Національна академія наук України
Інститут геологічних наук

Національна академія наук України
Інститут геологічних наук

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Саприкін Володимир Юрійович

УДК 556.322+532.546+624.131.6

ДИСЕРТАЦІЯ

Вологоперенесення в ґрунтах зони аерації та інфільтраційне живлення ґрунтових вод ділянки локалізації радіоактивних відходів у зоні ЧАЕС

Спеціальність: 04.00.06 – Гідрогеологія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ В.Ю. Саприкін

Науковий керівник Бугай Дмитро Олександрович, кандидат фізико-математичних наук

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Саприкін В.Ю. Вологоперенесення в ґрунтах зони аерації та інфільтраційне живлення ґрунтових вод ділянки локалізації радіоактивних відходів у зоні ЧАЕС. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук за спеціальністю 04.00.06 – «гідрогеологія». – Інститут геологічних наук НАН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню вологоперенесення в ґрунтах зони аерації та інфільтраційного живлення першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту ділянки локалізації радіоактивних відходів (РАВ) «Рудий ліс» в зоні Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС). Актуальність теми обумовлена тим, що вологоперенесення в ґрунтах зони аерації та фільтрація у водоносному горизонті є головними чинниками, які спричиняють міграцію радіонуклідів аварійного викиду ЧАЕС в геологічному середовищі. В дослідженнях використано набір експериментальних даних, одержаних на полігоні ІГН в Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) в 2000-2012 рр. із використанням автоматизованих систем спостережень. В результаті виконання дисертаційних досліджень одержано ряд теоретичних результатів. В ході досліджень були розроблені (або вдосконалені) методи оцінки гідрофізичних параметрів ґрунтів зони аерації, а також вдосконалені методи оцінки інфільтраційного живлення грунтових вод на основі аналізу детальних рядів моніторингових спостережень, одержаних із застосуванням автоматизованих систем збору і реєстрації даних. Також одержано ряд практичних результатів з вивчення процесів вологоперенесення і оцінки гідрофізичних параметрів ґрунтів для досліджуваної природно-техногенної екосистеми – пункту локалізації РАВ «Рудий ліс» в ЧЗВ. Крім того була розроблена і валідована комп’ютерна модель вологоперенесення в ґрунтах зони аерації полігону.

Виконані дослідження дозволили визначити особливості вологоперенесення в ґрунтах ділянки локалізації РАВ і кількісно оцінити

інфільтраційне живлення першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту у взаємозв'язку з метеорологічними чинниками в сезонній і багаторічній динаміці. Одержані в ході дисертаційних досліджень параметри є важливими для оцінки безпеки радіаційно-небезпечних об’єктів в ЧЗВ, оскільки вологоперенесення в ґрунтах зони аерації є основним чинником, що обумовлює міграцію радіонуклідів із приповерхневих джерел забруднення в підземні і поверхневі води.

Спочатку в дисертаційній роботі виконано огляд сучасного стану досліджень вологоперенесення в ґрунтах зони аерації і гідрогеологічних полігонних досліджень в Чорнобильській зоні відчуження, зокрема: - методичного підходу до дослідження вологоперенесення в ґрунтах зони аерації на основі використання рівняння Річардса; - експериментальних методів визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів; - методів оцінки інфільтраційного живлення підземних вод. Також описано сучасний стан досліджень з математичного моделювання вологоперенесення в ґрунтах зони аерації. Надається огляд попередніх гідрогеологічних досліджень в Чорнобильській зоні відчуження. Перелічені питання розглядаються у взаємозв’язку з темою, конкретними задачами і цілями дисертаційної роботи.

Потім у роботі надано опис техногенних та природних умов дослідного полігону Інституту геологічних наук НАН України в ЧЗВ, приведена характеристика встановленого моніторингового обладнання, наведені методики і програми польових гідрогеологічних спостережень, а також надана загальна характеристика набору даних, використаних в дисертаційних дослідженнях.

Пункт тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) «Рудий ліс», де розміщено дослідний полігон ІГН, являє собою природно-техногенну екосистему, оскільки гідрогеологічні та міграційні умови ґрунтів зони аерації і гідрогеологічного середовища сформувалися внаслідок значного за масштабами техногенного впливу на природне середовище під час ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС.

В дисертації викладено результати аналізу процесу вологоперенесення на ділянці ПТЛРВ «Рудий ліс», зокрема, визначені інтервали глибин зони аерації, що характеризуються різно-направленим і одно-направленим (донизу) вологоперенесенням. Аналіз виконано на основі набору моніторингових даних, зібраних *in-situ* за допомогою автоматизованої станції моніторингу зони аерації «Шурф» протягом 2000-2004 рр. Також представлено результати кількісної оцінки режиму інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту (інфільтраційного потоку або направленого донизу вологоперенесення) на ділянці ПТЛРВ із застосуванням гідрофізичного методу.

Крім того запропоновано вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на основі аналізу коливань РҐВ, а також наведено результати його застосування для ПТЛРВ “Рудий ліс”.

Вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ полягає в: 1) виконанні сумісного аналізу даних про гідрограф РҐВ у спостережній свердловині та даних про атмосферні опади; 2) для оцінки швидкості рецесії РҐВ 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 РҐВ.

Запропоновано також метод оцінки коефіцієнта водовіддачі (в нашому випадку рівний коефіцієнту нестачі насичення – μ) на основі регресійного визначення коефіцієнтів лінійної залежності між величиною опадів та інтегральним (з урахуванням рецесії) підвищенням РҐВ.

Вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення було застосовано для аналізу даних моніторингових спостережень за 2000-2012 рр.

В дисертаційній роботі представлено виконане моделювання процесів вологоперенесення в ґрунтах зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс». Модель була розроблена з метою кількісного описання процесу вологоперенесення, і зокрема, для уточнення відповідних гідрофізичних параметрів ґрунтів шляхом калібрування. Для розробки і валідації моделі використано масив даних

(режимні дані щодо розподілу об'ємної вологості, всмоктуючого тиску в ґрунтовому профілі), зібраних станцією автоматизованого моніторингу за зоною аерації протягом 2000-2004 рр., а також дані спостережень одержані із допомогою автоматизованої метеостанції.

Модель створена за допомогою комп'ютерної програми HYDRUS-1D [Šimůnek et al, 2005], основаної на розв'язанні рівняння Річардса для пористого насичено-ненасиченого середовища із застосування чисельного методу Галеркіна.

Науковою новизною одержаних результатів дисертаційних досліджень є наступне:

1. Досліджено вологоперенесення в ґрунтах зони аерації ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс». Визначено інтервали глибин із різнонаправленим і однонаправленим (донизу) протягом року вологоперенесенням. Встановлено, що у верхній частині зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» (за потужності зони аерації 2,5-3,5 м) на глибинах до 1,25 м протягом року може відбуватися різнонаправлене вологоперенесення (в вологі періоди – вниз, в сухі періоди – вгору). Інтервал глибин від 1,25 м до рівня ґрунтових вод (РҐВ) характеризується стійким направленим донизу вологоперенесенням протягом всього календарного року.
2. Із застосуванням гідрофізичного методу проаналізовано вологоперенесення в ґрунтовому профілі ділянки локалізації РАВ у щодобовому режимі в 2001, 2003 і 2004 рр. З’ясовано, що інфільтраційне живлення ґрунтового водоносного горизонту ПТЛРВ «Рудий ліс» в основному формується за рахунок окремих інфільтраційних подій (сніготанення, великі зливи), а не є рівномірно розподіленим впродовж року. На метеорологічні епізоди, коли добовий інфільтраційний потік складав 1 мм/добу і вище (макс. 8 мм/добу) припадає приблизно 30% від загального періоду спостережень станцією «Шурф», причому за цей час сформувалося приблизно 73% загального інфільтраційного живлення

водносного горизонту. Середня величина інфільтраційного живлення за ці роки оцінена в 311 мм/рік (або 49% опадів).

3. Запропоновано вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на основі аналізу коливань РҐВ і атмосферних опадів. Зокрема, запропоновано для екстраполяції рецесії (зниження) РҐВ обирати не всі періоди рецесії РҐВ, а лише ті, коли відсутні атмосферні опади. Також запропоновано методику для оцінки коефіцієнта водовіддачі (нестачі насичення) ґрунтів на основі застосування лінійної регресії між величинами опадів і відповідними інтегральними (з урахуванням рецесії) підвищеннями РҐВ.
4. Розраховано (із застосуванням описаного вище методу) інфільтраційне живлення ґрунтових вод ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс» за період 2000-2012 рр., яке склало для різних років від 210 мм/рік до 439 мм/рік (в середньому 295 мм/рік, або 47% від середньобагаторічної величини опадів). Побудовано емпіричну регресійну модель для прогнозу інфільтраційного живлення ґрунтових вод (E) в залежності від річної кількості опадів (P): E = 0,63*P – 100, мм.
5. Одержано експериментальні оцінки гідрофізичних параметрів піщаних ґрунтів еолового генезису, якими складена зона аерації та верхня частина водоносного горизонту ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс». Залежність об’ємної вологості від всмоктуючого тиску описується моделлю ван Генухтена з наступними коефіцієнтами: для глибини 0,75 м – $\alpha = 0{,}142$; $n = 1{,}74$; для глибини 1,25 м – $\alpha = 0{,}046$; $n = 2{,}14$; для глибини 1,75 м – $\alpha = 0{,}097$, $n = 1{,}84$; $\theta_r = 0{,}02$ см^3/см^3, $\theta_s = 0{,}24$ см^3/см^3. Коефіцієнт вологоперенесення описується залежністю Гарднера з коефіцієнтами $K_s = 3{,}8$ м/добу, $a = 0{,}13$ см$^{-1}$. Коефіцієнт водовіддачі ґрунтів (нестачі насичення) складає $\mu = 0{,}11$.

Значимим результатом дисертаційних досліджень є також побудована, відкалібрована, і валідована математична модель вологоперенесення в ґрунтах зони аерації природно-техногенної системи ділянки локалізації РАВ «Рудий

ліс», що дозволило підтвердити і уточнити величини гідрофізичних параметрів ґрунтів. Таким чином створено інструмент моделювання і параметричну базу для геоміграціних прогнозів.

Практичне значення наведених в дисертаційній роботі результатів (отримані параматри ґрунтів і оцінені величини інфільтраційного живлення) можуть використовуватися для прогнозування міграції радіонуклідів із приповерхневих радіоактивно-забруднених ґрунтів, сховищ РАВ та інших радіаційно-небезпечних об'єктів в ЧЗВ. Запропоновані нові методи визначення гідрофізичних характеристик ґрунтів та вдосконалені методики оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод можуть бути застосовані до широкого спектру гідрогеологічних та екологічних проблем в схожих геологічних та кліматичних умовах.

Ключові слова: вологоперенесення, зона аерації, інфільтраційне живлення, ділянка локалізації радіоактивних відходів «Рудий ліс», Чорнобильська зона відчуження.

Список публікацій здобувача

1. Саприкін В., Бугай Д., Скальський О., Ван Меєр Н. Визначення коефіцієнту вологопереносу пісків in-situ на основі аналізу динаміки вмісту вологи в ґрунтовому профілі після дощів. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Серія: Геологія*. 2010. № 49. С. 42-46 (Особистий внесок – виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

2. 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". *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України.* 2011. Вип. 4. С. 141-151 (Особистий внесок – виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

3. Саприкін В. Моделювання процесів руху вологи в ґрунтах зони аерації ділянки чорнобильського "Рудого лісу". *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Серія: Геологія.* 2012. № 59. С. 44-48.

4. Саприкін В.Ю., Бугай Д.О., Скальський О.С., Кубко Ю.І. Методика розрахунку інфільтраційного живлення ґрунтових вод і оцінки коефіцієнта водовіддачі піщаних ґрунтів на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод. *Геологічний журнал*. 2015. № 1 (350). С. 89-98 (Особистий внесок – брав участь в експериментальних роботах, виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

5. Бугай Д.О., Джепо С.П., Скальський О.С., Кубко Ю.І., Саприкін В.Ю. Гідрогеологічний моніторинг і математичне моделювання радіоактивного забруднення підземних вод у Чорнобильській зоні відчуження і на уранових об'єктах колишнього Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Геологічний журнал*. 2018. № 4 (365). С. 47-57 (Особистий внесок – приймав участь у моніторингових роботах, виконував частину розрахунків і моделювання, брав участь в підготовці статті).

6. Бугай Д.О., Скальський О.С., Саприкін В.Ю., Natalie Van Meir. Оцінка коефіцієнту вологопереносу піщаного ґрунту *in-situ* на основі автоматизованих спостережень за режимом зони аерації. *Моніторинг геологічних процесів*: матеріали IX Міжнародної наукової конференції, 14-17 жовтня 2009 р. Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2009. С. 256-257.

7. 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». *Сучасні напрями геологічних досліджень в Україні*: збірник матеріалів молодіжної наукової конференції, 9-10 листопада 2011 р. Київ, Інститут геологічних наук НАН України, 2011. С. 54-56.

8. Volodymyr Saprykin. The Regime of an Infiltration Flux in Unsaturated Zone to Groundwater at Chernobyl “Red Forest” Radioactive Waste Site. *3rd Students International Geological Conference*. Abstracts. April 27-30, 2012. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2012. 34-35 pp.

9. Саприкін В.Ю. Одномірна математична модель вологоперенесення в зоні аерації ділянки чорнобильського “Рудого лісу”. *Моніторинг геологічних*

процесів та екологічного стану середовища: матеріали X Міжнародної наукової конференції, 17-20 жовтня 2012 р. Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2012. С. 211-213.

10. Саприкін В.Ю., Бугай Д.О. Порівняльний аналіз методів визначення інфільтраційного живлення підземних вод: досвід досліджень на експериментальному полігоні в чорнобильському «Рудому лісі». *Ідеї та новації в системі наук про землю*: матеріали VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції, 10-12 квітня 2019 р. Київ, Інститут геологічних наук НАН України, 2019. С. 92-93.

ABSTRACT

Saprykin V.Yu. Unsaturated flow in the vadose zone and groundwater recharge at radioactive waste dump site in the zone of ChNPP .– Manuscript.

Thesis for a candidate degree in geological sciences, specialty 04.00.06 – “hydrogeology”. – Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis considers unsaturated flow processes in soils of vadose zone and groundwater recharge of the first from the surface unconfined aquifer at “Red Forest” radioactive waste dump site in the Chernobyl Exclusion Zone. The subject of thesis is of particular interest as unsaturated flow is the main factor causing migration of radionuclides of the Chernobyl accidental release to groundwater. The study uses an experimental data set obtained in 2000-2012 at the experimental site of the Institute of Geological Sciences in the Chernobyl Exclusion Zone using automated monitoring systems. A number of theoretical results of the dissertation research were obtained. In the course of research presented in the thesis, methods were developed (or improved) for estimation of hydrophysical parameters of the vadose zone soils, as well as methods for quantification of groundwater recharge, that are based on the analysis of automated monitoring data collected in situ. Also, a number of practical results were obtained on the study of unsaturated flow processes and the estimation of soil hydrophysical parameters for the investigated natural-technogenic ecosystem – “Red Forest” radioactive waste dump site in the Chernobyl Exclusion Eone. A computer

model for unsaturated flow in the soils of vadose zone of the experimental site was developed and validated.

The accomplished studies allowed to determine peculiarities of unsaturated flow in the soils of the radioactive waste dump site and to quantify groundwater recharge of the first from the surface unconfined aquifer in inter-relation with meteorological factors in seasonal and multi-annual dynamics. The parameters obtained during the dissertation research are essential for assessing the safety of radiation-hazardous facilities in the Chernobyl Exclusion Zone since the unsaturated flow in soils of vadose zone is a major factor of radionuclides migration of from near-surface sources of pollution into groundwater and surface water.

At the beginning the current state of studies of unsaturated water flow in soils of vadose zone and on-site hydrogeological investigations in the Chernobyl Exclusion Zone are reviewed in the thesis, in particular: - methodological approach to the study of unsaturated water flow in soils of the vadose zone based on use of the Richards equation; - experimental methods for determining the hydrophysical parameters of soils; - methods for groundwater recharge estimation. Also the current state of mathematical modeling research of unsaturated water flow in soils of vadose zone is described. An overview of previous hydrogeological studies in the Chernobyl Exclusion Zone is provided. These questions are considered in relation to the topic, specific tasks and goals of the thesis.

Then, the paper outlines the technogenic and natural conditions of the experimental site of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine in the Chernobyl Exclusion Zone, describes the installed monitoring equipment, presents methods and programs of field hydrogeological observations, as well as provides general description of the data set used in dissertation research.

Radioactive waste dump area “Red Forest”, where the IGS experimental site is located, is a natural-technogenic ecosystem, since the hydrogeological and migration conditions of vadose zone soil and hydrogeological environment were formed due to large-scale man-made impact on the environment in the aftermath of the Chernobyl accident.

The thesis presents the results of analysis of unsaturated water flow processes at the “Red Forest” radioactive waste dump area, in particular, depth intervals of vadose zone, characterized by bidirectional (upward, downward) and unidirectional (downward) unsaturated water flow. The analysis was performed on the basis of a set of monitoring data collected in-situ using vadose zone automated monitoring station “Pit” during 2000-2004. Moreover, there are introduced the results of the quantitative assessment of the groundwater recharge regime of the first unconfined aquifer (infiltration flow or downward unsaturated flow) at the waste dump area using the hydrophysical method.

In addition, an improved method for groundwater recharge estimation, based on the analysis of water table fluctuations is proposed, as well as the results of its application for the “Red Forest” radioactive waste dump area.

An improved method for groundwater recharge estimation based on the analysis of WT (water table) fluctuations consists of the following: 1) performing a joint analysis of data of WT hydrograph in observation well and precipitation data; 2) using time intervals, when there are no precipitation for a certain period of time or their amount and frequency are low and moisture from precipitation is completely spent on evapotranspiration without reaching WT, to estimate the WT recession rate for graphical extrapolation of the observation well hydrograph.

The method for quantification of specific yield (μ) on the basis of regression determination of coefficients of linear dependence between precipitation value and integrated (taking into account recession) increase of WT is also suggested.

An improved method for groundwater recharge estimation was used for 2000-2012 monitoring observations data analysis.

The modeling of processes of unsaturated water flow in soils of the vadose zone of "Red Forest" radioactive waste dump area is presented in the thesis. The model was developed for the purpose of quantitative description of the unsaturated flow process, and in particular, for clarification of the relevant hydrophysical soils parameters by calibration. For the development and validation of the model, an array of data (distribution of volumetric moisture and suction pressure in the soil profile

regime data) collected by the automated vadose zone monitoring station during 2000-2004 was used, as well as observation data obtained by an automated meteorological station.

The model was made using the HYDRUS-1D software package [Šimůnek et al., 2005] which solves Richards equation for porous variably saturated medium using Galerkin numerical method.

