливості режиму інфільтраційного живлення ґрунтових вод в Прип'ятському Поліссі в умовах зони аерації невеликої потужності (2,5–3 м), складеної високопроникними піщаними ґрунтами за відсутності розвиненого рослинного покриву.

Метою цієї статті є опис методики польових моніторингових досліджень, методичних особливостей застосування гідрофізичного методу, а також аналіз й інтерпретація отриманих даних про режим інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту на ділянці «Рудого лісу».

## **1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **1.1. Характеристика експериментального полігону**

Полігон розташований в 2,5 км на південний захід від 4-го блока ЧАЕС в межах західного сліду радіоактивного викиду в чорнобильському «Рудому лісі». Після аварії на Чорнобильській АЕС сосновий ліс, який знаходився на цій території, загинув від високих рівнів радіоактивного опромінення. У 1987 р., з метою уникнення подальшого вітрового перенесення радіонуклідів і зниження рівнів опромінення, ліс (дерева, підстилка, верхній шар ґрунту) було захоронено

в траншеї і бурти та засипано незабрудненим піщаним ґрунтом. Спеціальних інженерних заходів щодо захисту геологічного середовища від поширення радіонуклідів не було проведено, через що траншеї перетворилися на джерела радіаційного забруднення гідрогеологічного середовища. В 1988–1989 рр. на території, що була дезактивована, виконано лісопосадки з метою запобігання водної та вітрової ерозії ґрунтової поверхні. Станом на 2000 р. середня щільність посадок сосни в межах полігону становила 3300 дерев/га.

Експериментальний полігон знаходиться в центральній частині Українського Полісся, що входить до Поліської фізико-географічної області. Територія полігону відноситься до зони помірно-континентального клімату з позитивним балансом вологи (тобто річна кількість опадів більше величини випаровування). Характерними є м'яка зима, тепле та вологе літо. Середньорічна сума опадів становить приблизно 604 мм, на теплий період припадає 393 мм (найбільша кількість випадає влітку), на холодний — 211 мм (найменша кількість випадає взимку). В окремі роки протягом літніх місяців може випадати чотири місячні норми. Середнє річне випаровування з поверхні землі становить 524 мм, відносна вологість повітря — 77%. Середня температура літнього сезону — приблизно +18° С, осіннього — +7,5°, зимового — -4,6°, весняного — +7,8°. Глибина поширення температури 0° С в ґрунт взимку коливається від 26 до 70 см (за даними Чорнобильської метеостанції).

У геоморфологічному відношенні експериментальний полігон знаходиться в центральній частині першої тераси р. Прип'ять. Його висота над рівнем моря становить 112–115 м за Балтійською системою висот. Верхня частина геологічного розрізу складається з кількох шарів піщаних відкладів: техногенні відклади (переміщені при дезактивації піщані ґрунти, будівельне сміття тощо); відклади верхньоплейстоценового і голоценового віку еолового (верхня частина розрізу) й алювіального генезису. Загальна потужність піщаних відкладів сягає 25–30 м. Нижче залягають мергелі (карбонатні глини) київської світи еоцену.

Верхня частина зони аерації (до 0,5 м) представлена техногенними ґрунтами, залишками гумусованого шару (на глибині 0,5–0,6 м), нижня частина (до рівня ґрунтових вод — РГВ) складається з відносно однорідних дрібнозер-

нистих кварцових пісків еолового генезису. Їх характеризує такий типовий гранулометричний склад: процентний вміст (ваговий) фракції розміром 2,5–1,6 мм становить 0,03%; 1,6–1,0 мм — 0,09%; 1,0–0,65 мм — 1,02%; 0,65–0,4 мм — 4,16%; 0,4–0,315 мм — 14,07%; 0,315–0,2 мм — 49,58%; 0,2–0,16 мм — 17,42%; 0,16–0,1 мм — 8,98%; 0,1–0,065 мм — 4,55%; 0,065–0,05 мм — 0,03%; <0,05 мм — 0,06% [9].

Перший від поверхні безнапірний (грунтовий) водоносний горизонт розташований у відкладах еолового й алювіального генезису. Територія експериментального полігону являє собою область його живлення. Джерело живлення — атмосферні опади. Коефіцієнт фільтрації еолових пісків становить приблизно 3–5 м/добу [1]. Глибина до РҐВ на ділянці моніторингу зони аерації протягом 2001–2004 рр. коливалася в межах від 2,3 до 3,9 м (рис. 1; 2, а). РҐВ швидко реагує на опади, досягаючи максимуму через кілька днів після них. Максимальні рівні звичайно спостерігаються в трав-

ні, після весняного сніготанення та дощів, потім відбувається зниження рівня до середини осені. Далі зазвичай спостерігається стабілізація та поступове підвищення РҐВ. Водоносний горизонт підстиляється слабопроникними мергелями еоценового віку, які є регіональним водотривом.

## 1.2. Методика натурних спостережень за режимом руху вологи в зоні аерації

На експериментальному полігоні в 2000 р. була створена комплексна система гідрогеологічного моніторингу, яка включала автоматичну метеостанцію, мережу спостережних свердловин, обладнаних автоматичними датчиками тиску, шурф для моніторингу за вологоперенесенням у зоні аерації [1].