The scientific novelty of the results of dissertation research are the following:

1. Unsaturated water flow in soils of vadose zone of "Red forest" radioactive waste dump area was investigated. Depth intervals with bidirectional and unidirectional (downward) unsaturated water flow during the year were determined. It is established that in upper part of vadose zone of "Red forest" radioactive waste dump area (the thickness of the vadose zone is 2.5-3.5 m) at depths of up to 1.25 m bidirectional unsaturated water flow (in wet periods – downward, in dry periods – upward) can take place. The depth interval from 1.25 m to the WT is characterized by a steady downward unsaturated water flow throughout the calendar year.
2. Unsaturated water flow in the soil profile of the radioactive waste dump area in the daily regime in 2001, 2003 and 2004 was analyzed, using the hydrophysical method. It is found that the groundwater recharge of the unconfined aquifer of the "Red forest" radioactive waste dump area is mainly formed due to individual infiltration events (snowmelts, heavy rainfalls), and is not evenly distributed throughout the year. Meteorological episodes, when the daily infiltration recharge rate was 1 mm/day and above (max. 8 mm/day), accounted for approximately 30% of the total observation period by the "Pit" station, with approximately 73% of the total infiltration recharge of the aquifer during this time. The average groundwater recharge for these years is estimated at 311 mm/year (or 49% of precipitation).

3. An improved method for the groundwater recharge estimation for unconfined aquifer based on the analysis of WT fluctuations and precipitations is proposed. In particular, it is proposed to extrapolate the WT recession (decrease) to choose not all periods of WT recession, but only those when there is no precipitation. A method for quantification of specific yield of soils based on linear regression between rainfall values and corresponding integral (taking into account recession) WT elevations is also proposed.
4. The groundwater recharge of unconfined aquifer of the “Red forest” radioactive waste dump area for the period 2000-2012 was calculated (using the method described above), which for different years ranged from 210 mm/year to 439 mm/year (an average of 295 mm/year, or 47% of the average annual rainfall value). An empirical regression model for the prediction of groundwater recharge (E) depending on the annual rainfall value (P) is constructed: E = 0.63*P – 100, mm.
5. Experimental estimations of hydrophysical parameters of sandy soils of aeolian genesis were obtained, which formed the vadose zone and the upper part of the aquifer of the “Red forest” radioactive waste dump area. The dependence of the volumetric moisture content from the suction pressure is described by van Genuchten model with the following coefficients: for a depth of 0.75 m – $\alpha = 0{,}142$; $n = 1{,}74$; for a depth of 1,25 m – $\alpha = 0{,}046$; $n = 2{,}14$; for a depth of 1,75 m – $\alpha = 0{,}097$, $n = 1{,}84$; $\theta_r = 0{,}02$ cm^3/cm^3, $\theta_s = 0{,}24$ cm^3/cm^3. The unsaturated hydraulic conductivity is described by Gardner's dependence with the coefficients $K_s = 3{,}8$ m/day, $a = 0{,}13$ cm^{-1}. Specific yield of soil is $\mu = 0{,}11$.

A significant result of the dissertation research is also the constructed, calibrated, and validated mathematical model of unsaturated water flow in the soil of the vadose zone of the natural-technogenic system of the “Red forest” radioactive waste dump area, which allowed to confirm and to clarify the values of hydrophysical parameters. This creates a simulation tool and a parametric base for geomigration forecasts.

The practical significance of the results presented in the thesis (soil parameters obtained and estimated groundwater recharge values) can be used to forecast the migration of radionuclides from near-surface radioactively contaminated soils, radioactive waste storage facilities and other radiation hazardous objects of Chernobyl exclusion zone. The proposed new methods for determining the hydrophysical characteristics of soils and the improved methods for estimation of groundwater recharge of unconfined aquifer can be applied to a wide range of hydrogeological and environmental problems in similar geological and climatic conditions.

Key words: unsaturated flow, vadose zone, groundwater recharge, “Red Forest” radioactive waste dump site, Chernobyl exclusion zone.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....- 19 -
ВСТУП.....- 20 -
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ В ҐРУНТАХ ЗОНИ АЕРАЦІЇ І ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ПОЛІГОННИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ .....- 26 -
1.1. Сучасні підходи та проблемні питання вивчення вологоперенесення в ґрунтах зони аерації .....- 26 -
1.1.1. Базові поняття і рівняння Річардса .....- 26 -
1.1.2. Експериментальні методи визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів .....- 29 -
1.2. Методи оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод.....- 31 -
1.2.1 Аналіз коливань рівня ґрунтових вод.....- 32 -
1.2.2 Гідрофізичний метод.....- 33 -
1.2.3 Гідрохімічний метод .....- 34 -
1.3. Математичне моделювання як інструмент дослідження вологоперенесення в зоні аерації.....- 34 -
1.3.1 Роль і задачі математичного моделювання при дослідженнях процесів вологоперенесення в ґрунтах зони аерації.....- 34 -
1.3.2. Огляд моделей вологоперенесення, що використовуються в прикладних дослідженнях .....- 35 -
1.3.3 Програмний пакет HYDRUS .....- 37 -
1.4. Попередні гідрогеологічні дослідження в Чорнобильській зоні відчуження .....- 37 -
1.4.1 Геологічна і гідрогеологічна вивченість району досліджень ....- 38 -
1.4.2. Радіо-гідрогеологічні дослідження на полігоні ІГН в ПТЛРВ «Рудий ліс».....- 41 -
1.5. Висновки до розділу.....- 43 -

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЙ ПОЛІГОН ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАН УКРАЇНИ В ЧОРНОБИЛЬСКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ І МЕТОДИКИ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ..... - 45 -
2.1. Загальна характеристика полігону ..... - 45 -
2.2. Техногенні умови полігону ..... - 46 -
2.2.1. Історія створення ПТЛРВ ..... - 46 -
2.2.2. Технологія поховання РАВ ..... - 52 -
2.2.3. Опис структури порушеного ґрунтового профілю ..... - 52 -
2.2.4. Лісонасадження для попередження вітрової ресуспензії і водної ерозії поверхневого шару ґрунту ..... - 54 -
2.3. Природні умови полігону ..... - 55 -
2.3.1. Кліматичні умови ..... - 55 -
2.3.2. Геоморфологія та геологія ..... - 57 -
2.3.3. Літологічні властивості ґрунтів зони аерації та безнапірного водоносного горизонту ..... - 65 -
2.3.4. Гідрогеологічні умови ..... - 67 -
2.4. Інструментальне обладнання, методики та програма моніторингових спостережень ..... - 72 -
2.4.1. Загальна характеристика системи моніторингу та програми спостережень ..... - 72 -
2.4.2. Метеорологічні спостереження ..... - 74 -
2.4.3. Спостереження за рівневим режимом ґрунтових вод ..... - 74 -
2.4.4. Моніторингові дослідження ґрунтів зони аерації ..... - 77 -
2.4.5. Дані спостережень, використані в дисертаційній роботі ..... - 83 -
2.5. Висновки до розділу ..... - 84 -

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ І ОЦІНКА ІНФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ДІЛЯНЦІ ПТЛРВ «РУДИЙ ЛІС» ПРОТЯГОМ 2000-2004 рр. ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГІДРОФІЗИЧНОГО МЕТОДУ .....- 85 -

3.1. Аналіз особливостей режиму вологоперенесення в ґрунтах ПТЛРВ «Рудий ліс».....- 86 -

3.1.1. Аналіз моніторингових даних щодо об'ємної вологості ґрунтів зони аерації.....- 87 -

3.1.2. Розрахунок всмоктуючих тисків у ґрунтах зони аерації протягом 2001-2004 рр.....- 89 -

3.1.3. Аналіз режиму гідравлічного напору в ґрунтах зони аерації протягом 2000-2004 рр.....- 90 -

3.2. Методика розрахунків швидкості вологоперенесення (інфільтраційного потоку) гідрофізичним методом 96

3.3. Визначення коефіцієнту вологоперенесення in-situ на основі даних моніторингу методом “миттєвого профілювання балансу вологи” в ґрунтовому профілі 98

3.3.1. Методика розрахунку коефіцієнту вологоперенесення 98

3.3.2. Вхідні дані і результати визначення коефіцієнту вологоперенесення 101

3.4. Результати застосування гідрофізичного методу: детальний щодобовий режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод протягом 2001-2004 рр. та його аналіз 106

3.5. Висновки до розділу..... 110

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ІНФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД І ОЦІНКИ КОЕФІЦІЄНТУ ВОДОВІДДАЧІ ПІЩАНИХ ҐРУНТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОЛИВАНЬ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД ДЛЯ ПТЛРВ “РУДИЙ ЛІС” 113

4.1. Стандартна схема застосування методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод..... 114

4.2. Вдосконалений варіант оцінки швидкості рецесії РҐВ при застосуванні методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод 115
4.3. Методика визначення коефіцієнта водовіддачі ґрунтів зони аерації .. 119
4.4. Результати розрахунків інфільтраційного живлення ґрунтових вод на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» за 2000-2012 рр. із застосуванням вдосконаленого методу 122
4.5. Порівняння оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод ПТЛРВ "Рудий ліс" різними методами 126
4.6. Висновки до розділу 129
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ В ҐРУНТАХ ЗОНИ АЕРАЦІЇ ПТЛРВ “РУДИЙ ЛІС” 131
5.1 Набір експериментальних даних 132
5.2 Методика моделювання процесів вологоперенесення 133
5.2.1 Вибір програмного забезпечення 133
5.2.2 Параметричні залежності для гідрофізичних характеристик ґрунтів 133
5.2.3 Структура та дискретизація чисельної моделі 134
5.2.4. Граничні умови 136
5.3. Результати моделювання 137
5.3.1. Попередня параметризація моделі 137
5.3.2 Калібрування і валідація моделі 140
5.4. Висновки до розділу 144
ВИСНОВКИ 145
Список використаних джерел 148
Додаток А 165
Додаток Б 168
Додаток В 171
Додаток Г 174
Додаток Д 177

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БСВ – балтійська система висот;

ІГН НАНУ – Інститут геологічних наук Національної академії наук України;

ПТЛРВ – пункт тимчасової локалізації радіоактивних відходів;

РАВ – радіоактивні відходи;

РҐВ – рівень ґрунтових вод;

ЧАЕС – Чорнобильська атомна електростанція;

ЧЗВ – Чорнобильска зона відчуження;

ChNPP – Chernobyl nuclear power plant;

IGS NASU – Institute of Geological Sciences of National Academy of Sciences of Ukraine.

WTF – water table fluctuations.

ВСТУП

Дисертаційна робота присвячена дослідженню вологоперенесення в ґрунтах зони аерації та інфільтраційного живлення першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту ділянки локалізації радіоактивних відходів (РАВ) «Рудий ліс» в зоні Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС).

Актуальність теми. Тема дисертації є актуальною оскільки вологоперенесення в ґрунтах зони аерації та фільтрація у водоносному горизонті є головними чинниками, які спричиняють міграцію радіонуклідів аварійного викиду ЧАЕС в геологічному середовищі.

Поява нових технічних засобів, зокрема автоматизованих систем для проведення спостережень за вологоперенесенням в ґрунтах зони аерації, рівнем ґрунтових вод (РҐВ) і метеопараметрами створює передумови для вдосконалення існуючих методів оцінки гідрофізичних параметрів ґрунтів зони аерації, дослідження режиму вологоперенесення в зоні аерації та оцінки інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту. Перелічені питання складають змістовну частину даної дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає напрямку наукової діяльності лабораторії моніторингу геологічного середовища відділу інженерної геології Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України. Дослідження виконано в рамках бюджетних науково-дослідних тем «Гідрогеологічні прогнози, оцінки ризиків і реабілітаційні заходи на територіях з радіоактивним забрудненням підземних вод (на прикладі Чорнобильської зони відчуження і Придніпровського хімічного заводу)» (№ III-3-10) та «Гідрогеологічні дослідження з метою обґрунтування і підтримки реабілітаційних заходів для природно-техногенних екосистем забруднених радіонуклідами і хімічними токсикантами» (№ III-11-14). Під час виконання вказаних тем автор брав участь у проведенні гідрогеологічного моніторингу, обробці і аналізі накопичених даних моніторингу, у підготовці звітів і публікацій в науково-технічних виданнях.

Мета та завдання досліджень. Мета роботи полягає в тому, щоб дослідити процеси вологоперенесення в зоні аерації, складеної піщаними ґрунтами, та оцінити інфільтраційне живлення безнапірного водоносного горизонту в умовах природно-техногенної екосистеми (ділянка локалізації РАВ «Рудий ліс» у Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ)) у взаємозв'язку з метеорологічними чинниками в сезонній і багаторічній динаміці.

Для реалізації мети досліджень вирішувались наступні задачі:

- розробка (або вдосконалення) методів оцінки гідрофізичних параметрів ґрунтів зони аерації на основі даних моніторингу in situ;
- вдосконалення експериментальних методів оцінки інфільтраційного живлення першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту;
- застосування розроблених (або вдосконалених) методів для інтерпретації та обробки експериментальних даних, одержаних на експериментальному полігоні в пункті локалізації РАВ «Рудий ліс» в ЧЗВ;
- розробка комп’ютерної моделі вологоперенесення в зоні аерації полігону.

Об'єкт досліджень. Зона аерації та перший від поверхні водоносний горизонт природно-техногенної екосистеми пункту тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) «Рудий ліс» в ЧЗВ.

Предмет досліджень. Гідрофізичні та гідрогеологічні властивості ґрунтів, які складають зону аерації та водоносний горизонт, процеси вологоперенесення в ґрунтах зони аерації, інфільтраційне живлення першого від поверхні водоносного горизонту.

Методи досліджень

1. Натурні спостереження за вологоперенесенням в ґрунтах зони аерації (із використанням станції моніторингу «Шурф»), за РҐВ і метеорологічними параметрами на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» в ЧЗВ. Загалом у дослідженнях використані дані моніторингових спостережень на полігоні ІГН НАН України в ЧЗВ, зібрані протягом 2000-2012 рр.

2. Інтерпретація даних режимних спостережень за вмістом вологи та всмоктуючим (капілярним) тиском у ґрунтах зони аерації та РҐВ на полігоні ІГН в ЧЗВ із застосуванням наступних методів:

– модифікованого методу «миттєвого профілювання балансу вологи в ґрунтовому профілі», який був застосований для оцінки коефіцієнту вологоперенесення ґрунтів зони аерації;
– гідрофізичного методу, що був застосований для оцінки інфільтраційного потоку вологи (швидкості вологоперенесення) в зоні аерації;
– оригінального методу оцінки коефіцієнту водовіддачі (нестачі насичення) ґрунтів зони аерації та водоносного горизонту, що був розроблений та застосований дисертантом;
– вдосконаленого графоаналітичного методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ.

3. Математичне моделювання процесів вологоперенесення в ґрунтах зони аерації із застосуванням комп’ютерної програми HYDRUS-1D.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Досліджено вологоперенесення в ґрунтах зони аерації ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс». Визначено інтервали глибин із різнонаправленим і однонаправленим (донизу) протягом року вологоперенесенням. Встановлено, що у верхній частині зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» (за потужності зони аерації 2,5-3,5 м) на глибинах до 1,25 м протягом року може відбуватися різнонаправлене вологоперенесення (в вологі періоди – вниз, в сухі періоди – вгору). Інтервал глибин від 1,25 м до РҐВ характеризується стійким направленим донизу вологоперенесенням протягом всього календарного року.
2. Із застосуванням гідрофізичного методу проаналізовано вологоперенесення в ґрунтовому профілі ділянки локалізації РАВ у щодобовому режимі в 2001, 2003 і 2004 рр. З’ясовано, що інфільтраційне живлення ґрунтового водоносного горизонту ПТЛРВ «Рудий ліс» в

основному формується за рахунок окремих інфільтраційних подій (сніготанення, великі зливи), а не є рівномірно розподіленим впродовж року. На метеорологічні епізоди, коли добовий інфільтраційний потік складав 1 мм/добу і вище (макс. 8 мм/добу) припадає приблизно 30% від загального періоду спостережень станцією «Шурф», причому за цей час сформувалося приблизно 73% загального інфільтраційного живлення водоносного горизонту. Середня величина інфільтраційного живлення за ці роки оцінена в 311 мм/рік (або 49% опадів).

3. Запропоновано вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на основі аналізу коливань РҐВ і атмосферних опадів. Зокрема, запропоновано для екстраполяції рецесії (зниження) РҐВ обирати не всі періоди рецесії РҐВ, а лише ті, коли відсутні атмосферні опади. Також запропоновано методику для оцінки коефіцієнта водовіддачі (нестачі насичення) ґрунтів на основі застосування лінійної регресії між величинами опадів і відповідними інтегральними (з урахуванням рецесії) підвищеннями РҐВ.
4. Розраховано (із застосуванням описаного вище методу) інфільтраційне живлення ґрунтових вод ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс» за період 2000-2012 рр., яке склало для різних років від 210 мм/рік до 439 мм/рік (в середньому 295 мм/рік, або 47% від середньобагаторічної величини опадів). Побудовано емпіричну регресійну модель для прогнозу інфільтраційного живлення ґрунтових вод (E) в залежності від річної кількості опадів (P): E = 0,63*P – 100, мм.
5. Одержано експериментальні оцінки гідрофізичних параметрів піщаних ґрунтів еолового генезису, якими складена зона аерації та верхня частина водоносного горизонту ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс». Залежність об’ємної вологості від всмоктуючого тиску описується моделлю ван Генухтена з наступними коефіцієнтами: для глибини 0,75 м – $\alpha = 0{,}142$; $n = 1{,}74$; для глибини 1,25 м – $\alpha = 0{,}046$; $n = 2{,}14$; для глибини 1,75 м – $\alpha = 0{,}097$, $n = 1{,}84$; $\theta_r = 0{,}02$ см^3/см^3,

$\theta_s = 0{,}24$ см^3/см^3. Коефіцієнт вологоперенесення описується залежністю Гарднера з коефіцієнтами $K_s = 3{,}8$ м/добу, $a = 0{,}13$ см$^{-1}$. Коефіцієнт водовіддачі ґрунтів (нестачі насичення) складає $\mu = 0{,}11$.

Практичне значення отриманих результатів. Наведені в дисертаційній роботі результати можуть використовуватися для прогнозування міграції радіонуклідів із приповерхневих радіоактивно-забруднених ґрунтів, сховищ РАВ та інших радіаційно-небезпечних об’єктів в ЧЗВ, і для оцінки ризиків, пов'язаних із поширенням забруднювачів.

Запропоновано нові методи визначення гідрофізичних характеристик ґрунтів зони аерації і водоносного горизонту; вдосконалені методи оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод можуть бути застосовані для вирішення широкого спектру гідрогеологічних та екологічних проблем в схожих геологічних та кліматичних умовах.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу виконано в ІГН НАН України в ході наукової роботи автора у відділі моніторингу геологічного середовища (нині відділ трансформовано в однойменну лабораторію в складі відділу інженерної геології). Автор особисто брав участь в моніторингових дослідженнях на полігоні ІГН в ЧЗВ в 2009-2012 рр. Автором особисто виконано аналіз масиву даних, одержаних на полігоні ІГН в ЧЗВ в 2000-2012 рр., зокрема розрахунки гідрофізичних параметрів ґрунтів, інфільтраційного потоку вологи (швидкості вологоперенесення) в ґрунтах зони аерації, і аналіз інфільтраційного живлення. Автором запропоновано нові підходи і методики, описані в дисертаційній роботі. Автором створено комп’ютерну модель вологоперенесення в ґрунтовому профілі ПТЛРВ «Рудий ліс» в ЧЗВ.

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися під час роботи низки наукових міжнародних і всеукраїнських конференцій: IX Міжнародної наукової конференції «Моніторинг геологічних процесів», Київ, 2009; Молодіжної наукової конференції «Сучасні напрями геологічних досліджень в Україні», Київ, 2011;

3-ьої Міжнародної студентської геологічної конференції, Львів, 2012; X Міжнародної наукової конференції «Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища», Київ, 2012; VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції, Київ, 2019.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 робіт, в тому числі 5 статей у фахових виданнях та 5 публікацій у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (143 найменувань), і 5 додатків. Робота викладена на 179 сторінках, і включає 8 таблиць і 42 рисунки.

Подяки. Я щиро вдячний науковому керівнику, кандидату фізико-математичних наук, с.н.с. Бугаю Дмитру Олександровичу за допомогу під час виконання роботи та постійну всебічну підтримку. Висловлюю також подяку академіку НАН України, доктору геолого-мінералогічних наук, професору Шестопалову Вячеславу Михайловичу, доктору геолого-мінералогічних наук, професору Огнянику Миколі Степановичу, доктору геологічних наук Сухореброму Арнольду Олексійовичу і члену-кореспонденту НАН України, доктору геологічних наук Шехуновій Стеллі Борисівні за корисні поради та зауваження. Моя подяка також колишньому завідуючому відділом моніторингу геологічного середовища, кандидату геолого-мінералогічних наук Джепо Сергію Прокоповичу, а також кандидату геолого-мінералогічних наук, с.н.с. Скальському Олександру Сергійовичу та всім співробітникам лабораторії моніторингу геологічного середовища ІГН НАН України за можливість виконати дисертаційні дослідження на основі набору моніторингових даних, що є результатом роботи усього колективу.

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ В ҐРУНТАХ ЗОНИ АЕРАЦІЇ І ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ПОЛІГОННИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ

В розділі виконано огляд сучасного стану вивчення питань, що є предметом дисертаційної роботи. Розглядаються наступні питання: - методичний підхід до дослідження вологоперенесення в ґрунтах зони аерації на основі використання рівняння Річардса; - експериментальні методи визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів; - методи оцінки інфільтраційного живлення підземних вод. Також описано сучасний стан досліджень з математичного моделювання вологоперенесення в ґрунтах зони аерації. Надається огляд попередніх гідрогеологічних досліджень в Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ). Перелічені питання розглядаються у взаємозв’язку з темою, конкретними задачами і цілями дисертаційної роботи.

1.1. Сучасні підходи та проблемні питання вивчення вологоперенесення в ґрунтах зони аерації

1.1.1. Базові поняття і рівняння Річардса

Зоною аерації (vadose zone, unsaturated zone, phreatic zone англ.) називається геологічне середовище, що розміщене під земною поверхнею але вище рівня першого безнапірного водоносного горизонту. Для зони аерації характерним є негативний тиск вологи (всмоктуючий тиск – suction pressure eng.) [Selker, 1999]. Через зону аерації відбувається рух вологи (вологоперенесення) з денної поверхні до ґрунтових вод. Можна сказати, що зона аерації гідравлічно пов'язує між собою такі компоненти гідрологічного циклу, як атмосферні та підземні води [Haverkamp, et al., 2007].

Зона аерації грає ключову роль у перенесенні забруднюючих речовин. Через зону аерації з денної поверхні чи самої зони аерації може відбуватися міграція (масоперенесення) потенційних забруднювачів до підземних вод, але в

той же час зона аерації може захищати, екранувати ґрунтові води від забруднення [Harter, 2004]. Багато компонентів, присутніх у атмосферних опадах або зосереджених в приповерхневому шарі ґрунту, в кінці кінців знаходять свій шлях до підземних вод через зону аерації [Haverkamp, et al., 2007].

Дослідження вологоперенесення в ґрунтах зони аерації стало суттєвою частиною природничих й інженерних наук, особливо в зв'язку з обстеженням, моніторингом, моделюванням, і рекультивацією сховищ відходів і територій, забруднених внаслідок дії техногенних факторів, зокрема аварій на атомних електростанціях, тощо [Tindall et al., 1999].

На сьогоднішній день як базова математична модель ненасиченого водного потоку (вологоперенесення) використовується рівняння Річардса. У 1931 Лорензо Річардс (Lorenzo A. Richards) поєднав рівняння потоку з рівнянням нерозривності в загальне нелінійне диференційне рівняння потоку для руху вологи в ненасиченому ґрунті. Іншими словами, рівняння Річардса можна назвати диференційним рівнянням нерозривності (масового балансу рідини) для порового середовища зі змінною насиченістю [Bear, 1979]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + 1 \right) \right] - S \qquad (1.1)$$

де θ – об'ємна вологість ґрунту (volumetric soil moisture content, англ.), см^3/см^3; t – час, діб; x – просторова координата, см; ψ – капілярний (всмоктуючий) тиск вологи в ґрунтах (suction pressure, pressure head, англ.), см; K – коефіцієнт вологоперенесення в зоні аерації (unsaturated hydraulic conductivity, англ.,) см/добу; S – “коефіцієнт поглинання” (відбір вологи корінням рослин), см^3/(см^3*добу).

Необхідною передумовою для використання рівняння Річардса є визначення гідрофізичних властивостей ґрунтів. Гідрофізичними характеристиками ґрунтів (soil water retention characteristics, hydraulic properties, англ.) є нелінійні функціональні залежності між вмістом вологи в ґрунтах (θ)

зони аерації, коефіцієнтом вологоперенесення (K) і капілярним (всмоктуючим) тиском вологи в ґрунтах (ψ).

На сьогоднішній день, існує багато різних аналітичних моделей гідрофізичних властивостей ґрунтів [Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; Brutsaert, 1966; Haverkamp and Vauclin, 1979]. Однією з найбільш поширених є модель ван Генухтена [van Genuchten, 1980]. Ван Генухтен використав статистичну модель розподілу розміру пор ґрунту (statistical pore-size distribution model, англ.) Муалема [Mualem, 1976], щоб отримати рівняння для залежності коефіцієнта вологоперенесення від вмісту вологи в ґрунті). Рівняння ван Генухтена мають наступний вигляд:

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha\psi|^n\right]^m} & \psi < 0 \\ \theta_s & \psi \geq 0 \end{cases} \tag{1.2}$$

$$K = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m\right]^2 \tag{1.3}$$

де

$$m = 1 - 1/n,\ n > 1 \tag{1.4}$$

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

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r},\quad S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n}\right]^m, \tag{1.5}$$

θ_r, θ_s, α, n і K_s є незалежними параметрами наведених рівнянь. θ_r – мінімальна вологість для даного ґрунту (residual water content, англ.), см^3/см^3; θ_s – максимальна вологість (вологість насиченого ґрунту; saturated water content, англ.), см^3/см^3; K_s – коефіцієнт фільтрації при повному насиченні (saturated hydraulic conductivity, англ.), см/добу; α, 1/см; 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]). В подальшому зазначена модель використовується в дисертаційних дослідженнях.

За останні десятиліття в розвиток теорії вологоперенесення і застосування її до прикладних задач внесли вклад такі вчені: І.С. Пашковський [Пашковский, 1983], Л. Лукнер, В.М. Шестаков [Лукнер и Шестаков, 1986; Шестаков, 1995], Д.М. Кац [Кац и Пашковский, 1988], J.A. Tindall [Tindall et al., 1999], А.Б. Ситніков, Ю.Г. Головченко, К.Д. Ткаченко [Ситников и др., 2003; Ситников, 2010], J.W. Hopmans, M. T. van Genuchten [Hopmans and van Genuchten, 2005], G. Cassiani [Cassiani et al., 2006], R. Haverkamp, [Haverkamp, et al., 2007].

1.1.2. Експериментальні методи визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів

Експериментальні методи визначення залежності вологості ґрунту від всмоктуючого тиску вологи θ(ψ) (кривої вологості, основної гідрофізичної характеристики, water retention curve, англ.) поділяються на польові, що базуються на інтерпретації результатів натурних режимних спостережень за вологістю ґрунту та всмоктуючим тиском вологи в ґрунті та лабораторні, що включають дослідні випробування зразків ґрунту, бажано непорушеної структури (монолітів) [Дзекунов и др., 1987].

Для лабораторного визначення залежності вологості ґрунту від всмоктуючого тиску вологи θ(ψ) можна використовувати велику кількість експериментальних методів. Зокрема, метод колонок (hanging water column), методи типу «мембранного преса» або «прес Річардса» (pressure cells/chambers), екстрактори типу «преспластинка» (pressure plate extractors), капіляриметри (tension plate apparatus) [Bear, 1979; Fredlund and Rahardjo, 2000] та багато інших підходів. Всебічний огляд різних методів визначення залежності вологості від всмоктуючого тиску дають [Dane and Hopmans, 2002].

Польові методи передбачають одночасне (синхронне) визначення вологості ґрунту (будь-яким із відомих прямих або опосередкованих методів) і вимірювання всмоктуючого тиску вологи (наприклад, тензіометрами), за якими будується залежність вологості ґрунту від всмоктуючого тиску вологи θ(ψ).

Перевага цих методів полягає в тому, що вологість і тиск визначаються за природного режиму вологоперенесення.

Визначення коефіцієнту вологоперенесення (або вологопереносу) ґрунтів, що є нелінійною функцією всмоктуючого тиску K(ψ), являє собою складну методичну проблему. Для визначення K(ψ) традиційно застосовуються лабораторні експерименти на ґрунтових колонках [Джепо, 1988; Ситников, 2010; Дзекунов и др., 1987]. Зокрема, визначення коефіцієнту вологоперенесення ґрунтів K(ψ) з використанням такого прямого методу, як метод усталеного (стаціонарного) вологоперенесення в ґрунтовій колонці (steady-state method) [Fredlund and Rahardjo, 2000], може викликати експериментальні труднощі через високо нелінійний характер гідравлічних функцій (як для піщаних ґрунтів) або займати багато часу (як для глинистих ґрунтів) [Kool et al., 1987].

Альтернативним підходом визначення гідрофізичних характеристик ґрунтів є комп’ютерна оптимізація даних лабораторних дослідів з дренування ґрунтових колонок (laboratory outflow test) [Kool et al., 1987]. Потенційні проблеми подібних непрямих методів пов’язані з вибором відповідної аналітичної моделі гідрофізичних характеристик ґрунтів, вибором обмежень для підбору параметрів, а також із тим, що при розв'язку оберненої задачі може бути отримано кілька наборів значень для параметрів, що підбираються [Eching and Hopmans, 1993].

Також для оцінки залежності коефіцієнту вологоперенесення K(ψ) ґрунтів зони аерації від всмоктуючого тиску використовується метод “миттєвого профілювання балансу вологи” в ґрунтовому профілі (instantaneous profile method, англ.) [Watson, 1966]. Даний метод використовується в контрольованих лабораторних і польових експериментах на основі аналізу спостережень за режимом зони аерації [Fredlund and Rahardjo, 2000].

Недоліком лабораторних методів визначення гідрофізичних властивостей є їх методична складність, трудомісткість, чутливість результатів до можливих порушень природної структури ґрунтів, оскільки лабораторні дослідження, як

правило, проводяться на зразках ґрунтів порушеної структури, що впливає на геометрію капілярного простору. Просторовий і часовий масштаб лабораторних експериментів не відповідає польовим умовам [Haverkamp, et al., 2007].

Слід зазначити, що визначення гідрофізичних властивостей піщаних ґрунтів є особливо складною методичною проблемою внаслідок різко нелінійного характеру функціональних залежностей між вмістом вологи в ґрунтах, коефіцієнтом вологоперенесення та капілярним (всмоктуючим) тиском вологи в піщаних ґрунтах [Bugai et all, 2008; Fredlund and Rahardjo, 2000].

Перевага польових методів визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів (in situ) полягає в тому, що параметри розраховуються на основі даних із моніторингу режиму вологості ґрунтів та всмоктуючого тиску вологи за природного режиму вологоперенесення та за майже непорушеної структури ґрунтів.

У зв'язку з поширенням технічних засобів, що дозволяють автоматизувати моніторинг гідрофізичних характеристик зони аерації, актуальним є розробка (або вдосконалення) методів досліджень, орієнтованих на детальні набори даних спостережень за вологоперенесенням у зоні аерації, одержані за допомогою сучасних інструментальних засобів.

Вдосконалені польові методи визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів на основі аналізу часових рядів замірів in situ вмісту вологи і всмоктуючого тиску в ґрунтовому профілі запропоновані і застосовані в 3 розділі дисертаційної роботи.

1.2. Методи оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод

Під інфільтраційним живленням звичайно розуміють потік вологи (або вологоперенесення), що досягає рівня ґрунтових вод (РҐВ) поповнюючи ґрунтовий водоносний горизонт [Freeze and Cherry, 1979]. Інфільтраційне живлення – це ключовий компонент в будь-якій моделі фільтрації підземних вод або міграції забруднювачів. Коректна оцінка величини інфільтраційного живлення необхідна для оцінки запасів, раціонального використання та захисту ресурсів підземних вод [Healy and Cook, 2002].

Існує велика кількість методів оцінки інфільтраційного живлення. Ці методи дозволяють виконувати оцінку в різному масштабі за часом та простором, і відрізняються об’ємом необхідної вхідної інформації, рівнем складності та вартістю.

При цьому більшість методів оцінки інфільтраційного живлення є непрямими, базуються на припущеннях, що спрощують гідрогеологічну систему, залежать від параметрів, яким властиві невизначеності. Тому точність того чи іншого методу розрахунку важко оцінити, і важливо застосовувати багато різних методів з метою перехресного підтвердження їх результатів [Healy and Cook, 2002].

Нижче представлено огляд деяких основних методів, які далі використовуються і розвиваються в дисертаційних дослідженнях.

1.2.1 Аналіз коливань рівня ґрунтових вод

Метод оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ в окремій свердловині називається у вітчизняній літературі методом Біндемана [Биндеман, 1963], закордоном – WTF методом (water-table fluctuation method) [Healy and Cook, 2002]. Цей метод є одним з найбільш поширених через доступність вхідних даних та відносну легкість розрахунків. Найкраще метод працює, коли РҐВ швидко реагує на “інфільтраційні події” – дощі, сніготанення, поливи.

Метод дозволяє виконати локальну оцінку інфільтраційного живлення за графо-аналітичним аналізом даних гідрографу РҐВ в окремій свердловині. Оцінюється інфільтраційне живлення, що викликало підвищення РҐВ для конкретних епізодів.

Застосування методу вимагає попереднього визначення коефіцієнту гравітаційної ємності ґрунтів μ. За [Шестаков, 1995], зміна ємності ґрунтів при їх осушенні чи насиченні характеризується коефіцієнтом ємності ґрунтів μ, який являє собою зміну кількості води в порах при коливаннях РҐВ, у відношенні до об'єму ґрунту. При зниженні РҐВ μ відповідає коефіцієнту водовіддачі $\mu_в$, а при підвищенні РҐВ – коефіцієнту нестачі насичення $\mu_н$. Для

дрібнозернистих пісків величини цих коефіцієнтів відрізняються незначно і μ може становити 0,08-0,2.

Метод застосовується для оцінки інфільтраційного живлення як закордоном так і в Україні [Ситніков та ін., 2003; Парамонова и др., 2011; Delottier et al., 2018; Qurtas, 2018]. Метод дозволяє визначити інфільтраційне живлення для площі від кількох до тисяч квадратних метрів (в залежності від конкретних гідрогеологічних умов, зокрема коефіцієнту фільтрації). Метод варто застосовувати за умов відсутності порушень природного режиму РҐВ внаслідок антропогенних впливів і відсутності помітного впливу на свердловину від поверхневих водотоків.

Складність точного визначення μ є головним джерелом похибок методу. Крім того, під час графічного аналізу можливі похибки при обранні періодів зниження (рецесії) РҐВ для екстраполяції.

1.2.2 Гідрофізичний метод

Гідрофізичний метод розроблено і застосовано в роботах [Ситников, 1978; Stephens and Knowlton, 1986; Дзекунов и др., 1987; Джепо, 1988] (в іноземній літературі метод має назву *Darcian flux calculations* [Gee and Hillel, 1988]). Метод базується на застосуванні закону Дарсі для ненасичених умов, дозволяє оцінити інфільтраційний потік (швидкість вологоперенесення) на певній глибині на основі режимних спостережень за вологістю та всмоктуючим тиском в конкретному ґрунтовому профілі зони аерації. Для виконання розрахунків необхідно також визначити залежність коефіцієнту вологоперенесення ґрунтів від всмоктуючого тиску чи вологості.

Метод складний у застосуванні, оскільки вимагає встановлення спеціальних станцій моніторингу, обладнаних численними датчиками для заміру тиску (або вологості) та проведення тривалих спостережень. При цьому можна отримати точкові оцінки інфільтраційного потоку (швидкості вологоперенесення)та його детальний (погодинний, подобовий) режим протягом періоду спостережень.

1.2.3 Гідрохімічний метод

Гідрохімічний метод, висвітлений та застосований, наприклад, у роботах [Ситніков та ін., 1988; Gee and Hillel, 1988; Scanlon et al., 2002 (a); Bugai et al., 2012 (a)] базується на визначені співвідношення концентрацій консервативних іонів в дощовій воді та воді ґрунтового водоносного горизонту [Ситніков та ін., 2003]. При розрахунках використовується коефіцієнт концентрування зазначених іонів за рахунок евапотранспірації та середньобагаторічна величина атмосферних опадів. Зокрема, для визначення величини інфільтраційного живлення часто використовується співвідношення концентрації іону хлору в атмосферних опадах і ґрунтових водах [Wood and Sanford, 1995].

Перевагою даного методу можна вважати достатньо прості балансні розрахунки, а недоліками те, що його застосування вимагає великої статистики гідрохімічних даних про атмосферні опади та підземні води; метод чутливий до наявності джерел техногенного впливу на хімічний склад ґрунтових вод.

1.3. Математичне моделювання як інструмент дослідження вологоперенесення в зоні аерації

1.3.1 Роль і задачі математичного моделювання при дослідженнях процесів вологоперенесення в ґрунтах зони аерації

Математичне моделювання процесів вологоперенесення в ґрунтах зони аерації застосовувалося в літературних джерелах як інструмент дослідження широкого кола питань: для інтерпретації даних гідрогеологічних спостережень, для оцінки інфільтраційного живлення підземних вод, оптимізації режиму зрошення ґрунтів в сільському господарстві, для прогнозування процесів міграції радіонуклідів і інших забруднювачів із сховищ відходів, т. ін. [Johansson, 1987; Stothoff, 1997; Kearns and Hendrickx, 1998; Stauffer and Kinzelbach, 2001; Keese et al., 2005; Leterme et al., 2012; Carrera-Hernández et al., 2012; Ries et al., 2015; Šimůnek, 2015; Pasha, 2018].

Відомості про розподіл опадів на різні елементи водного балансу (випаровування, інфільтрація), які можна отримати внаслідок моделювання

вологоперенесення, використовуються для оцінки регіонального та глобального водного циклів [Milly, 1994; Milly and Dunne, 1994].