Глибина шурфу становила 1,8 м (рис. 1). При спорудженні й обладнанні шурфу використано досвід авторів статті з натурних досліджень режиму зони аерації в умовах Полісся [3]. На відміну від попередніх досліджень, при обладнанні станції моніторингу «Шурф» було використано

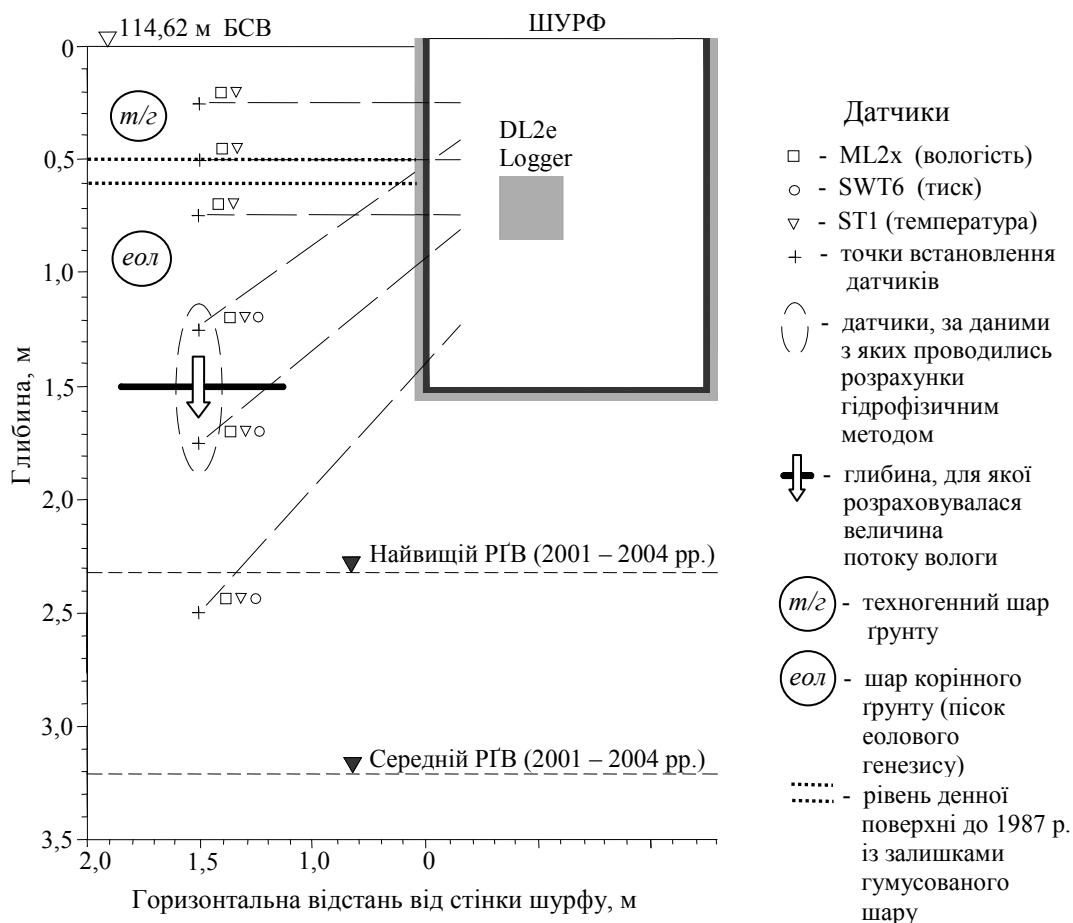


Рис 1. Схема шурфу для моніторингу процесу вологоперенесення в зоні аерації (вертикальний розріз ґрунту)

сучасні електронні датчики для вимірювання гідрофізичних характеристик ґрунтів і систему автоматичної реєстрації даних. Це дозволило одержати значно детальніший масив даних про режим зони аерації і застосувати нові підходи до їх інтерпретації (зокрема, застосувати для оцінки коефіцієнта вологоперенесення ґрунтів метод миттєвого профілювання запасу вологи в ґрунтовому профілі (див. розд. 1.4)).

В шурфі датчики були встановлені в ґрунтовий профіль горизонтально або під кутом 45° (для нижніх датчиків). Такий спосіб має переваги над вертикальним розміщенням, оскільки профіль ґрунту над датчиками в цьому випадку не зазнає порушень. Вміст вологи в ґрунтах вимірювався на глибинах 0,25 м, 0,5 м, 0,75 м, 1,25 м, 1,75 м і 2,5 м, а всмоктуючий тиск порової вологи — 1,25 м, 1,75 м, 2,5 м. Також вимірювалася температура ґрунтів. Дані спостережень накопичувались електронним реєстратором даних Datalogger DL2e (виробництво Delta-T Devices Ltd., Великобританія). Заміри характеристик виконувались із періодичністю 4–24 години.

Для вимірювання всмоктуючого тиску порової вологи використовувалися електронні тензіометри моделі SWT6 з п'єзOMETричними датчиками тиску (виробництво UMS, Німеччина). Вміст вологи в ґрунті вимірювався датчиками Theta Probe ML2x (виробництво Delta-T Devices Ltd., Великобританія). Принцип дії датчиків ML2x ґрунтується на вимірюванні діелектричної константи ґрунту, що, в свою чергу, залежить від вмісту вологи [13]. За умов калібрування точність вимірювань ML2x становить близько 1% об'ємного вмісту вологи в ґрунті. Температура ґрунту вимірювалася датчиками ST1 (Delta-T Devices Ltd., Великобританія).

Зазначимо, що поверхня ґрунту над профілем, де були встановлені датчики, не мала розлиного покриття.

На експериментальному полігоні також виконувалися регулярні метеорологічні спостереження із використанням автоматичної метеостанції WS-STD1 (Delta-T Devices Ltd., Великобританія), що реєструвала температуру і вологість повітря, кількість сонячної радіації, кількість опадів і швидкість вітру.

### 1.3. Гідрофізичний метод оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод

Для оцінки інфільтраційного живлення використано гідрофізичний метод, розроблений

в роботах [5, 10] (в іноземній літературі метод має назву Darcian flux calculations).

Суть методу полягає в розрахунку величини потоку вологи в зоні аерації із використанням закону Дарсі для ненасичених умов на основі вимірювань градієнта гідравлічного напору в вертикальному профілі ґрунту. Метод також передбачає попереднє визначення коефіцієнта вологоперенесення (як функції всмоктуючого тиску або вмісту вологи в ґрунті). Метод успішно застосовувався у дослідженнях А. Б. Ситнікова, С. П. Джепо та ін. [3, 5, 10].