Таким чином, наявність моделі вологоперенесення дозволяє кількісно описати досліджувану гідрогеологічну систему, перевірити й уточнити отримані раніше дані відносно властивостей ґрунтів, зокрема їх гідрофізичні параметри, і дозволяє отримати більш повне уявлення про основні фактори, що впливають на процес вологоперенесення. Як показує наведений вище огляд, моделювання вологоперенесення в зоні аерації може бути зокрема використано з метою оцінки інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту, для прогнозування міграції забруднювачів, і для оцінки ефективність інженерних екранів при локалізації забруднювачів. Остання задача є актуальною для оцінки безпеки приповерхневих сховищ радіоактивних відходів в Чорнобильській зоні відчуження.

1.3.2. Огляд моделей вологоперенесення, що використовуються в прикладних дослідженнях

Багато робіт з моделювання з метою оцінки інфільтраційного живлення було проведено за допомогою одномірних балансових моделей, що моделюють дренування вологи під заповненою корінням частиною ґрунту [Rockhold et al., 1995; Kearns and Hendrickx, 1998]. Такі одномірні моделі можуть бути застосовані для територій з різним кліматом, рослинністю та призначенням земель з метою визначити вплив цих факторів на інфільтраційне живлення та розробити карти інфільтраційного живлення [Hatton, 1998]. За допомогою подібних моделей можливо також оцінити вплив зміни типу рослинності на розподіл вологи [Pierce et al., 1993]. Одномірні моделі добре підходять для територій, де процесами, пов'язаними з латеральним потоком можна знехтувати [Dawes et al., 1997; Hatton, 1998].

Останні досягнення в комп'ютерних технологіях, більш ефективні програми для моделювання, доступність через Інтернет вхідних кліматичних даних та гідрофізичних характеристик ґрунтів роблять моделювання в приповерхневій зоні для довгих періодів значно більш реалістичним [Scanlon et

al., 2002 (b)]. Застосувавши педотрансферні функції можна розрахувати гідрофізичні характеристики ґрунтів на основі інформації про їх текстуру та склад [Schaap and Leij, 1998; Schaap et al., 1998].

Існують різні за складністю програми, що моделюють вологоперенесення в приповерхневій частині розрізу. Від простих програм типу „ємність” [Schroeder et al., 1994; Flint et al., 2000] та аналітичних пакетів [Kim et al., 1996; Simmons and Meyer, 2000], до більш комплексних програм, які використовують числові методи [Fayer et al., 1992; Scanlon and Milly, 1994; Khire et al., 1997; Stothoff, 1997]. Програми типу „ємність” апроксимують ємнісну здатність кореневої зони використовуючи концепцію ємності або резервуара. Інфільтраційне живлення виникає, коли інтенсивність опадів перевищує інтенсивність поверхневого стоку та випаровування. Прості одномірні моделі емнісного типу використовувалися для оцінки інфільтраційного живлення великих площ [Hatton, 1998; Flint et al., 2000] та для оцінки вкладу окремих „інфільтраційних подій” в загальне інфільтраційне живлення [Lewis and Walker, 2002]. Для оцінки наслідків глобальних кліматичних змін розроблені спрощені аналітичні розв'язки рівняння Річардса включені у моделі приповерхневих процесів, які можливо інтегрувати в глобальні кліматичні моделі та застосувати для оцінки водного балансу великого масштабу та екогідрологічних задач [Milly, 2001; Rodriguez-Iturbe et al., 2001]. Більш комплексні числові розв'язки рівняння Річардса використовуються для моделювання вологоперенесення, коли наявна детальна інформація про гідрофізичні характеристики ґрунтів [Fayer et al., 1992; Flerchinger et al., 1996; Khire et al., 1997]. Обчислювальні витрати числових моделей значно вищі ніж у аналітичних.

В даних дисертаційних дослідженнях для моделювання вологоперенесення використано сучасний програмний пакет HYDRUS-1D, який більш детально описаний нижче.

1.3.3 Програмний пакет HYDRUS

HYDRUS-1D та HYDRUS (2D/3D) є пакетами комп'ютерних програм призначеними для моделювання руху вологи, тепла, та розчинених речовин в поровому середовищі зі змінною насиченістю в одновимірній (1D) і дво- та тривимірній постановці (2D/3D), відповідно [Šimůnek et al., 2016].

HYDRUS базується на розв'язанні рівняння Річардса (рівн. 1.1) для руху вологи в поровому середовищі зі змінною насиченістю (фільтрація та вологоперенесення) та рівнянь конвективної дифузії для перенесення тепла та розчинених речовин (тепло- та масоперенесення). HYDRUS дозволяє використовувати для верхньої граничної умови реальні кліматичні дані та автоматично розраховувати величину випаровування. Рівняння потоку включає в себе «коефіцієнт поглинання» для врахування поглинання води корінням рослин. Крім того, програми HYDRUS реалізують метод оцінки параметрів типу Марквардта-Левенберга (Marquardt-Levenberg type parameter estimation technique) [Šimůnek and Hopmans, 2002] для оцінки параметрів гідрофізичних властивостей ґрунту [Hopmans et al., 2002] та параметрів рівнянь масоперенесення [Šimůnek et al., 2002] на основі даних вимірів при стаціонарному та нестаціонарному волого- та масоперенесенні шляхом розв`язання обернених задач.

Пакети програм обладнані зручними графічними інтерфейсами, що спрощують роботу по підготовці вхідних та аналізу вихідних даних. HYDRUS-1D знаходиться в вільному доступі, HYDRUS (2D/3D) розповсюджується комерційно.

1.4. Попередні гідрогеологічні дослідження в Чорнобильській зоні відчуження

Дисертаційні дослідження базуються на аналіз даних моніторингових спостережень, отриманих на експериментальному полігоні ІГН НАН України в Чорнобильській зоні відчуження. Полігон розташований в межах пункту тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) «Рудий ліс» в ближній

10-км зоні Чорнобильської АЕС. Нижче представлений короткий опис геологічної та гідрогеологічної вивченості району досліджень, а також попередніх гідрогеологічних досліджень, проведених в ближній зоні ЧАЕС та на експериментальному полігоні ІГН в ПТЛРВ “Рудий ліс”.

1.4.1 Геологічна і гідрогеологічна вивченість району досліджень

У геолого-гідрогеологічній літературі ближня зона Чорнобильської АЕС, в т.ч. ПТЛРВ «Рудий ліс», входить у регіональні описи Прип'ятського Полісся масштабу 1:500000. Класичними джерелами геолого-гідрогеологічної інформації є роботи В.М. Козлова 1973-1976 рр. [Козлов, 1973; 1976 (а); 1976 (б)]. Дані геології четвертинних відкладів у районі Чорнобильської АЕС найбільший детально представлені в роботах Веклича М.Ф. [Веклич, 1958; Веклич, 1972], Горецького Г.И. [Горецкий, 1970], Гожика П.Ф. [Гожик и др., 1976], Матошко А.В. [Матошко, 1996].

Гідрогеологічні дослідження регіонального плану для умов Прип'ятського Полісся проводилися такими українськими вченими, як Варава К.М., Вовк І.Ф., Негода Г.М., Белявський Г.О., Алексієвський В.Є., Бабінець А.Є.., Шестопалов В.М. й ін. [Варава и Негода, 1968; Варава и др., 1973; Белявский, 1971; Алексеевский и др., 1989; Бабинец и др., 1979]. Перераховані роботи дають загальне уявлення про гідрогеологічні умови району.

На рівнинних поліських територіях напрямки поверхневого стоку підконтрольні мікрорельєфу, який, в тому числі, являє собою закриті (внутрішні) системи – западини (або понижені форми мікрорельєфу), в їх межах можуть бути розвинені міграційні, або дренажні зони. Понижені форми мікрорельєфу з міграційними зонами поширені на терасових і вододільних рівнинах прип’ятського водозбору та відіграють важливу роль у водному балансі території [Бублясь и Шестопалов, 2001 р., Bixio et al, 2002; Faybishenko and Nicholson, 2015].

Значного розвитку гідрогеологічні дослідження в зоні ЧАЕС набули в період після аварії на ЧАЕС 26.04.1986 р. Це було обумовлено актуальністю проблеми вивчення захищеності гідрогеологічного середовища від

радіоактивного забруднення ґрунтів в зоні ЧАЕС внаслідок аварії, роботами із створення могильників РАВ, міграцією радіонуклідів в підземних водах із става-охолоджувача ЧАЕС в р. Прип'ять, водоохоронною діяльністю, і ін.

Гідрогеологічними дослідженнями в зоні ЧАЕС займалися НДІПІПромтехнологій м. Москва [НИИПИпромтехнологий, 1990; ВНИПИпромтехнологий, 1991-92; 1992; Либов и Ильичев, 1991], Радієвий інститут ім. В.М. Хлопіна м. Ленінград [Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина, 1991 (а); 1991 (б); 1992], ГГІ м. Ленінград [ГГИ, 1992], ВНДІгеолнеруд м. Казань [ВНИИгеолнеруд, 1991] і інші організації колишнього СРСР. Цими організаціями, зокрема, були розпочаті дослідження з моніторингу підземних вод в ближній зоні ЧАЕС і прогнозування міграції радіонуклідів із підземними водами в районах приповерхневих поховань радіоактивних відходів в ЧЗВ.

З 60-х років XX сторіччя на Прип'ятському поліссі були широко розвинені осушувальні та осушувально-зволожувальні системи. Після аварії на ЧАЄС в 1986 р. радіоактивне забруднення певною мірою обумовило припинення розвитку осушувальної меліорації на території Українського полісся. В монографії [Шевченко та ін., 2011 р.] описані, в тому числі, гідрогеологічні та радіоекологічні дослідження на меліоративних системах ЧЗВ 1986-2002 рр., режимні гідрогеологічні спостереження на меліоративних системах 30-км зони ЧАЄС в 1986-1996 рр., радіаційний стан ґрунтових, дренажних і поверхневих вод, розроблені заходи з мінімізації забруднення та винесення за межі меліоративних систем радіонуклідів аварійного походження, перерозподіл радіонуклідів по зоні аерації меліоративних систем, режим вологості ґрунтів, їх п'єзометричні та тензометричні параметри, а також особливості водообміну та режим ґрунтових вод на осушувальних системах ЧЗВ.

На початковому етапі ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС гостро постали питання створення системи моніторингу підземних вод у ЧЗВ, оперативної оцінки і прогнозування процесів радіоактивного забруднення підземних вод. Для вирішення вказаних задач вченими відділу моніторингу геологічного

середовища (ВМГС) ІГН НАН України ІГН НАН України було виконано великий обсяг польових гідрогеологічних досліджень в ЧЗВ. У результаті цього в 10-кілометровій зоні ЧАЕС в 1995 р. було побудовано розгалужену мережу гідрогеологічних свердловин малого діаметра для дослідження радіоактивного забруднення першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту в четвертинних відкладах (понад 100 свердловин). На основі цієї мережі свердловин було складено перші детальні кондиційні карти радіоактивного забруднення підземних вод у центральній частині ЧЗВ [Джепо й ін., 1996].

Загалом, Інститут геологічних наук, починаючи з 1988 р., поступово став головним науковим підрозділом, який з 1992 р. забезпечував супровід гідрогеологічних робіт в Зоні відчуження. Головними напрямками робіт були удосконалювання моніторингу підземних вод, прогнозування змін гідрогеологічних умов у результаті інженерної діяльності в ЧЗВ, гідрогеологічні дослідження і натурні експерименти, обґрунтування водоохоронної діяльності, дослідження приповерхневих поховань радіоактивних відходів. Результати досліджень були висвітлені в численних звітах і публікаціях [Bugai et al., 1996 (a); 1996 (b); Джепо и др., 1994; Voitsekhovitch et al., 1996; Бугай и др., 1998; Vovk et al., 1995; Bugai, et al., 1995]. Крім того було виконано комплекс досліджень з типізації геологічної будови і гідрогеологічних умов зони ЧАЕС з позицій схематизації умов міграції радіонуклідів аварійного викиду ЧАЕС [Matoshko et al., 2004].

Спеціалісти ІГН НАН України разом з іншими інститутами НАН України і галузевими інститутами взяли участь у розробці техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) «Схеми водоохоронних заходів…» для захисту від радіоактивного забруднення поверхневих і підземних вод у ЧЗВ. Результатом цих робіт стало спорудження Лівобережної захисної дамби (1993 р.) і Правобережної захисної дамби (1998 р.) на р. Прип’ять в 10-кілометровій зоні ЧАЕС, що ізолювало річкову мережу від найбільш небезпечних джерел радіоактивного забруднення [Шестопалов та ін., 2006]. Результати описаних

вище досліджень ВМГС підсумовані в главах монографій [Dzhepo and Skalskyy, 2002; Bugai et al., 2007].

1.4.2. Радіо-гідрогеологічні дослідження на полігоні ІГН в ПТЛРВ «Рудий ліс»

У 1994-1995 рр. ІГН у рамках наукових програм Мінчорнобиля України (пізніше – Міністерства з надзвичайних ситуацій) були розпочаті дослідження з моніторингу міграції радіонуклідів у геологічному середовищі на експериментальній ділянці поблизу траншеї №22-Т ПТЛРВ «Рудий ліс» [Джепо и др., 1994, 1995]. Зважаючи на наявність попередніх даних і початкової інфраструктури спостережних свердловин, експериментальна ділянка у траншеї №22-Т була вибрана в 1999 р. базовою для реалізації міжнародного радіоекологічного проекту «Чорнобильський пілотний майданчик», що виконувався ІГН, УкрНДІ Сільгоспрадіології (м. Чабани) і Інститутом Радіаційного Захисту і Ядерної Безпеки (IPCH, Фонтене-о-Розез, Франція) за фінансової підтримки французької сторони [Кашпаров та ін., 2007]. В 1999-2000 рр. в Чорнобильській зоні відчуження співробітниками ІГН і зазначеними вище організаціями співвиконавцями проекту було організовано дослідний полігон для комплексних гідрогеологічних і радіоекологічних досліджень міграції радіонуклідів із поховань радіоактивних відходів. Гідрогеологічні роботи, що проводилися на майданчику, включали в т.ч. дослідження з таких питань: вивчення геологічної будови експериментальної ділянки, дослідження режиму та параметрів руху підземної води (ґрунтової вологи) у системі «атмосфера – зона аерації – водоносний горизонт [Dewiere, 2002; Bugai and Dewiere, 2004].

При спорудженні полігону, особливо при обладнанні станції моніторингу зони аерації, був використаний досвід, отриманий співробітниками ВМГС під час робіт на дослідній станції вивчення зони аерації “Феофанія” [Джепо, 1988] під керівництвом А.Б. Ситнікова (проф. А.Б. Ситніков багато років досліджував динаміку волого- та солепереносу в зоні аерації різних територій України та розробляв методики подібних досліджень [Ситников, 1978, 1986]). Станція

“Феофанія” (розташована на межі Полісся та лісостепу) була унікальним для Європейської частини колишнього СРСР полігоном, на якому багато років проводилися комплексні дослідження різних елементів водного балансу з метою з'ясування основних факторів впливу на вологосолеперенесення в зоні аерації. Результати робіт на дослідній станції підсумовані в монографії [Ситніков та ін. 2003].

Детальні дані про геологічну будову верхньої частини дослідного полігону ІГН НАН України в ЧЗВ описані в [Бугай й ін., 2001; Matoshko et al., 2004]. Фільтраційні властивості геологічних відкладів полігона, а також детальний опис загальних гідрогеологічних умов полігону наведено в [Bugai and Dewiere, 2004; Бугай й ін., 2001]. Результати попередніх досліджень зони аерації (моніторингові та лабораторні роботи) описані в [Dewiere, 2002; Bugai and Dewiere, 2004].

На полігоні були обладнані автоматизовані системи спостережень за метеорологічними параметрами і гідрофізичними характеристиками гідрогеологічного середовища на основі сучасних електронних датчиків і систем реєстрації даних. Результати моніторингових спостережень за метеорологічними, гідрогеологічними, геохімічними і біогенними процесами міграції радіонуклідів в природно-техногенній екосистемі поховань радіоактивних відходів (РАВ) “Рудого лісу” висвітлені в роботах: [Бугай та ін., 2007; Ткаченко та ін., 2010].

За результатами виконання програм міжнародного співробітництва – міжнародних радіоекологічних науково-дослідних проектів “Чорнобильській пілотний майданчик” (Chernobyl Pilot Site Project, 1999-2003) і “Експериментальна платформа в Чорнобилі” (Experimental Platform in Chernobyl, 2004-2008), що виконувалися протягом 2000-2008 рр. Інститутом геологічних наук НАН України у співпраці із Інститутом радіаційного захисту і ядерної безпеки (IPCH, Франція) було опубліковано ще ряд робіт присвячених геохімічному режиму підземних вод полігону, ізотопному датуванню підземних

вод і математичному моделюванню міграції стронцію-90 із поховання РАВ в підземні води [Бугай и др., 2010; Bugai et al., 2008; 2012 (a); 2012 (b)].

Детальна характеристика умов природно-техногенної екосистеми чорнобильського «Рудого лісу» й інструментального обладнання полігону наведена в розділі 2 дисертації.

За роки існування експериментального полігону ІГН в ПТЛРВ «Рудий ліс» було накопичено унікальний за детальністю набір гідрогеологічних та кліматичних моніторингових даних. Цей набір даних (в частині даних моніторингу гідрофізичного режиму ґрунтів зони аерації, моніторингу рівневого режиму підземних вод, і метеорологічних параметрів) являє собою експериментальну основу викладених нижче дисертаційних досліджень.

1.5. Висновки до розділу

Теоретичні засади вологоперенесення в зоні аерації, експериментальні методи визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів, методи оцінки інфільтраційного живлення підземних вод, і застосування математичного моделювання до прикладних завдань гідрогеологічних досліджень (таких як водобалансні оцінки, оцінки захищеності підземних вод, оцінки безпеки сховищ радіоактивних відходів, й ін.) набули значного розвитку в 2-й половині 20-го сторіччя та на початку 21 сторіччя.

В той же час існують методичні проблеми із застосуванням стандартних методів визначення в лабораторних умовах гідрофізичних параметрів ґрунтів, що обумовлено їх методичною складністю, трудомісткістю, чутливістю результатів до можливих порушень природної структури ґрунтів та ін. Визначення гідрофізичних властивостей піщаних ґрунтів є особливо складною методичною проблемою внаслідок різко нелінійного характеру гідрофізичних функцій. Традиційні методи визначення інфільтраційного живлення як правило є непрямими, і відповідно їх результати зазвичай вимагають підтвердження кількома перехресними методами.

У зв'язку з поширенням в останні десятиріччя технічних засобів, що дозволяють автоматизувати моніторинг параметрів зони аерації (вміст вологи,

всмоктуючий тиск), актуальним є розробка (або вдосконалення) методів досліджень процесів вологоперенесення, оцінки гідрофізичних параметрів, калібровки математичних моделей, що є орієнтованими на детальні набори даних спостережень за вологоперенесенням у зоні аерації in-situ, одержані за допомогою сучасних інструментальних засобів. Відповідні методи запропоновані і застосовуються в даній дисертаційній роботі.