Розрахункова формула методу, що використовує режимні дані про вертикальний розподіл всмоктуючого тиску в ґрунтовому профілі, має такий вигляд:

$$\varepsilon(t) = -K(\psi_{i+1/2})(H_{i+1}(t)) / \Delta Z_i, \quad (1)$$

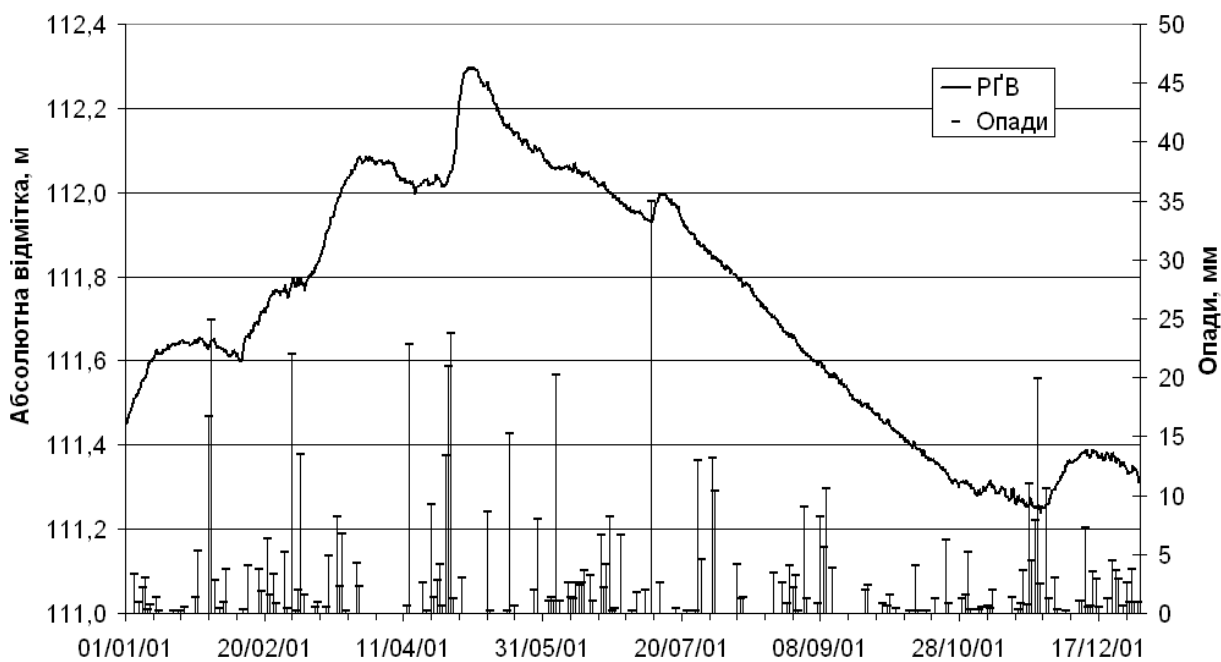
де  $\varepsilon$  — величина потоку вологи, м/добу;  $K(\psi_{i+1/2})$  — коефіцієнт вологоперенесення, м/добу (що залежить від величини всмоктуючого тиску  $\psi_{i+1/2}$ , м);  $H_i(t) = Z_i - \psi_i(t)$  — гідравлічний напір на відмітці „i” (розрахункова точка), м;  $\psi_{i+1/2} = 0,5(\psi_{i+1} + \psi_i)$ , де  $\psi_i(t)$  — всмоктуючий тиск у точці „i” (згідно з даними режимних спостережень);  $\Delta Z_i = Z_{i+1} - Z_i$  — відстань між точками заміру напорів, м (де  $Z_i$  — абсолютна відмітка точки встановлення тензіометра „i”, м).

Сумарне інфільтраційне живлення отримується інтегруванням потоку за певний період часу. Використання формули (1) вимагає попереднього визначення залежності коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску.

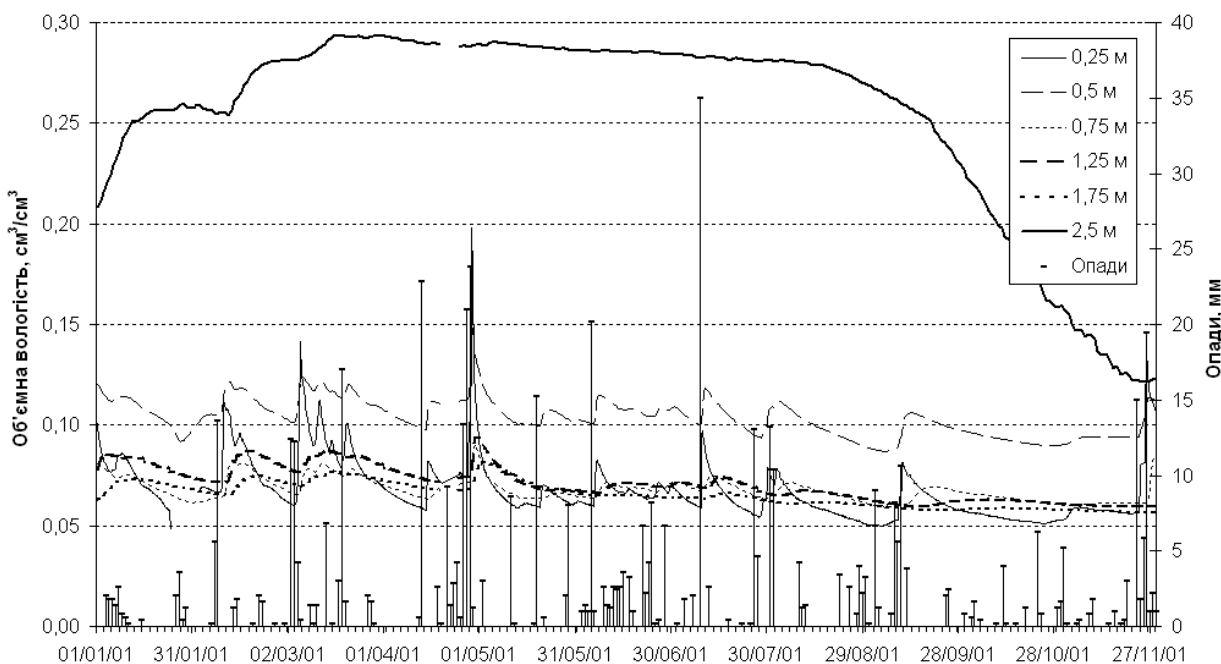
### 1.4. Визначення коефіцієнта вологоперенесення методом миттєвого профілювання балансу вологи в ґрунтовому профілі

Визначення коефіцієнта вологоперенесення піщаних ґрунтів ( $K(\psi)$ ), який є різко нелінійною функцією всмоктуючого тиску, являє собою складну методичну проблему [7]. Раніше при використанні гідрофізичного методу застосовувалися дані визначення  $K(\psi)$  в лабораторних експериментах на ґрунтових колонках [3, 5]. Недоліком лабораторних визначень є їх методична складність, трудомісткість, чутливість результатів до можливих порушень природної структури ґрунтів та ін.