Гідрогеологічні дослідження території Чорнобильської зони відчуження в період після аварії на ЧАЕС здійснювалися численними вітчизняними та закордонними вченими та науковими закладами, провідну роль серед яких відіграли спеціалісти Інституту геологічних наук НАН України. Важливим напрямком робіт були дослідження пов’язані з міграцією радіонуклідів в водорозчинних формах в ґрунтах і підземних водах Чорнобильської зони відчуження у взаємозв’язку з гідрогеологічними чинниками (вологоперенесенням в ґрунтах зони аерації і латеральною фільтрацією в водоносному горизонті). Найбільш комплексні і детальні гідрогеологічні моніторингові дослідження проводилися в 2000-2012 рр. на міжнародному дослідному полігоні ІГН в ПТЛРВ «Рудий ліс». В рамках зазначених полігонних досліджень із застосуванням автоматизованих систем спостережень за гідрофізичним режимом зони аерації, режимом підземних вод і метеорологічними параметрами було накопичено унікальний за детальністю набір гідрогеологічних даних. Цей набір даних являє собою експериментальну основу викладених нижче дисертаційних досліджень.

Представлений у цьому розділі огляд попередніх гідрогеологічних досліджень в ЧЗВ частково подано в публікації:

1. Бугай Д.О., Джепо С.П., Скальський О.С., Кубко Ю.І., **Саприкін В.Ю.** Гідрогеологічний моніторинг і математичне моделювання радіоактивного забруднення підземних вод у Чорнобильській зоні відчуження і на уранових об'єктах колишнього Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Геологічний журнал*. 2018. № 4 (365). С. 47-57 (Особистий внесок – приймав участь у моніторингових роботах, виконував частину розрахунків і моделювання, брав участь в підготовці статті).

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДНИЙ ПОЛІГОН ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАН УКРАЇНИ В ЧОРНОБИЛЬСКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ І МЕТОДИКИ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальною основою дисертаційних досліджень є масив натурних даних, отриманих на експериментальному гідрогеологічному полігоні ІГН НАН України в Чорнобильскій зоні відчуження. В даному розділі дисертації описані техногенні та природні умови полігону, дана характеристика встановленого моніторингового обладнання, наведені методики і програми гідрогеологічних спостережень, і надана загальна характеристика набору даних, використаних в дисертаційних дослідженнях.

2.1. Загальна характеристика полігону

В 1999-2000 рр. в Чорнобильській зоні відчуження співробітниками ІГН в рамках програм міжнародного співробітництва – міжнародних радіоекологічних науково-дослідних проектів “Чорнобильській пілотний майданчик” (Chernobyl Pilot Site Project, 1999-2003) і “Експериментальна платформа в Чорнобилі” (Experimental Platform in Chernobyl, 2004-2008), що виконувалися протягом 2000-2008 рр. Інститутом геологічних наук НАН України у співпраці із Українським інститутом сільскогосподарської радіології (УкрНДІСГР) і Інститутом радіаційного захисту і ядерної безпеки (IPCH, Франція) було організовано дослідний полігон для комплексних гідрогеологічних і радіоекологічних досліджень міграції радіонуклідів із поховань радіоактивних відходів. У наступний період на полігоні виконувалися моніторингові спостереження за метеорологічними, гідрогеологічними, геохімічними і біогенними процесами міграції радіонуклідів в природно-техногенній екосистемі поховань радіоактивних відходів ПТЛРВ “Рудий ліс” (огляд відповідних досліджень представлено в підрозд. 1.4.2). З цією метою на полігоні були обладнані автоматизовані системи спостережень за метеорологічними параметрами і гідрофізичними характеристиками

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

Експериментальний полігон ІГН розташований на відстані 2,5 км на південний захід від ЧАЕС, в межах “західного” сліду викиду радіоактивних матеріалів, що сформувався внаслідок аварії на ЧАЕС 26.04.1986 р. (рис. 2.1). В межах полігону розташована траншея 22-Т, що була основним об’єктом радіоекологічних досліджень. Траншея 22-Т має довжину близько 70 м, ширину 5-6 м і глибину 2-3 м. В траншеї розміщені забруднені радіонуклідами матеріали: деревина, ґрунт, лісова підстілка.

2.2. Техногенні умови полігону

2.2.1. Історія створення ПТЛРВ

Основна частина пунктів тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) в зоні ЧАЕС була створена в 1987 р під час дезактиваційних робіт (рис. 2.2-2.3). На території площею біля 8 км^2, що прилягає до промплощадки ЧАЕС, було видалено верхній 10-20 см шар ґрунту, зрізано ліс і знесено будівлі. Вказані радіоактивні матеріали загальним об'ємом біля 10^6 м^3 були захороненні на місці в траншеї та «бурти» (насипи) з місцевого ґрунту. Всього було споруджено біля 800 подібних могильників.

Роботи по дезактивації території в 1987 р. проводили нашвидкуруч, без належної документації. В результаті, не було достовірно відомо розміщення окремих траншей на ділянках захоронень, їх конструктивних характеристик, характеристик захоронених РАВ, умов контакту з ґрунтовими водами. Починаючи з 1990 р. було розпочато дослідження з обстеження та інвентаризації захоронень РАВ у зоні відчуження ЧАЕС. Захоронення поблизу ЧАЕС віднесені до 6 основних пунктів: «Будбаза», «Рудий Ліс», «Янів», «Прип'ять», «Нафтобаза», «Піщане плато» (див. рис. 2.2).

Основними радіонуклідами, що формують запаси у вказаних ПТЛРВ, є : цезій-137, стронцій-90, плутоній-238, -239, -240, -241, амеріцій-241. Сумарна активність для сектору 2.1 ПТЛРВ «Рудий ліс» становить 3,74*10^{14} Бк (оцінка станом на 2011 р.) [UKRAINE NATIONAL REPORT, 2011].

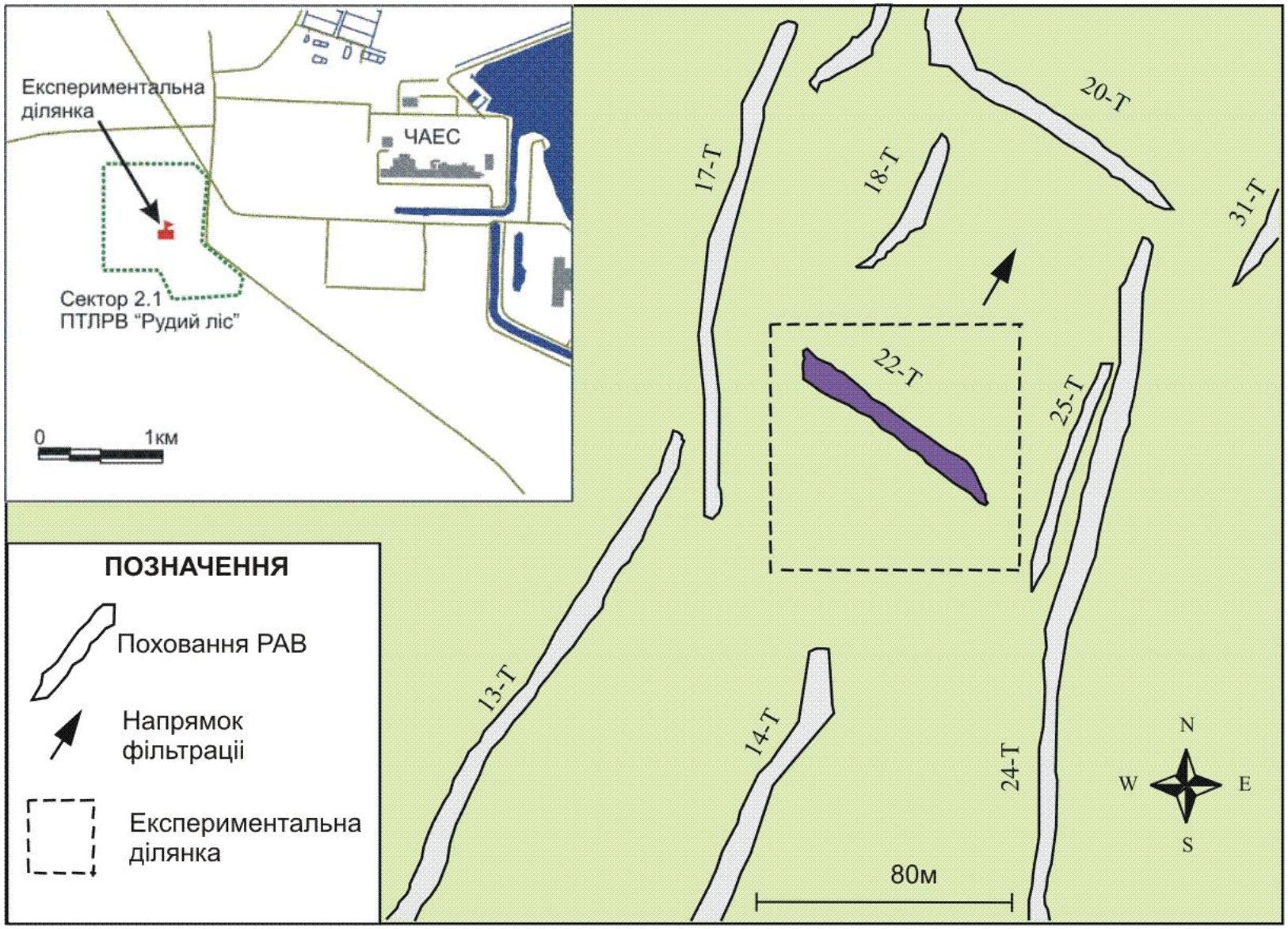
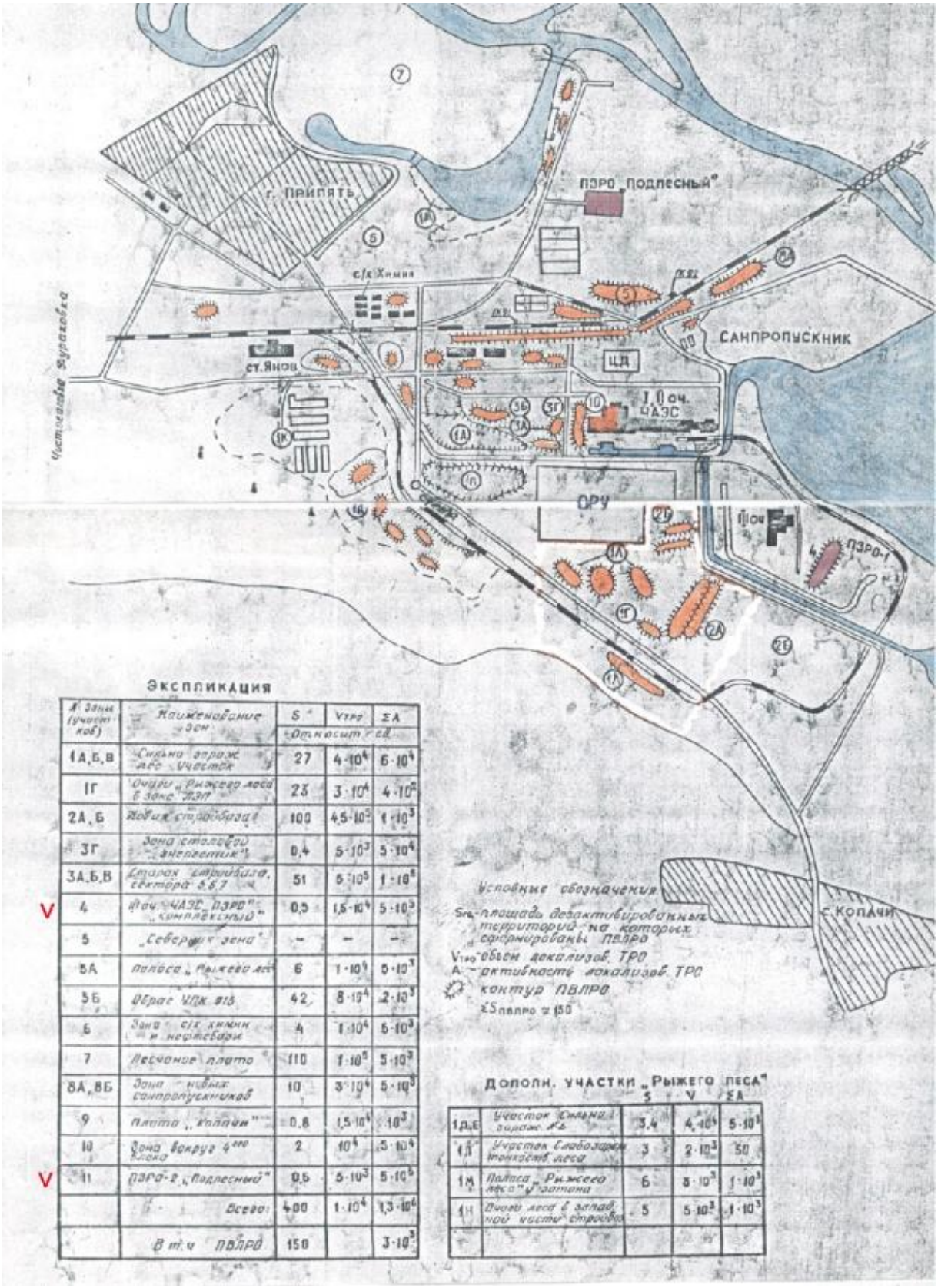


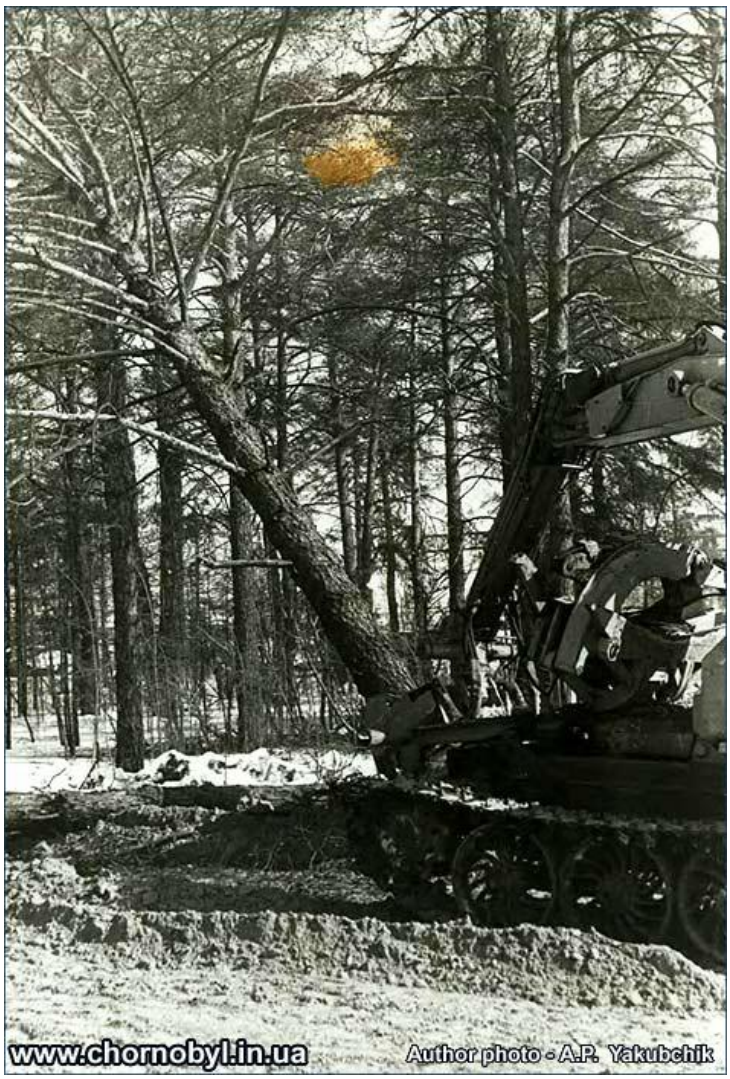
Рис. 2.1. Схема розташування дослідного полігону ІГН в ЧЗВ на ділянці поховання радіоактивних відходів (траншея 22-Т) [Кашпаров та ін., 2007].



№ зоны (участков)	Наименование зон	S	$V_{ТРО}$	ΣA
		Относит. ед.		
1А,Б,В	Сильно эрож. лес. Участок	27	$4\cdot10^4$	$6\cdot10^4$
1Г	Очаги „Рыжего леса" в зоне ЧАЭС	23	$3\cdot10^4$	$4\cdot10^2$
2А,Б	Новые стройобъекты	100	$4{,}5\cdot10^5$	$1\cdot10^3$
3Г	Зона столовой „Днепровск"	0,4	$5\cdot10^3$	$5\cdot10^4$
3А,Б,В	Старая стройбаза, сектора 5,6,7	51	$5\cdot10^5$	$1\cdot10^8$
V 4	1 оч. ЧАЭС, ПЗРО „комплексный"	0,5	$1{,}5\cdot10^4$	$5\cdot10^5$
5	„Северная" зона	–	–	–
5А	полоса „Рыжего леса"	6	$1\cdot10^5$	$5\cdot10^3$
5Б	Обрас УПК №13	42	$8\cdot10^4$	$2\cdot10^3$
6	Зона с/х химии и нефтебазы	4	$1\cdot10^4$	$5\cdot10^3$
7	Песчаное плато	110	$1\cdot10^5$	$5\cdot10^3$
8А,8Б	Зоны новых сапропускников	10	$3\cdot10^4$	$5\cdot10^3$
9	плато „Коллайн"	0,8	$1{,}5\cdot10^4$	10^3
10	Зона вокруг 4-го блока	2	10^4	$5\cdot10^4$
V 11	ПЗРО-2 „Подлесный"	0,5	$5\cdot10^3$	$5\cdot10^5$
	Всего:	400	$1\cdot10^4$	$1{,}3\cdot10^6$
	В т.ч. ПВЛРО	150		$3\cdot10^5$

		S	V	ΣA
1Д,Е	Участок Химии, эрож. №2	3,4	$4\cdot10^4$	$5\cdot10^3$
1Л	Участок Слободских тонкосвб. лесов	3	$2\cdot10^3$	50
1М	Полоса „Рыжего леса" у затона	6	$3\cdot10^3$	$1\cdot10^3$
1Н	Сосн. лес в запад. части стройбаз	5	$5\cdot10^3$	$1\cdot10^3$

Рис. 2.2. Схема 1987 р. розташування ПТЛРВ ближньої зони ЧАЕС [НИПИПТ, 1992]



(а)

(б)

Рис. 2.3. Зовнішній вигляд території «Рудого лісу»: (а) під час ліквідації деревостою, (б) одразу після створення ПТЛРВ в осінній період 1987 р. (www.chornobyl.in.ua).

ПТЛРВ “Рудий ліс” підходить до промплощадки ЧАЕС із західної та південно-західної сторін. До аварії тут зростав сосновий ліс площею біля 375 га. Об'єм деревної маси досяг у 1986 р. 50-53 тис $м^3$. Внаслідок аварії на ЧАЕС дерева отримали дозу 10-100 Гр, що призвело до загибелі всіх сосен. В ході робіт дерева були викорчувані та захоронені в могильники.

Площа сектора 2.1 складає 0,96 $км^2$, він займає південну та південно-західну околиці ПТЛРВ “Рудий ліс”. В межах сектора 2.1 за даними обстежень було виявлено 8 «буртів» і 49 траншей (рис. 2.4). Траншеї та «бурти» розміщені хаотично. Довжина окремих траншей складає від 24 до 440 м (в середньому 100-200 м), ширина – 8-12 м, глибина 1,5-3 м. Зверху захоронені матеріали (ґрунт, підстилка, деревина) перекриті шаром насипних пісків товщиною 0,2-0,8 м. Сумарний об'єм захоронених матеріалів оцінено в 10^5 $м^3$ при середній щільності 1,6 кг/$м^3$ [Джепо та ін., 1994].