Нами для розрахунків коефіцієнта вологоперенесення застосовано оригінальний підхід на основі методу миттєвого профілювання балансу вологи [12] із використанням даних режим-



а) Режим РГВ



б) Режим вмісту води на різних глибинах ґрунтового профілю на станції моніторингу «Шурф»

Рис. 2. Дані автоматизованих моніторингових спостережень за гідрофізичними характеристиками ґрунтів зони аерації на полігоні в «Рудому лісі» в 2001 р.



них спостережень, одержаних за допомогою станції «Шурф» [4].

Принцип методу миттєвого профілювання балансу вологи полягає в оцінці коефіцієнта вологоперенесення на основі замірів швидкості зменшення запасів вологи в шарі ґрунту після його насичення водою (внаслідок гравітаційного стікання). Це дозволяє визначити витрати води в конкретному ґрунтовому перерізі. Величина витрат співвідноситься із значеннями всмоктуючих тисків, що також одночасно вимірюються в ґрунтовому профілі [12].

Даний метод раніше використовувався в контрольованих лабораторних і польових експериментах [12]. Нами же при застосуванні методу були використані дані режимних спостережень станцією «Шурф» за вмістом вологи в ґрунтовому профілі після сильних дощів у весняні й осінні періоди 2001–2004 рр. При цьому нами обиралися періоди з малою евапотранспірацією, щоб уникнути похибок розрахунку водного балансу ґрунтового профілю, пов'язаних із витратами вологи на випаровування з поверхні ґрунту. Перевагою цього варіанту застосування методу є те, що коефіцієнт вологоперенесення визначається *in situ* в умовах непорушеного ґрунтового профілю в діапазоні значень всмоктуючого тиску (або вмісту вологи в ґрунті), що є характерним для природного режиму зони аерації. Методика і результати застосування методу детально описані в роботі [4].

### 1.5. Аналітичні залежності для гідрофізичних характеристик ґрунтів

При розрахунках для параметризації залежності між всмоктуючим тиском і вмістом вологи в ґрунті нами була використана формула Ван Генухтена [11]:

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

де  $\psi$  — всмоктуючий тиск, см;  $\theta$  — об'ємна вологість ґрунту, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>;  $\theta_r$  — мінімальна вологість;  $\theta_s$  — вологість при повному насиченні ґрунту водою;  $\alpha$ ,  $n$  — параметри рівняння. Параметри  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  були визначені в лабораторних дослідках. Параметри  $\alpha$ ,  $n$  підбиралися по набору визначених в ході режимних спостережень пар значень «вологість ґрунту – всмоктуючий

тиск» із застосуванням методу найменших квадратів.

Для параметризації коефіцієнта вологоперенесення ( $K(\psi)$ ) була використана відома залежність Гарднера:

$$K(\psi) = K_s \exp(-a \psi), \quad (3)$$

де  $K_s$  — коефіцієнт фільтрації при повному насиченні ґрунту водою, м/добу;  $a$  — емпіричний коефіцієнт, см<sup>-1</sup>;  $\psi$  – всмоктуючий тиск, см.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Особливості режиму вологоперенесення в зоні аерації

Нижче проаналізовані дані спостережень за режимом зони аерації, одержані за допомогою станції «Шурф» в 2000–2004 рр. На рис. 2, б зображено режим вмісту вологи в ґрунті на різних глибинах за 2001 р. Зазначимо, що на глибині 0,5–0,6 м фіксується шар гумусованого ґрунту (рис. 1), що не був повністю видалений при дезактивації території «Рудого лісу» в 1987 р. Наявність цього шару пояснює більш високий вміст вологи в ґрунті, характерний для цієї глибини (рис. 2, б).

Загалом, для всього ґрунтового профілю спостерігається тісний зв'язок між режимом вмісту вологи і режимом опадів. Найбільш глибокі (1,75–2,5 м) датчики через 2–7 діб (в залежності від вологості профілю перед дощем) реагують на інтенсивні опади (>30 мм/день). Ґрунтовий профіль за особливостями режиму руху вологи можна поділити на три зони: 1) на глибині до 1 м протягом року відбувається різнонаправлений рух вологи (в вологі періоди — вниз, в сухі періоди — вверх); 2) інтервал глибин від 1 до 2 м характеризується стійким направленим вниз рухом вологи протягом року; 3) інтервалу глибин 2 м і більше тяж властивий різнонаправлений рух (цей інтервал глибин знаходиться в зоні коливань РГВ і впливу капілярної кайми, найчастіше в сухі періоди потік вологи направлений униз, у вологі — вверх).

З урахуванням визначених особливостей режиму руху вологи в зоні аерації для розрахунків режиму інфільтраційного живлення гідрофізичним методом нами використано дані замірів датчиків в інтервалі глибин 1,25–1,75 м.

### 2.2. Гідрофізичні характеристики ґрунтів

Залежності «всмоктуючий тиск – вологість ґрунту» ( $\psi(\theta)$ ) були побудовані із використанням спостережень, одержаних автоматизо-

ваною станцією моніторингу «Шурф» протягом 2000 і 2001 рр., коли вимірювався і всмоктуючий тиск, і вміст вологи в ґрунті. Аналіз виконано для двох глибин встановлення датчиків:  $Z = 1,25$  м і  $Z = 1,75$  м (що використовувалися при розрахунках відповідно до гідрофізичного методу).

Побудовані експериментальні залежності представлені на рис. 3, а. Відповідні коефіцієнти моделі Ван Генухтена (рівняння (2)) такі: для глибини 1,25 м —  $\alpha = 0,046$ ;  $n = 2,14$ ; для глибини 1,75 м —  $\alpha = 0,097$ ,  $n = 1,84$ . Для залишкової вологості ґрунту і вологості при повному насиченні використані значення:  $\theta_r = 0,02$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>,  $\theta_s = 0,024$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>. Останнє значення враховує повітря, защемлене в порах ґрунтів зони аерації.

Зазначимо, що згідно з даними вимірювань вмісту вологи та всмоктуючого тиску, що були зібрані станцією моніторингу «Шурф», на глибинах 1,25–1,75 м не спостерігається гістерезис гідрофізичних характеристик ґрунтів, що обумовлено досить вузьким діапазоном зміни вологості ґрунтів для цих глибин (вологість  $\theta$  не перевищувала 0,1 протягом періоду роботи станції, рис. 2, б).

Заміри вмісту вологи в ґрунтовому профілі станцією моніторингу проводилися в 2000–2004 рр. Регулярні заміри всмоктуючого тиску після 2001 р. припинилися у зв'язку з тим, що використані при обладнанні шурфу тензіометри мають відносно короткий експлуатаційний термін. Але наявність представлених на рис. 3, а функціональних залежностей «всмоктуючий тиск – вологість ґрунту» дозволила реконструювати режим всмоктуючого тиску на глибинах 1,25 і 1,75 м на основі неперервних даних про вміст вологи в ґрунтах.

**Коефіцієнт вологоперенесення ( $K(\psi)$ ).** Описаний в розд. 1.4 метод миттєвого профілювання балансу вологи в ґрунтовому профілі було застосовано для побудови *in situ* залежності  $K(\psi)$  для глибини 1,5 м. При цьому були використані дані моніторингових спостережень за режимом зони аерації на станції «Шурф» в період 2000–2004 рр. Детальний опис методики розрахунків наведено в роботі [4]. Результати застосування методу представлені на рис. 3, б. Відповідні параметри формули Гарднера (рівняння (3)) такі:  $K_s = 3,8$  м/добу;  $a = -0,13$  см<sup>-1</sup>. Зазначимо, що одержане значення параметра  $K_s$  добре узгоджується з незалежними оцінками коефіцієнта фільтрації при

повному насиченні для еолових пісків на полігоні [1].

### 2.3. Режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод

Розрахунки потоку вологи ( $\epsilon$ , мм/добу) із застосуванням формули (1) виконані для умовного розрізу ґрунтового профілю, що відповідає глибині  $Z = 1,5$  м.

Одержані графіки інфільтраційного живлення ґрунтових вод у 2001, 2003 і 2004 рр. представлено на рис. 4. (В 2002 р. станція «Шурф» відносно довго не функціонувала через неполадки з елементами живлення; тому розрахунки для цього року не проводилися.)

Результати розрахунків (рис. 4) свідчать, що інфільтраційне живлення ґрунтових вод не є рівномірно розподіленим впродовж року, а приурочене до певних метеорологічних явищ, таких як весняне сніготанення, зимові відлиги, інтенсивні опади у весняний та осінній період (в деяких випадках літні зливи також призводять до залпових надходжень вологи до водоносного горизонту).

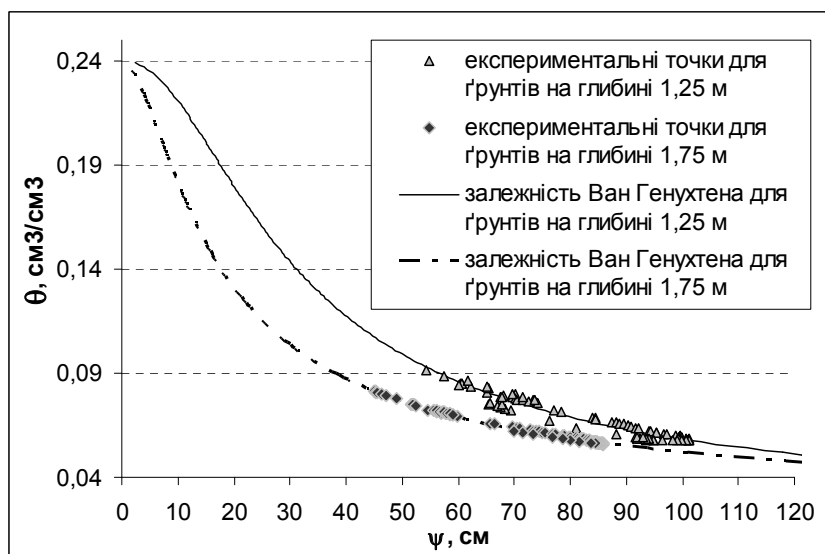
Відповідні «пікові» періоди роблять найбільший внесок у річне інфільтраційне живлення ґрунтового водоносного горизонту. Максимальна величина інфільтраційного живлення для однієї доби становила приблизно 8 мм (на початку сніготанення в лютому 2004 р., рис. 4, в). Для порівняння, впродовж сухих періодів року інфільтраційне живлення зменшується до значень близько 0,1 мм/добу (наприклад, осінній період 2001 р., рис. 4, а).

Величини річного інфільтраційного живлення у 2001, 2003 та 2004 рр. наведені в таблиці. Річне інфільтраційне живлення змінюється в досить широких межах від приблизно 240 до майже 429 мм, що відповідає 40–64% річної кількості опадів. Середнє значення за період становить 311 мм (49% середньорічної кількості опадів).