В межі сектора 2.1 пунктів тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) «Рудий ліс» потрапляє траншея 22-Т. Траншея 22 є достатньо типовою, за результатами її досліджень можна робити висновки та узагальнення щодо інших траншей і сектора в цілому, з тією особливістю, що вона розміщена перпендикулярно до напрямку фільтрації підземних вод.

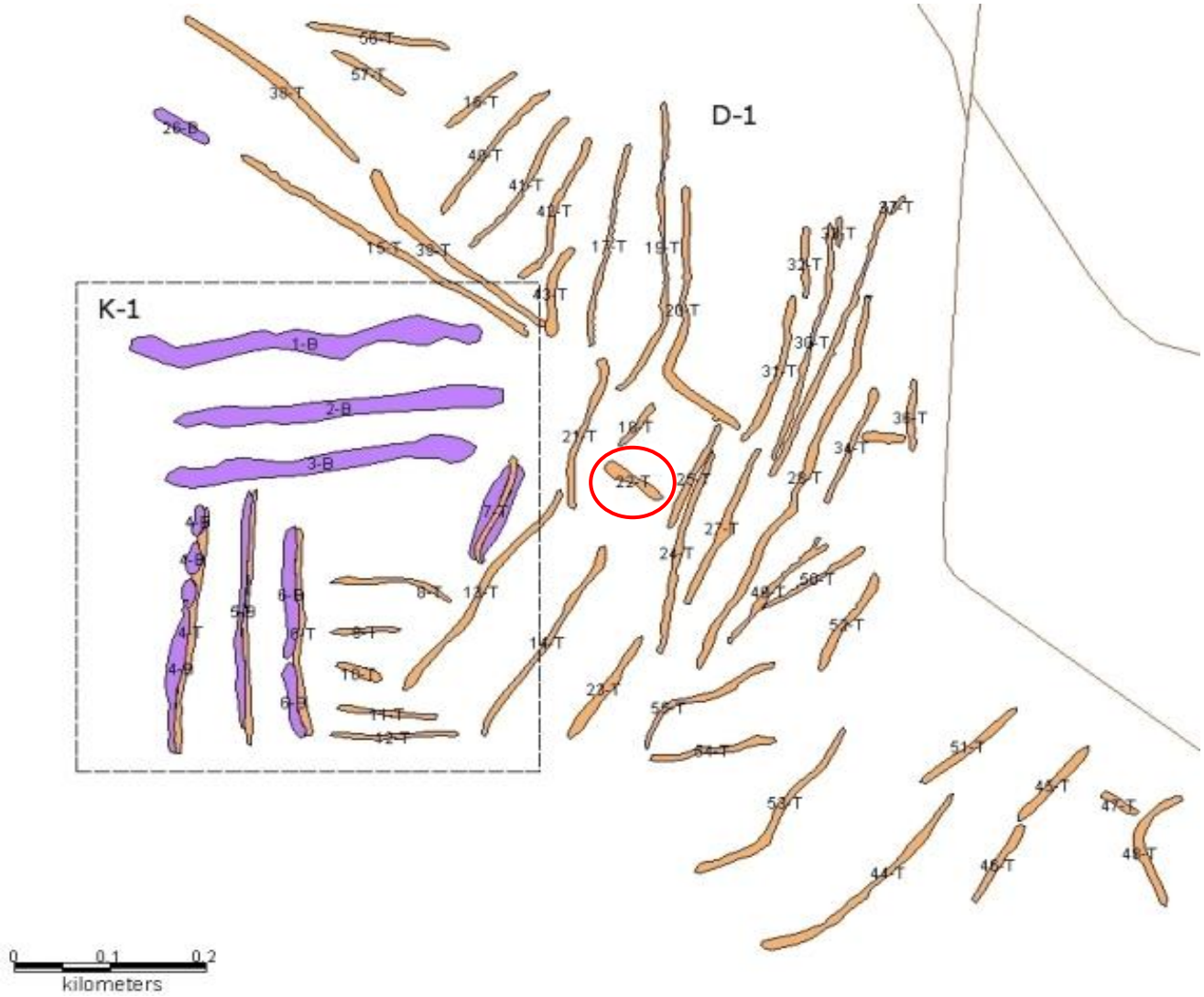


Рис. 2.4. Схема розташування окремих буртів і траншей в межах сектору 2.1 ПТЛРВ “Рудий ліс” (світло-коричневим показані контури траншей, фіолетовим – «буртів», розміщення траншеї 22-Т виділено червоним кружечком [НИПИПТ, 1992]).

2.2.2. Технологія поховання РАВ

Як було зазначено вище, в 1987 р. підрозділи цивільної оборони захоронили за допомогою інженерної військової техніки загиблі від радіоактивного ураження під час аварії на ЧАЕС соснові насадження (так званий «Рудий ліс») в траншеї та під насипи ("бурти") з місцевого піщаного ґрунту. Із застосуванням бульдозерної техніки повсюдно був видалений радіоактивно-забруднений поверхневий шар ґрунту товщиною близько 20 см. Радіоактивні матеріали являли собою забруднену аварійними випаданнями деревину, ґрунтовий шар, лісову підстилку, подекуди будівельне сміття (залишки дачних будинків, і залізничної станції “Янів”). Після завершення робіт із захоронення, територія ПТЛРВ була покрита екрануючим шаром відносно чистого піщаного ґрунту товщиною 20-50 см (для цього був використаний ґрунт, вибраний із траншей при їх спорудженні і ґрунт із кар’єру поблизу с. Копачі). Зовнішній вигляд території після проведення дезактиваційних робіт представлений на рис. 2.3.

Траншеї в ПТЛРВ не були обладнані інженерними гідроізолюючими бар'єрами та перетворилися з часом на осередки радіоактивного забруднення підземних вод радіонуклідами [Джепо та ін, 1994].

2.2.3. Опис структури порушеного ґрунтового профілю

Отже, внаслідок описаних вище інженерних заходів, на територіях ПТЛРВ сформувалася наступна будова порушеного ґрунтового профілю (рис.2.5):

1) в межах траншей (зверху вниз): шар «екрануючого» піщаного ґрунту (товщиною 20-50 см), тіло поховань (потужністю 1-3 м; переважно гумусоподібний ґрунт – знятий родючий шар ґрунту, перегниваючі рештки захороненого лісу, підстілки і ін.), підстилаючий їх первинний еоловий ґрунт;

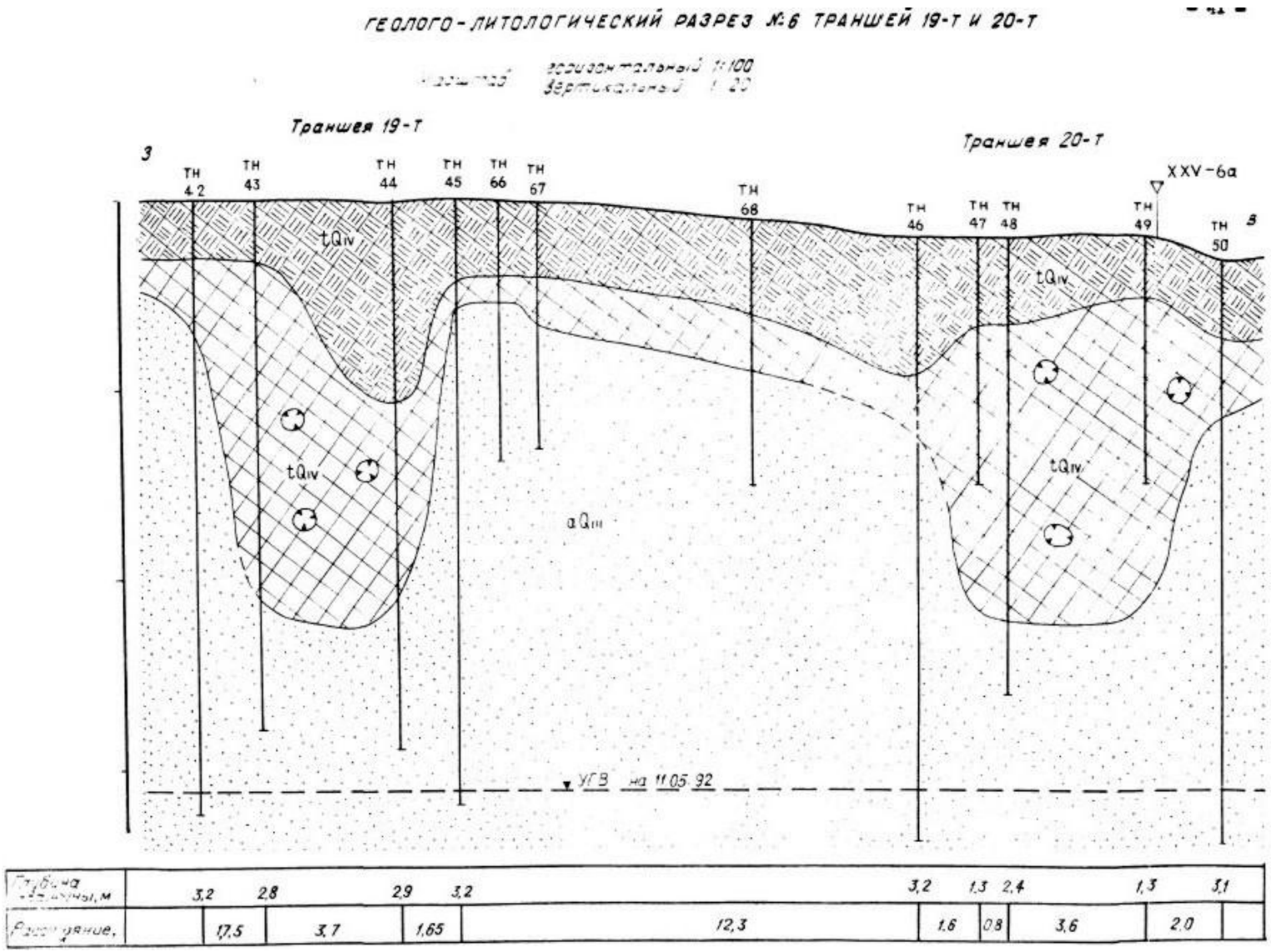


Рис. 2.5. Будова порушеного ґрунтового профілю ПТЛРВ “Рудий ліс”. На перерізі показано: шар ґрунтового екрану, тіло траншей №№19, 20 та забруднені ґрунти між траншеями, первинні ґрунти, свердловини для обстеження [Кедровский и др. (НИПИПТ), 1991].

2) за межами траншей (зверху вниз): шар «екрануючого» піщаного ґрунту (потужністю 20-50 см), залишки збагаченого органікою не до кінця видаленого «гумусованого» первинного ґрунту (потужність від кількох сантиметрів до кількох десятків сантиметрів; рівень денної поверхні 1986 р.), первинні еолові ґрунти.

Слід зазначити, що внаслідок дезактиваційних робіт поверхневий родючий шар ґрунту був майже повністю видалений та накритий екрануючим шаром. Це призвело в перші роки після створення ПТЛРВ до вітрового підйому пилу, вітрової і водної ерозії поверхневого екрануючого шару ґрунту.

2.2.4. Лісонасадження для попередження вітрової ресуспензії і водної ерозії поверхневого шару ґрунту

В 1988-89 рр. на території секторів ПТЛРВ були виконані лісопосадки (для попередження водної і вітрової ерозії поверхневого шару ґрунту), в результаті чого ділянка набула сучасного вигляду [Кашпаров та ін., 2007].

Рослинність дослідного полігону характерна для всього ПТЛРВ «Рудий ліс» та представлена: сосною звичайною, березою, кущами та травами. Загальна площа траншеї № 22 становить близько 400 м^2. За результатами попереднього дослідження, проведеного УкрНДІСГР у 1999-2000 рр., в межах цього району було 47 сосен, 14 беріз і 49 кущів; близько 30 м^2 поверхні траншеї було покрито травою. Спільне дослідження УкрНДІСГР–IRSN 2005 р. дало наступну середню оцінку щільності посадки хвойних дерев для всього району дезактивації: 3300 дерев на 1 га з найменшими значеннями 800–1500 дерев на 1 га; для берези середня щільність оцінювалася як прибл. 100 дерев на 1 га [Thiry et al., 2009].

Варто відмітити, що щільність рослинності та її склад на території ПТЛРВ бідніші ніж у природних лісах Прип'ятського полісся, оскільки соснові та березові насадження, в ПТЛРВ були виконані розрідженими смугами. Крім того на території ПТЛРВ відсутній родючий шар ґрунту, який було захоронено в траншеї, а замість нього територія вкрита піском, який досить повільно вкривався новою рослинністю.

Отже, природно-техногенна екосистема ПТЛРВ «Рудий ліс» характеризується особливою будовою ґрунтового профілю та характером рослинного покрову.

В траншеях та буртах захоронено переважно поверхневий шар ґрунту, лісову підстілку і органічні рештки лісової рослинності, забрудненої радіонуклідами.

В ґрунтовому профілі за межами траншей також присутні залишки не до кінця видаленого гумусованого шару ґрунту, що є джерелом радіаційного забруднення геологічного середовища. Наново створений поверхневий шар ґрунтового профілю складений бідними на поживні речовини пісками , що спричиняє відносно повільний розвиток рослинного покрову. Можна очікувати, що літологічні відмінності новоствореного поверхневого шару (менший вміст тонких фракцій і органічної речовини) впливають на гідрофізичні властивості ґрунту у порівнянні з первинним ґрунтовим профілем.

Можна очікувати, що перелічені вище фактори впливають на складові водного балансу ґрунтів природно-техногенної системи ПТЛРВ “Рудий ліс” у порівнянні з непорушеними природними лісовими (або луговими) екосистемами Полісся. Зокрема евапотранспірація вологи рослинністю в досліджуваних умовах може суттєво відрізнятися від природних екосистем Прип'ятського полісся внаслідок зміни літологічних властивостей поверхневого шару ґрунту і менш щільного і розвиненого рослинного покрову.

2.3. Природні умови полігону

2.3.1. Кліматичні умови

Територія полігону відноситься до зони помірно-континентального клімату з позитивним балансом вологи (річна кількість опадів більше величини випаровування). Характерними є м’яка зима, тепле та вологе літо. Середньорічна температура повітря становить + 6,8^{o} С. Осередненні дані багаторічних спостережень: вологість повітря (відносна) – 77 %; сума опадів на рік – 600 мм; випаровування з поверхні землі на рік – 400 мм.

Зима характеризується частими відлигами, нестійким сніговим покривом, заметілями і опадами у вигляді переохолодженого дощу і мокрого снігу, ожеледями. Найхолоднішим місяцем є січень (середня температура – 6,8^0 С). Переважають вітри зі швидкістю 4,5-5,0 м/с, швидкості понад 10 м/с частіше відзначаються в лютому. Сніговий покров утримується протягом січня-березня; кількість днів із сніговим покривом – 52-116. Період із середньою добовою температурою нижче +8° С становить 192 дні. Глибина поширення температури 0° С в ґрунт коливається від 0 до 70 см, максимум досягає 128 см.

Весна, на фоні значних коливань тепла і холоду, характеризується активним підйомом температури, інтенсивним таненням снігового покриву і швидким просиханням ґрунту. Початок весни припадає на березень, у травні встановлюється погода літнього типу. Друга половина весни характеризується великою кількістю гроз і підвищенням абсолютної вологості повітря.

Літо встановлюється в середині травня і продовжується до середини вересня. Влітку панують північно-західні вітри, середньомісячні швидкості їх знижуються порівняно з іншими сезонами року до 3-4 м/с. На літо припадає основна кількість опадів (73%); характерні зливи, що нерідко перевищують середню місячну кількість опадів.

Осінь наступає в середині вересня і продовжується до середини листопада. Для осені характерне швидке зниження температури повітря (від місяця до місяця на 5-7 ^{o}С), зменшення абсолютної вологості і поява приморозків у першій половині жовтня [Dzhepo and Skals’skii, 2002].

Якщо врахувати дані накопичені автоматичною метеостанцією (теплий період року) полігону, то в період дисертаційних досліджень (2000-2012 рр.) середня кількість опадів становила 630 мм/рік (коливалася в межах 470-790 мм/рік).

2.3.2. Геоморфологія та геологія

2.3.2.1. Геоморфологічні умови

Загалом, ближня зона ЧАЕС приурочена до пліоценової і четвертинної долин р. Прип'ять (рис. 2.6). У геоморфологічному відношенні це алювіальна рівнина, представлена двома рівнями терас: першою надзаплавною і заплавною. Абсолютні відмітки поверхні змінюються від 103 до 118 м над рівнем моря за БСВ (Балтійська Система Висот), тобто амплітуда рельєфу складає 15 м. Заплавна тераса на рис. 6. виділена сіро-зеленим кольором й індексом – „3". Має висотні відмітки 103-110 м БСВ. Абсолютні відмітки майже плоскої поверхні першої надзаплавної тераси високого рівня змінюються від 112 до 114 м за БСВ. Виділяється більш низька центральна частина району та трохи підвищена призаплавна частина. Відмітки 115-118 м зустрічаються в найбільш високій частині піщаних еолових форм рельєфу, що приурочені до призаплавної частини тераси та її брівки. Інших форм рельєфу, що ускладнюють поверхню тераси, немає. Виняток складають вузькі і короткі ерозійні вибоїни, що розташовані на бровці тераси в районі колишнього села Копачі. Терасу (рис. 2.6), якщо взяти до уваги деякі відмінності в гранулометричних характеристиках четвертинних відкладів й історію утворення, можна підрозділити на райони: периферійний (район з індексом 1), а також центральний і призаплавний (район з індексом 2).

Перша надзаплавна тераса на півдні і південному заході обмежується Чистогалівським пасмом, що має флювіогляціальне походження. Схили Чистогалівського пасма положисті, а його максимальні висотні відмітки в межах ближньої зони досягають 161 м БСВ (рис. 2.6) [Скальський та ін, 1999].

Експериментальний полігон у геоморфологічному відношенні знаходиться в центральній частині першої тераси р. Прип'ять. Його висота над рівнем моря (за Балтійською системою висот – БСВ) становить 112-115 м [Бугай та ін., 2007] (рис. 2.7).

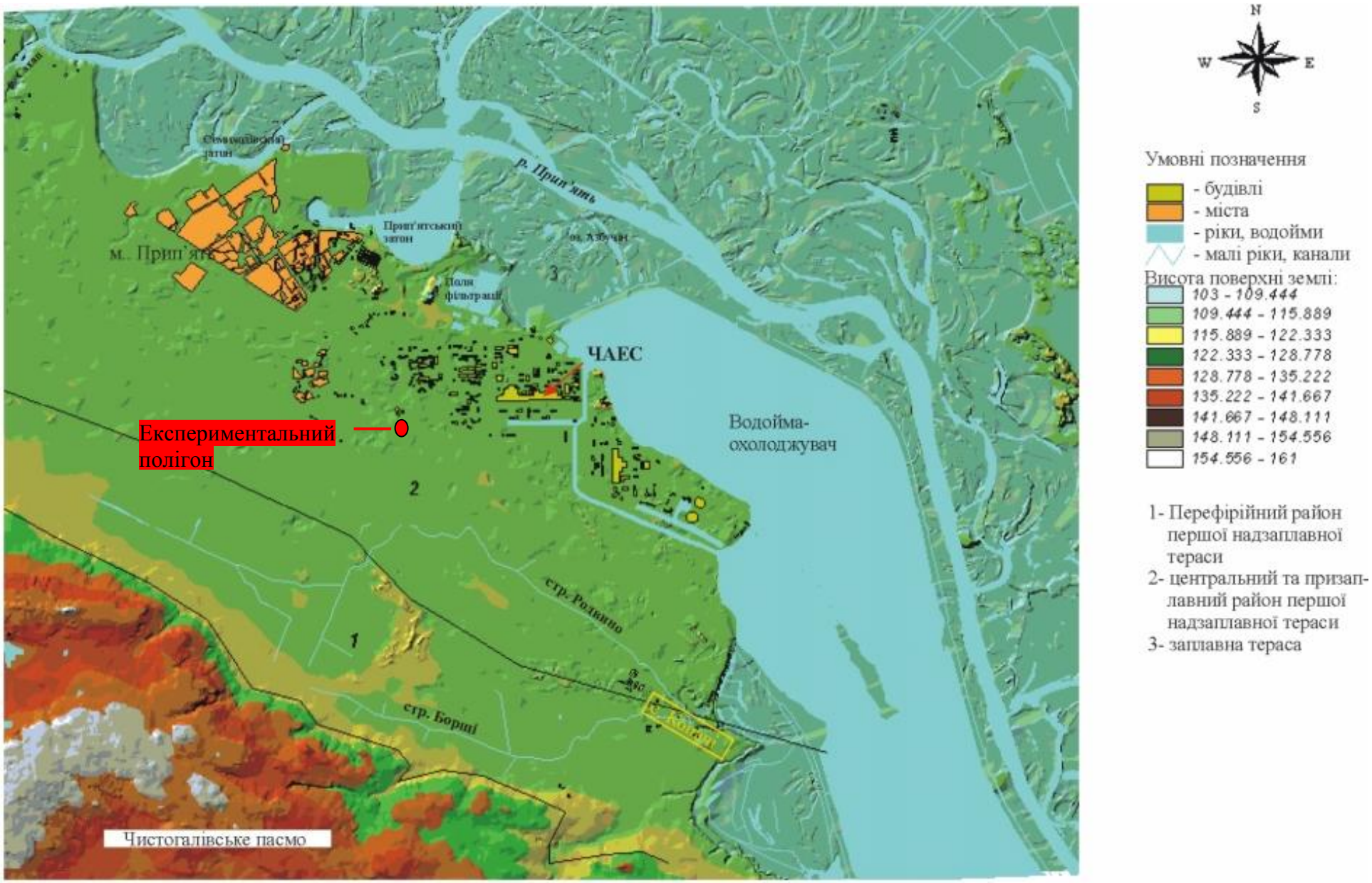


Рис. 2.6. Рельєф і водні об’єкти ближньої зони ЧАЕС [Скальський та ін, 1999]

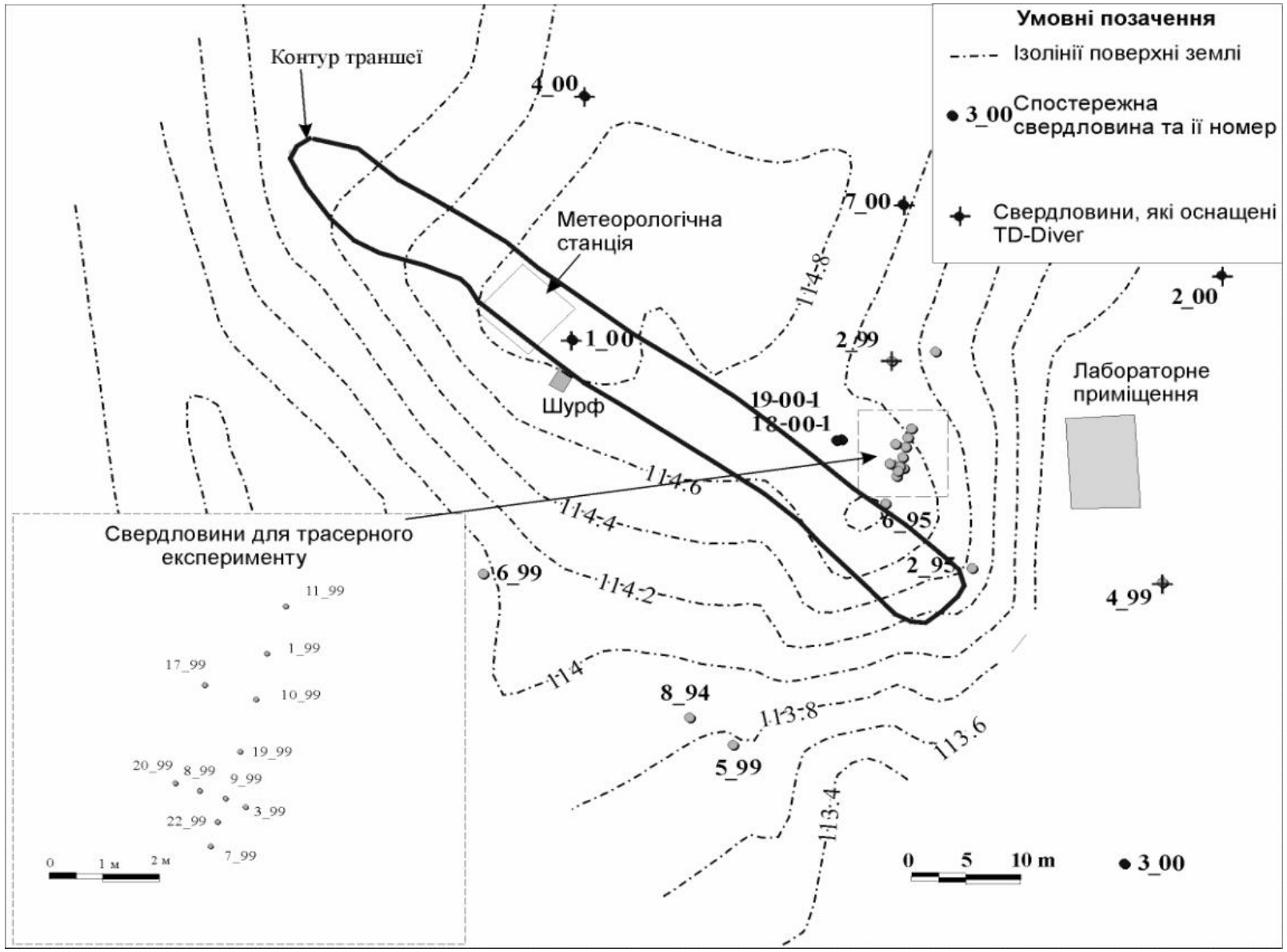


Рис. 2.7. Карта-схема експериментального полігону ІГН НАНУ в ЧЗВ з вказаними ізолініями рельєфу та елементами моніторингової мережі.

2.3.2.2. Геологія ближньої зони ЧАЕС

У геологічному розрізі ближньої зони ЧАЕС [Скальський та ін, 1999] виділяються кристалічні породи докембрійського фундаменту, осадовий комплекс мезозойських і кайнозойських відкладів. Потужність осадового чохла досліджуваної території досягає 350 м.

Мезозойські відклади**.** Мезозойська група подана відкладами юрської і крейдової системи. Поверхня мезозойських відкладів у районі досліджень залягає на відмітках близьких до нульового за БСВ.

Юрська система (J) подана середнім відділом (байоський і батський яруси) і верхнім відділом (келовейський і оксфордський яруси).

Байоський ярус (J_2b) утворений відкладами дрібнозернистих пісків із лінзами та прошарками пісковиків і піщанистих глин потужністю 20-40 м. Батський ярус (J_2bt) утворений відкладами сірих тонковерствуватих глин потужністю 20-40 м.

Відклади келовейського ярусу (J_3kl) являють собою переверствування глин, пористих вапняків, мергелів, пісковиків і пісків із повільними переходами між літологічними різновидами як по простяганню так і в розрізі. Потужність відкладів варіює від 0,5 до 40 м. Оксфордський ярус (J_3o) утворений пісковиками, вапняками з прошарками та лінзами піску та глин. Потужність товщі досягає 30 м.

Крейдова система представлена нижнім (альбський ярус) і верхнім (сеноманський, туронський, коньякський, а місцями компанський і маастрихтський яруси) відділами.

Нижньокрейдові відклади альбського ярусу (K_1alb) зустрічаються спорадично і залягають на верхньоюрських утвореннях. Вони представлені різнозернистими, іноді гравелистими, пісками, алевритами, рідше глинами. Їхня потужність складає не більше 10-15 м.

Верхньокрейдові сеноманські відклади (K_2s) представлені зеленувато-сірими кварц- глауконітовими переважно дрібнозернистими пісками, пісковиками й алевритами. Їхня потужність не перевищує 50 м. Верхньокрейдова товща турон-маастрихту (K_2t+m), що об'єднує маастрихтський, туронський і коньякський яруси представлена писальною

крейдою і крейдоподібним мергелем із лінзами пісків. Її потужність складає 50-70 м. Ця товща слабопроникна.

Кайнозойські відклади**.** Кайнозойська група представлена відкладами палеогенової, неогенової і четвертинної систем.

Палеогенова система (P) включає канівську та бучацьку серії і київську світу (еоценові відклади), а також харківську світу (олігоценові відклади).

Відклади канівської серії (P_2kn) трансгресивно залягають на верхньокрейдових відкладах. Вони представлені дрібнозернистими пісками з прошарками алевритів і аргілітоподібних чорних і темно-сірих глин. Їхня потужність на території складає 15-17 м. Дані відклади в досліджуваному районі розкриті свердловинами на абсолютних відмітках 40-50 м БСВ.

Відклади бучацької серії (P_2bč) характеризуються повсюдним розвитком і залягають на відкладах канівської світи. Вони представлені світлими різнозернистими пісками з малопотужними прошарками пісковиків і алевритів. У досліджуваному районі відклади розкриті свердловинами на глибинах 83-86 м БСВ. Їхня потужність складає 20-30 м.

Відклади київської світи (P_2kv) повсюдно розвинуті на досліджуваній території і представлені переважно вапняковистими мергелями. За межами досліджуваної території в західному і північно-західному напрямках відклади київської світи місцями фаціально заміщуються глинами або пісковиками. Її потужність варіює від 0 до 25 м. Найбільші значення потужності відкладів характерні для північно-східних і північно-західних районів досліджуваної території. Мергельні відклади практично розмиті на ділянках з абсолютними відмітками 74-76 м по БСВ. Ці ділянки розташовані в районі р. Прип’ять, у районі ЧАЕС і в районі злиття струмків Родвино і Борщі.

Відклади межигірсько-обухівської світи (P_2 mž-ob) зустрічаються за межами ближньої зони на захід і південь від досліджуваної території. Вони представлені алевритами з прошарками піску і піщаниками. Їхня потужність досягає 10-15 м.

Пліоцен-четвертинні відклади**.** Підошва пліоцен-четвертинної (N_2-Q) товщі розташовується переважно на відмітках 80-86 м БСВ, а товщина шару відкладів складає 30-33 м. Через східну частину району, що розглядається,

простягається вузька улоговина древнього похованого рельєфу, днище якої знаходиться на 3-10 м нижче підошви пліоцен-четвертинної товщі на прилягаючих ділянках. У розрізах трьох свердловин там зафіксована відсутність відкладів київської світи, які розмиті. Четвертинні відклади там мають більшу товщину (до 45 м) і підстилаються пісками бучацької серії палеогену. Улоговина має в плані складний малюнок, що нагадує яружну мережу.

Розріз пліоцен-четвертинної товщі достатньо однорідний. На пліоценових і нижньонеоплейстоценових алювіальних відкладах залягає комплекс алювіальних відкладів верхнього-неоплейстоцену-голоцену, який у свою чергу перекривається еоловими пісками пізньоплейстоцен-голоценового віку.

Передбачається, що в межах улоговини захороненого рельєфу, про яку було сказано раніше, геологічний розріз ускладнюється. Нижче підошви верхньонеоплейстоценово-голоценових відкладів він представлений товщею еоплейстоцен- і нижньо-неоплейстоценових відкладів, тоді як пліоценові відклади там розмиті.

На рис. 2.8 поданий геолого-геоморфологічний профіль ближньої зони ЧАЕС (св. 1-98 розміщена на дослідному полігоні). На цьому профілі узагальнена геологічна інформація району досліджень. Звернемо увагу на уявні лінії розривних порушень, які характеризують найбільш значні розлами, що проходять по досліджуваній території. На правому березі р. Прип’ять є древня ерозійна улоговина у відкладах київського ярусу [Скальський та ін, 1999].

2.3.2.3. Об’єктні геологічні умови

На експериментальному полігоні ПТЛРВ „Рудий ліс” верхня частина геологічного розрізу складається з піщаних верхньоплейстоценових і голоценових відкладів, що підрозділяються на алювіальну (тобто генетично обумовлену річковими седиментаційними процесами) і еолову (вітровий перенос) свити відкладів, які перекриті в багатьох місцях техногенними відкладами (переміщені при дезактивації ґрунти, будівельне сміття, і т. ін.). Загальна потужність цих відкладів сягає ~ 30 м. Нижче залягає регіональна слабопроникна товща, що складається з мергелів (карбонатних глин) київської світи еоцену (рис. 2.8) [Matoshko et al, 2004].

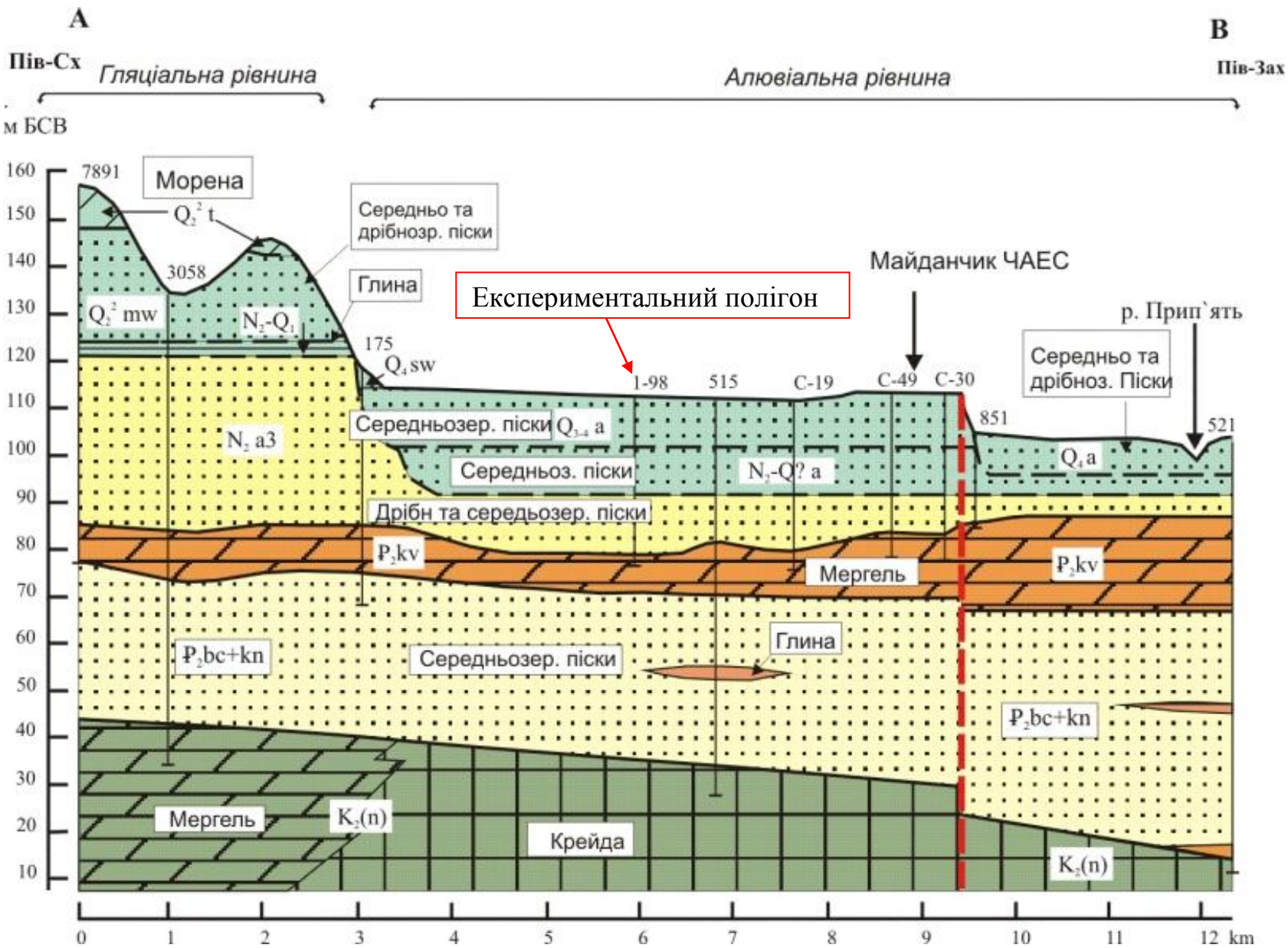


Рис. 2.8. Геологічний розріз ближньої зони ЧАЕС (за даними Матошко А.В. [Matoshko et al, 2004]).

Стратиграфічні позначення горних пород і відкладень

Q_4 Голоценові

Q_{3-4} Верхнєплейстоцен-голоценові

Q_2^2 середнєплейстоценові (середня ланка) дніпровські

Q_{1-2} нижнєплейстоцен - середнєплейстоценові

N_2 Верхнєпліоценові

P_2kv еоценові києвськоі свиты

P_2bc еоценові бучакської свити

$K_2(n)$ верхнєкрайдові нерозчленовані

1,2 (a, t, mw) умовні позначення свит четвертинних алювіальних, моренних и воднольодникових відкладень

$3_{(1,2)}$, 4 a умовні позначення: серій (великі цифри); свит (маленькі цифри) верхнєплиоценових алювіальних відкладень

Геологічні межі

встановлені між стратиграфічними горизонтами

уявні між стратиграфічними горизонтами

встановлені між літологичними різнвидами

фаціальне заміщення

Літолого-петрографічні обозначення горных пород і відкладень

Піски

Алеврити (супіски-суглинки)

Діаміктони (морени)

Гліны

Карбонатні алеврити и гліны (мергелі)

Крейда

Перешарування піску і алевритів

Торф, піски та алеврити с торфом

Включення гравію, гальки

Генетичні позначення

a - алювіальні відкладнення
eol - еолові відкладення
t - морени
mw - воднольодовікові відкладнення
sw - делювіально-пролювіальні відкладнення
b - біогенні відкладнення
e - елювіальні утворення

Фаціальні позначення алювіальних відкладень

ch - руслова фація
ob - заплавна фація
dch - старична фація

Інші позначення

992 розташування свердловини на розрізі, її номер (зверху) і її забой (знизу)

! передбачені розривні тектонічні порушення

Геоморфологічні позначення

1 - льодовиковий плоский и хвилястий рельєф середнєплейстоценового (дніпровського) віку;
2 - кутовий масив і гряда морен напору середнєплейстоценового (дніпровського) віку;
3-5 - перша надзаплавна тераса високого ровню позднєплейстоцен-голоценова: 3 - делювіально-пролювіальний шлейф, 4 - плоска площина терасы, 5 - еоловий масив; 6 - надзаплавна голоценова тераса.