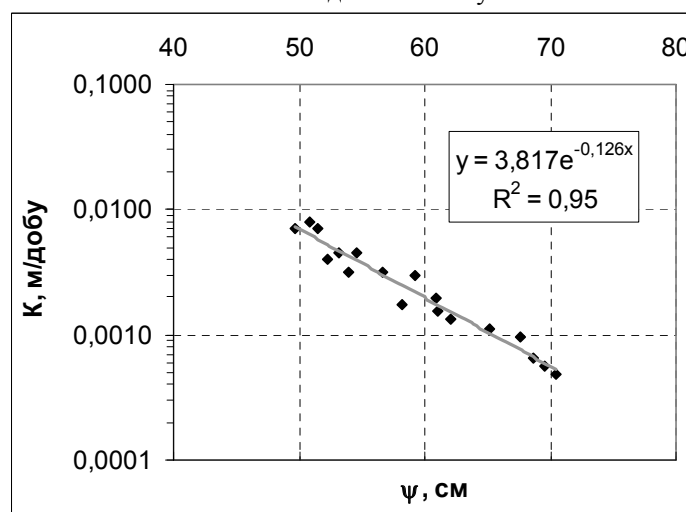
Розподіл інфільтраційного живлення в межах конкретного року має свої особливості (див. таблицю, рис. 4) та залежить від метеорологічних умов. Великий внесок (у 2001 та 2004 рр. найвагоміший внесок) у річне інфільтраційне живлення робить весна, оскільки цього сезону тануть снігові опади, що накопичилися взимку, йдуть дощі, а температурний режим не сприяє випаровуванню. Незважаючи на звичайну для помірно-континентального клімату велику кількість опадів влітку, внесок цього сезону в

річне інфільтраційне живлення незначний через високі температури (і, відповідно, велику інтенсивність випаровування). Проте в 2004 р. велика величина інфільтраційного живлення припала і на літо. Загалом, цього року вона була найбільшою (429 мм) через найбільшу кількість опадів, їх рівномірний розподіл впродовж року (завдяки чому ґрунтовий профіль залишався зволеним) та помірний температурний режим. Для Полісся характерно, що взимку випадає найменше опадів (див. розд. 1), але 2001 та 2004 рр. були винятками, опадів було більше, ніж восени. Відповідно, і величина інфільтраційного живлення (>100 мм), і внесок у річне живлення (>25%) були значними. Час-

тина опадів випадає взимку у вигляді дощів, частина — у вигляді снігу, але потрапляє до зони аерації протягом відлиг, випаровування ж майже відсутнє; через це великий відсоток «зимових» опадів інфільтрується до водоносного горизонту ще взимку. Величина інфільтраційного живлення восени суттєво відрізнялася протягом всіх трьох років. Для 2003 та 2004 рр. вона змінюється (107, 80 мм) пропорційно до зміни кількості «осінніх» опадів (193, 131 мм, відповідно). В 2001 р. осінь характеризувалася більш високими температурами, основна частина опадів припала на останні дні, тому інтенсивна інфільтрація вологи на глибині 1,5 м почала відбуватися вже в зимовий період. Через



а) *In situ* залежності: «всмоктуючий тиск ( $\psi$ ) – вміст вологи ( $\theta$ )» та їх апроксимації за допомогою аналітичної моделі Ван Генухтена



б) Залежність коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску  $K(\psi)$  для ґрунту на глибині 1,5 м та її апроксимація за допомогою аналітичної моделі Гарднера

Рис. 3. Гідрофізичні характеристики еолових пісків, розраховані за даними спостережень на станції моніторингу «Шурф»



**РЕЖИМ ІНФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ДІЛЯНЦІ ЧОРНОБИЛЬСЬКОГО «РУДОГО ЛІСУ»**

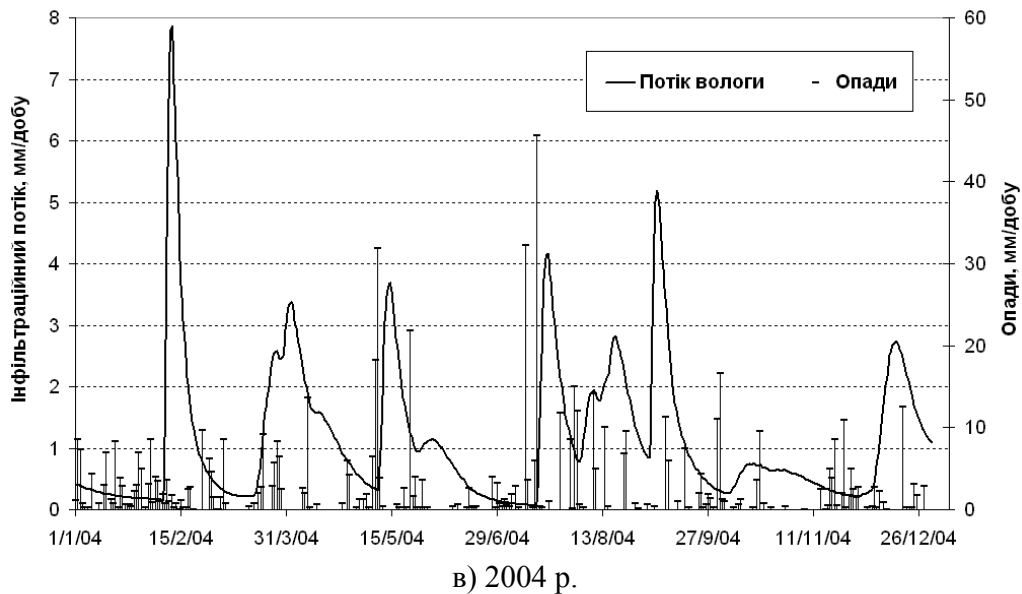
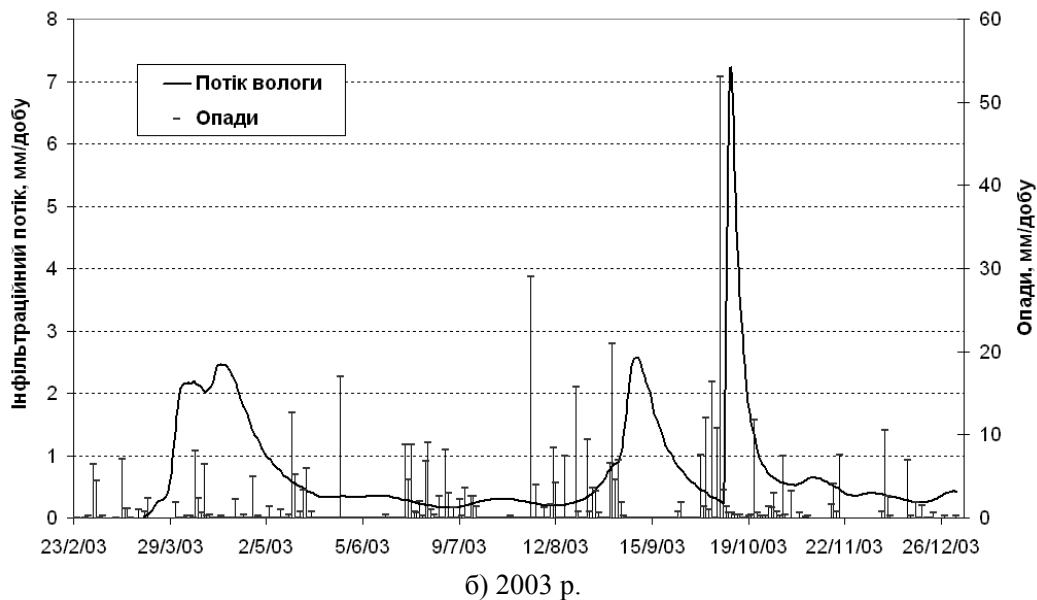
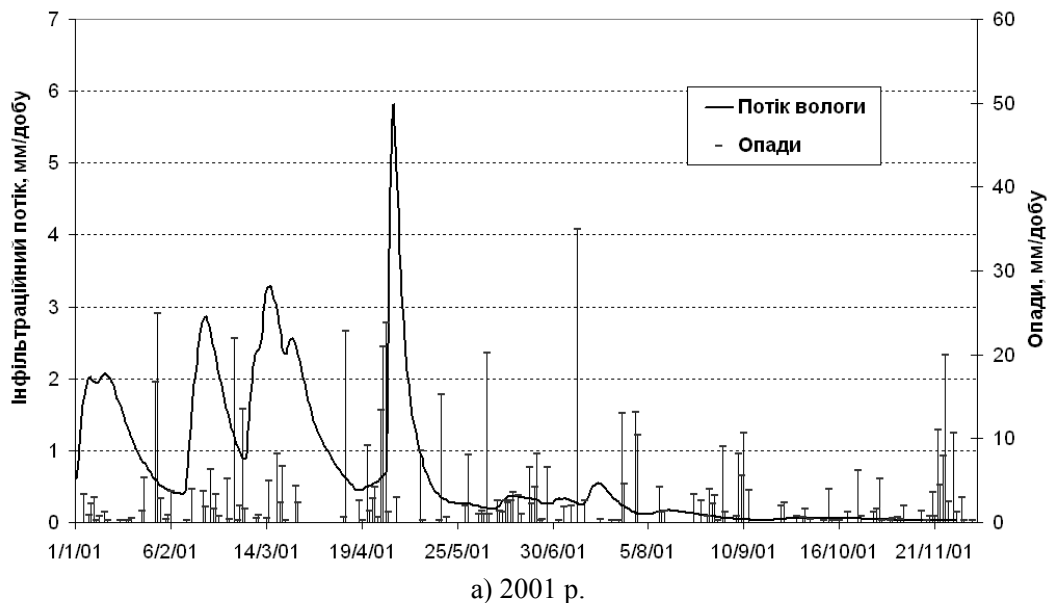


Рис. 4. Режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод на глибині 1,5 м

це, незважаючи на достатньо велику сумарну кількість опадів (136 мм), інфільтраційний потік вологи протягом осені був майже відсутнім.

#### 2.4. Порівняння з результатами інших методів

Більшість методів оцінки інфільтраційного живлення є непрямими, базуються на припущеннях, що спрощують гідрогеологічну систему, або залежать від параметрів, яким властиві невизначеності тощо. Тому зазвичай точність того чи іншого методу розрахунку інфільтраційного живлення важко оцінити, і дуже важливо застосовувати багато різних методів з метою перехресного підтвердження їх результатів [8]. Саме тому, цікаво порівняти результати цієї роботи з даними інших досліджень із використанням альтернативних методів.

Зазначимо, що описаний у статті метод забезпечує визначення інфільтраційного живлення в конкретному місці. Тому результати можуть в певних межах відрізнятися від регіональних оцінок інфільтраційного живлення. Зокрема, оскільки ділянка поруч із шурфом не була вкрита рослинністю, величини інфільтраційного живлення можуть бути дещо вищими у порівнянні з регіональними оцінками, що зазнають впливу процесів евапотранспірації вологи рослинністю.

Результати представлених оцінок інфільтраційного живлення (див. таблицю), загалом, добре узгоджуються з визначеннями інфільтраційного живлення на основі даних про коливання РГВ у свердловинах на полігоні, згідно з якими річні величини інфільтрації становили за 2001 р. — 230–270 мм, за 2003 р. — 210–240 мм [1].

В роботі [2] виконано оцінки віку підземних вод ґрунтового водоносного горизонту на експериментальному полігоні в Чорнобильській зоні відчуження із застосуванням ізотопного методу «третій – гелій-3» та підібрано величину відповідного інфільтраційного живлення за допомогою калібрування фільтраційної моделі. Оцінене таким чином середньобагаторічне (за останніх 50 років) інфільтраційне живлення становило приблизно 200 мм/рік. Це менше, ніж оцінка цієї величини гідрофізичним методом за 2001–2004 рр. (≈310 мм/рік, див. таблицю). Різниця в оцінках може бути зумовлена тим, що з початку 50-х років ХХ ст. до Чорнобильської аварії в межах теперішнього «Рудого лісу» існувала стабільна лісова екосистема (сосновий ліс), для якої були характерні більші величини евапотранспірації вологи у порівнянні з умовами станом на 2001–2004 рр.

Загалом, із урахуванням зауважень на початку цього розділу можна говорити про добре узгодження результатів оцінки інфільтраційного живлення гідрофізичним методом з даними попередніх гідрогеологічних досліджень «Рудого лісу».

#### ВИСНОВКИ

Досвід наших досліджень показує, що гідрофізичний метод визначення інфільтраційного живлення за умови використання сучасних датчиків й електронних систем реєстрації даних може бути ефективним і потужним інструментом вивчення режиму руху вологи в ґрунтах зони аерації. Залучення автоматизованих систем збору даних дозволяє забезпечити високу детальність моніторингових даних в часі та просторі, що значно розширює можливості об-

Таблиця. Оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на експериментальному полігоні в чорнобильському «Рудому лісі» за гідрофізичним методом

Рік	Інфільтраційне живлення, мм					Інфільтр. живлення, % від суми опадів	Сума опадів, мм
	Зима	Весна	Літо	Осінь	Сума		
2001	108	131	23	4	265 (241*+24**)	40	668
2003	24	82	26	107	240 (226*+14**)	45	533
2004	115	126	108	80	429	64	675
<b>Середнє</b>					<b>311</b>	<b>49</b>	<b>625</b>

\* Значення розраховані на основі даних моніторингу за процесом вологоперенесення у зоні аерації, отриманих станцією «Шурф».

\*\* Екстрапольовані значення (за допомогою аналізу гідрографу свердловин) для періодів, коли дані моніторингу зони аерації були втрачені.

робки й інтерпретації даних, зокрема дозволяє отримати режим щоденного інфільтраційного живлення для періоду спостережень.

До обмежень гідрофізичного методу належить те, що отримані дані характеризують режим конкретного ґрунтового профілю. Крім того, метод є відносно складним і витратним, оскільки потребує відповідного інструментального забезпечення та проведення довгострокових моніторингових спостережень.

Визначене у 2001, 2003 і 2004 рр. річне інфільтраційне живлення ґрунтового водоносного горизонту становило від приблизно 240 до майже 429 мм, що відповідає 40–64% кількості опадів. Середнє значення становить 311 мм (49% річної кількості опадів). Цікавий висновок наших досліджень полягає в тому, що величина інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту (в тому числі в процентному вираженні щодо суми опадів) та його розподіл між сезонами року суттєво залежать від метеорологічних особливостей конкретного року.

Оцінки річного інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту згідно з гідрофізичним методом, загалом, добре узгоджуються з альтернативними методами оцінки інфільтрації (на основі аналізу гідрографу свердловин та ізотопних датувальних віку підземних вод). Отримані дані про режим інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту та гідрофізичні характеристики ґрунтів зони аерації можуть бути використані для прогнозного моделювання міграції радіонуклідів із радіоактивно-забруднених ґрунтів, сховищ РАВ та інших радіаційно-небезпечних об'єктів в Чорнобильській зоні відчуження.

Представлені в цій статті результати досліджень одержані авторами в рамках міжнародних радіоекологічних науково-дослідних проєктів «Чорнобильський пілотний майданчик» (Chernobyl Pilot Site Project, 1999–2003) та «Експериментальна платформа в Чорнобилі» (Experimental Platform in Chernobyl, 2004–2008), що виконувалися протягом 2000–2008 рр. у рамках партнерської програми Українського науково-технологічного центру і за фінансової підтримки Інституту радіаційного захисту і ядерної безпеки (IRSN, Франція), а також за бюджетною темою Національної академії наук України III-11-06.

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 наук. вісн. — 2007. — №2 (30). — С. 16–33.
2. Бугай Д. А., Фурре Э., Жан-Баттист П. и др. Оценка водообмена подземных вод в ближней зоне ЧАЭС на основе данных изотопного датирования и гидрогеологического моделирования // Геол. журн. — 2010. — №4. — С. 119–124.
3. Дзело С. П. Закономерности влагопереноса на опытных участках Украинского Полесья: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Киев, 1988. — 15 с.
4. Саприкін В., Бугай Д., Скальський О., Ван Меєр Н. Визначення коефіцієнту вологопереносу пісків *in-situ* на основі аналізу динаміки вмісту вологи в ґрунтового профілі після дощів // Вісн. Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія. — 2010. — №49. — С. 42–46.
5. Ситников А. Б. Динамика воды в ненасыщенных и насыщенных грунтах зоны аэрации. — Киев: Наук. думка, 1978. — 156 с.
6. Ткаченко К. Ю., Бугай Д. О., Ван Меєр Н., Кубко Ю. І. Моніторинг гідрохімічного режиму водоносного горизонту на експериментальному полігоні в Чорнобильській зоні відчуження // Екологія довкілля і безпека життєдіяльності. — 2010. — №1. — С. 17–22.
7. Bugai D. A., Dzhepo S. P., Skalskyi A. S., Van Meir N., Gaudet J. P. Estimation of hydraulic properties of unsaturated sandy soils using laboratory and field methods // Геол. журн. — 2008. — №4. — С. 99–105.
8. Healy R. W., Cook P. G. Using groundwater levels to estimate recharge // Hydrogeology Journal. — 2002. — №10. — P. 91–109.
9. 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.
10. Stephens D. B., Knowlton Jr. R. Soil water movement and recharge through sand at a semiarid site in New Mexico // Water Resources Research. — 1986. — Vol. 22, no. 6. — P. 881–889.
11. Van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Science Society of America Journal. — 1980. — Vol. 44, no. 5. — P. 892–898.
12. Watson K. K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials // Water Resources Research. — 1966. — Vol. 2. — P. 709–715.
13. White I., Zegelin S. J. Electric and Dielectric Methods for Monitoring Soil-Water Content // Handbook of vadose zone characterization and monitoring — Wilson L. G., Everett L. G., Cullen S. J. (Eds.). — Boca Raton: CRC Press: 1995. — P. 343–385.

<sup>1</sup> — Інститут геологічних наук НАН України, Київ

<sup>2</sup> — Інститут радіаційного захисту та ядерної безпеки, Фонтене-о-Розе, Франція  
E-mail: VladimirSaprykin@ukr.net

Рецензент — акад. НАН України П. Ф. Гожик