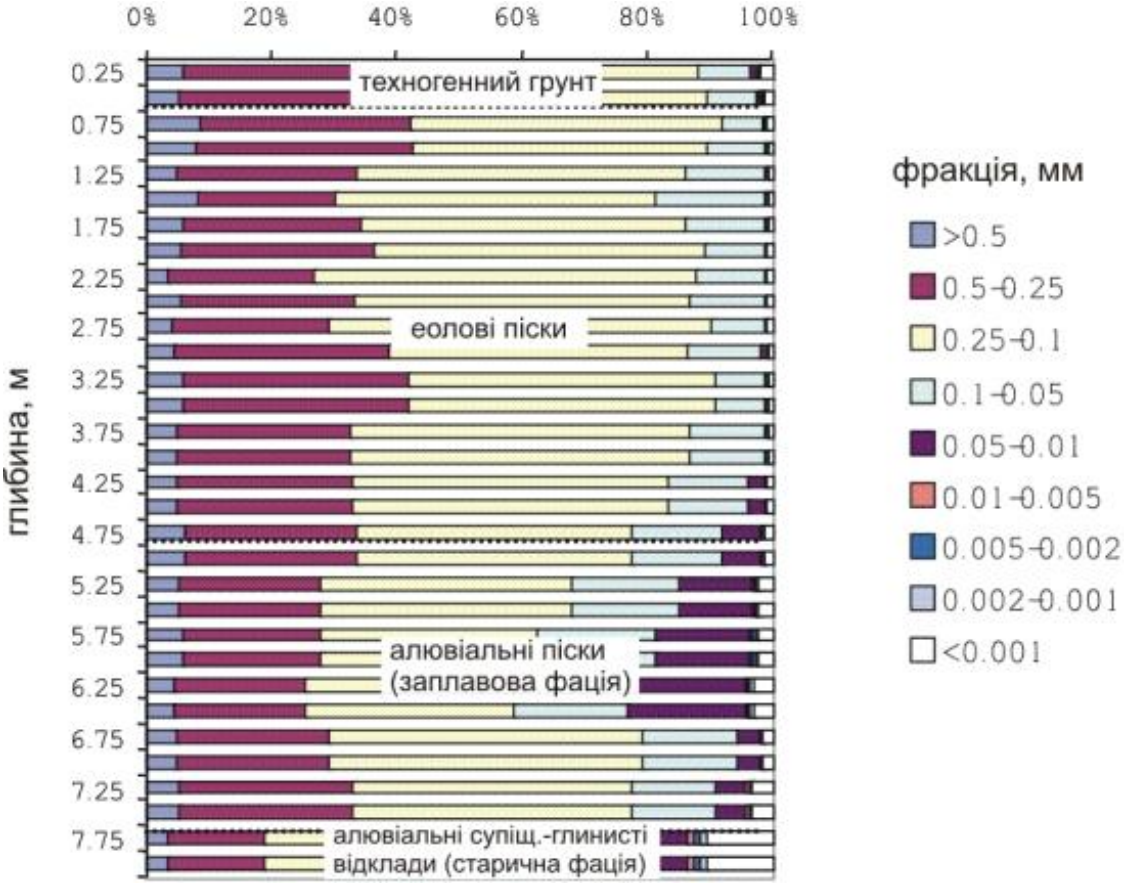
Рис. 2.9. Умовні позначення до геологічного розрізу ближньої зони ЧАЕС (див. рис. 2.8). [Matoshko et al, 2004].

2.3.3. Літологічні властивості ґрунтів зони аерації та безнапірного водоносного горизонту

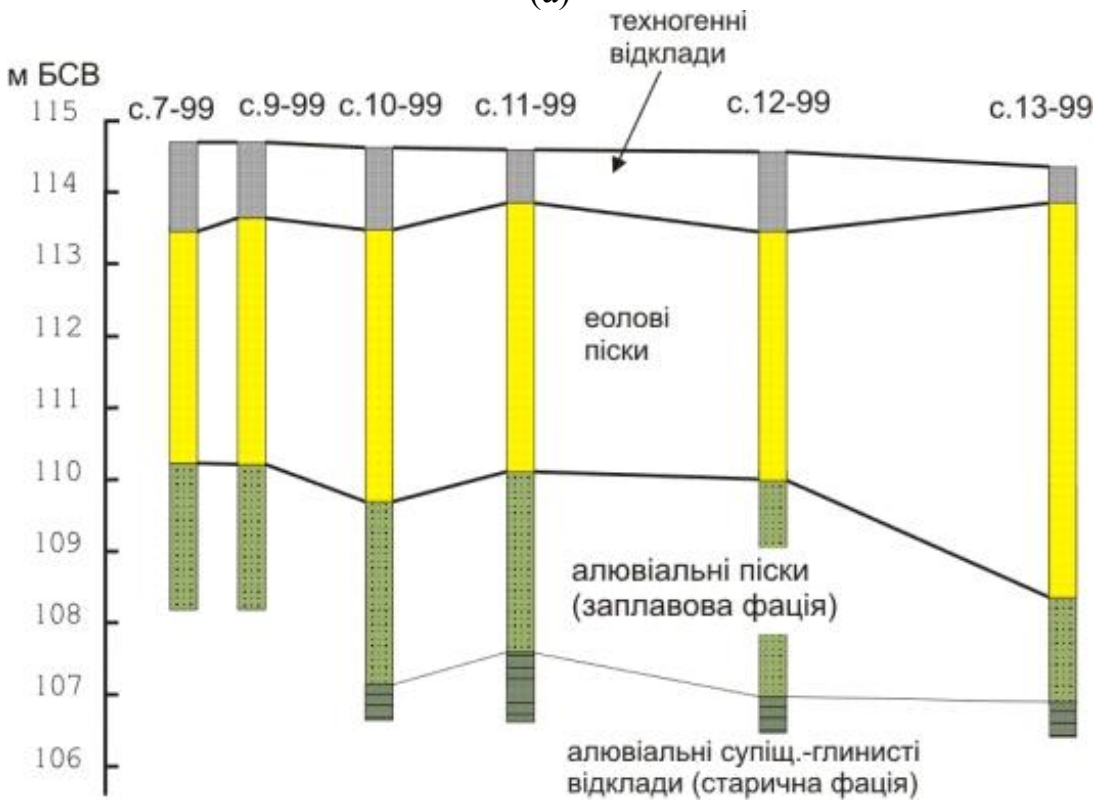
Детальні дані про геологічну будови верхньої частини експериментальної ділянки були одержані на основі аналізу керну пробурених на ділянці гідрогеологічних свердловин глибиною до 8 м (рис. 2.10) [Бугай та ін., 2007]. За результатами гранулометричного аналізу складу відкладів були побудовані профільні діаграми, що дозволили виділити різні генетичні типи відкладів (рис. 2.10-а). Загалом виділено чотири пачки відкладів (зверху вниз, рис. 2.10-б):

(1) – техногенні відклади (переміщений при дезактивації або сучасний лісовий ґрунт «in situ»; до глибини 0,5-0,8 м); (2) – еолові піщані відклади (добре відсортовані мілко-середньозернисті піски з вмістом глинистих фракцій <1%, до глибини 4-5 м); (3) – піщані алювіальні заплавові відкладення (вміст глинистих фракцій до 8%, глибина підошви 7-7,5 м); (4) – супіщано-глинисті алювіальні старичні відклади (з підвищеним вмістом мілких фракцій; з'являються в нижній частині розрізу і до глибини 8 м). За даними буріння глибоких стаціонарних свердловин регіональної мережі, в нижній частині розрізу (від глибини 8-10 м до крівлі шару київських мергелів) залягають алювіальні відклади руслової фації, що представлені добре відсортованими середньозернистими пісками із низьким вмістом глинистих фракцій.

Пористість піщаних відкладів зони аерації і водоносного горизонту на експериментальній ділянці складає від 33 до 42%, а щільність – від 1,6 до 1,72 г/см^3. Мінімальні величини пористості характерні для еолових пісків, а максимальні – для алювіальних старичних відкладів. Мінералогічний склад відкладів представлений в основному кварцом, з домішками польових шпатів (до 5-9%) і акцесорних мінералів (< 0,5%). Різні літологічні властивості еолових і алювіальних відкладів (зокрема, підвищений вміст глинистих фракцій в алювії) обумовлюють різні **фільтраційні властивості** цих відкладів [Бугай и др., 2001; Bugai and Dewiere, 2004; Matoshko et al., 2004].



(а)



(б)

Рис. 2.10. Геологічна будова експериментальної ділянки: (а) типова гранулометрична діаграма розрізу свердловини; (б) геологічний розріз за профілем свердловин (їх розміщення див рис. 8) [Бугай та ін., 2007].

2.3.4. Гідрогеологічні умови

На дослідній ділянці в районі траншеї №22 ПТЛРВ “Рудий ліс” безнапірний водоносний горизонт залягає в четвертинних еолових і алювіальних піщаних відкладах загальною потужністю 25-30 м. Вказані відклади підстилаються слабопроникними еоценовими мергелями, які є першою регіональною слабо проникною товщею. Експериментальна ділянка розташована в області транзиту потоку ґрунтових вод, направленого з району підвищень Чистогалівської моренної гряди (межиріччя р. Вуж і Прип’ять) у бік основного контуру розвантаження – р. Прип’ять (рис. 2.11).

Гідрограф РҐВ по свердловині експериментальної ділянки в 2000-2004 рр., одержаний за допомогою автоматичного датчику тиску TD-Diver, фірми Eijkelkamp (Netherlands) (інтервал вимірів 6 год.), наведено на рис. 2.12 (режим РҐВ за весь період дисертаційних досліджень (2000-2012 рр.) приведено в Додатку А). Режим РҐВ характеризується добре вираженими сезонними циклами підйому і спаду (рецесії). Основний підйом РҐВ зазвичай спостерігається в кінці зими – на початку весни (лютий – квітень) внаслідок танення снігу і весняних дощів. В період з кінця весни до початку зими як правило спостерігається рецесія РҐВ, обумовлена зменшенням інфільтраційного живлення внаслідок зростання евапотранспірації вологи в літні місяці (за рахунок більш високих температур повітря, сезонного розвитку рослинності, і т.ін.). Окремі великі зливи в літні місяці також можуть призвести до “залпової” інфільтрації вологи і підйомів РҐВ. Спостерігається хороший зв'язок РҐВ з дощовими опадами. Підйом РҐВ після істотних опадів починається практично відразу, а максимум рівня досягається через 5-10 діб. Сезонні коливання РҐВ зазвичай складають близько 1 м.

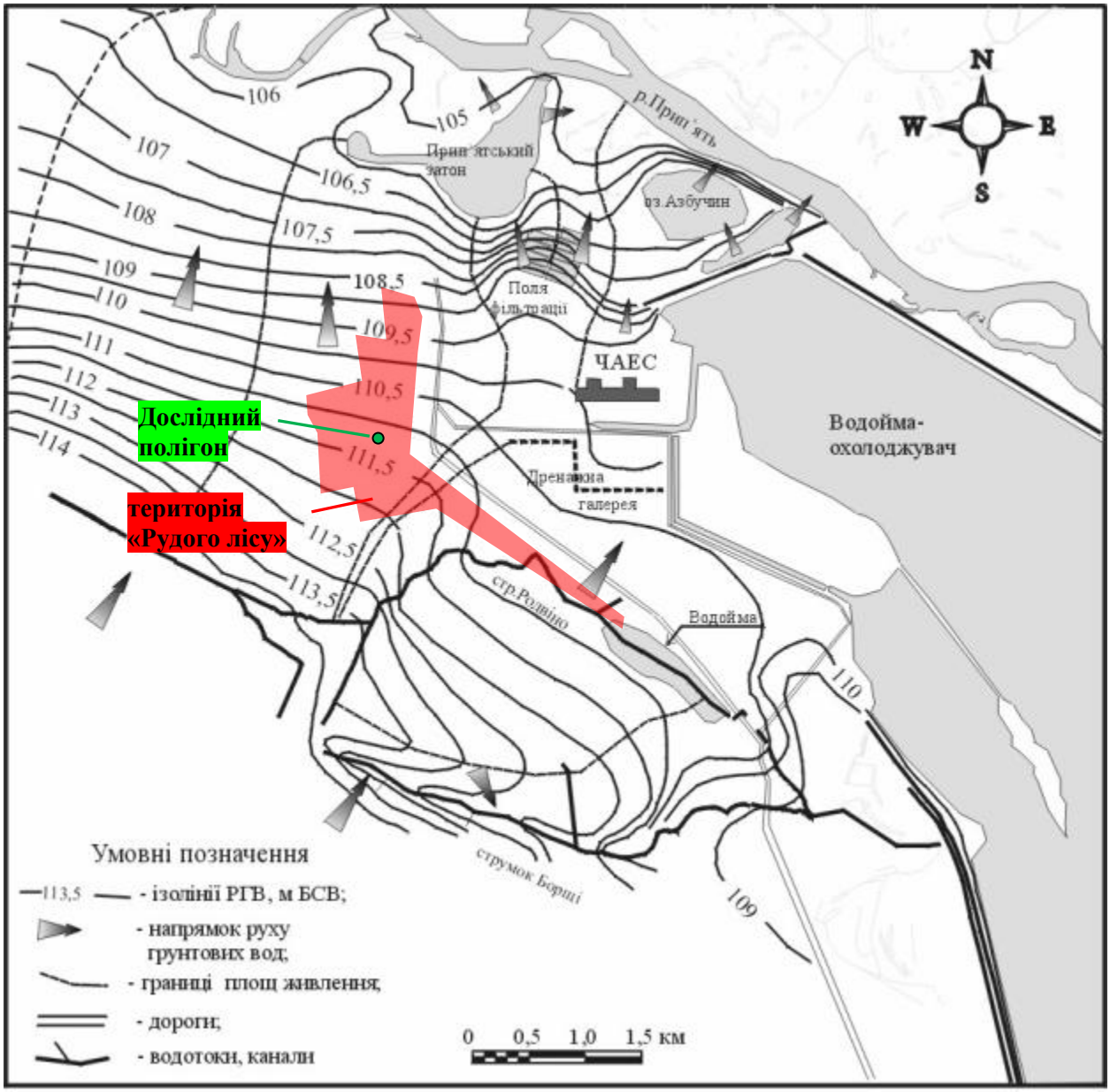


Рис. 2.11. Схема гідроізогіпс і напрямків руху ґрунтових вод в ближній зоні ЧАЕС (за даними ДП РАДЕК, ІГН НАНУ, серпень 1995 р.) [Bugai and Deviere, 2004].

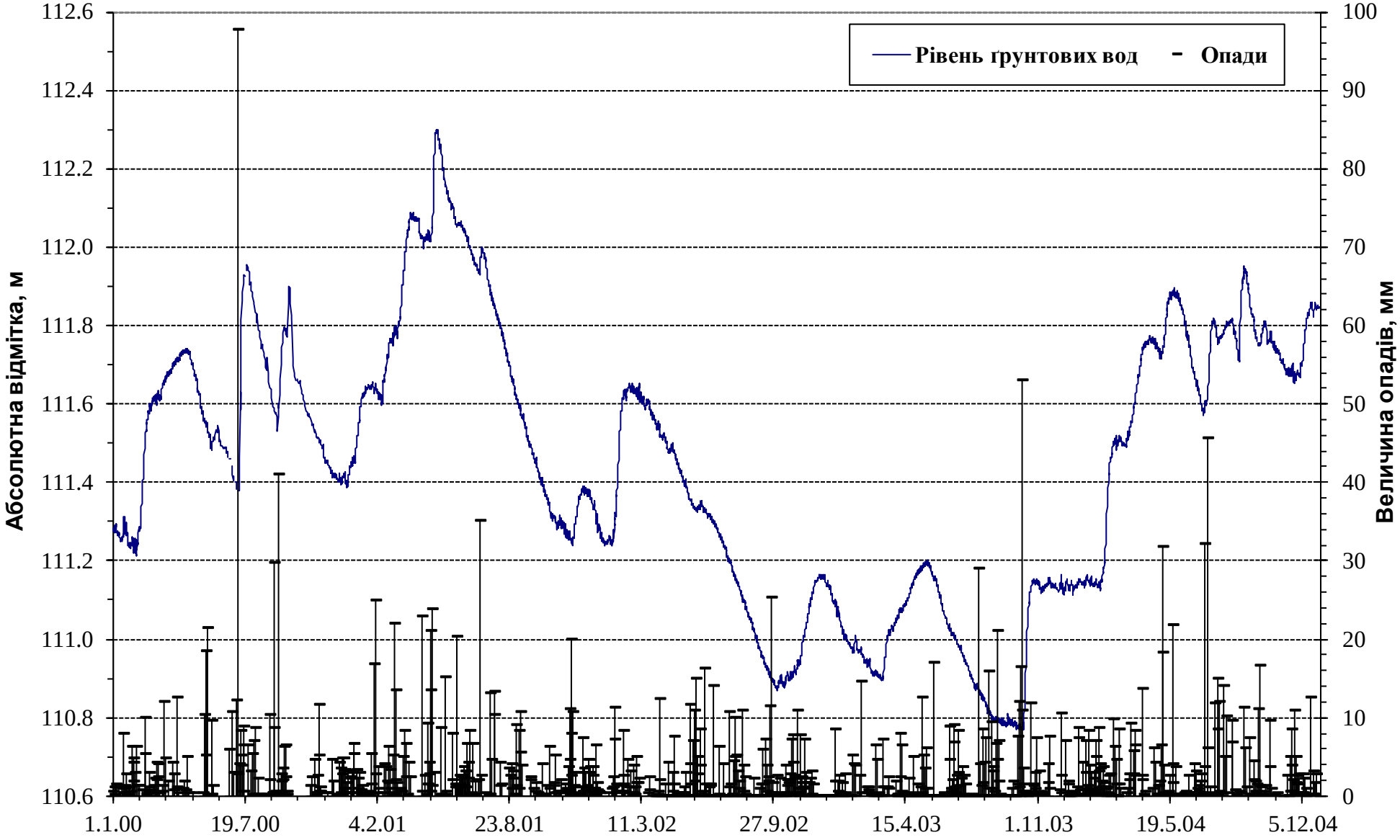


Рис. 2.12. Режим рівня ґрунтових вод експериментального полігону в 2000-2004 рр.

На території експериментального полігону (на ділянці ПТЛРВ „Рудий ліс”) за даними спостережень в періоди стійкої рецесії (спаду рівня) фільтрація ґрунтових вод орієнтована на північ – північ-схід, і латеральний градієнт напору складає 0,001-0,0015 м/м. В періоди інтенсивного інфільтраційного живлення ґрунтових вод латеральний градієнт зростає до 0,002-0,003 м/м, і відбувається переорієнтація напряму фільтрації ґрунтових вод на північ – північ-захід. Амплітуда коливань напряму фільтрації ґрунтових вод складає $\pm 10\text{-}15^{o}$. Переорієнтація напряму фільтрації ґрунтових вод вірогідно обумовлена топографією експериментальної ділянки і змінами величини інфільтраційного живлення ґрунтових вод в залежності від потужності зони аерації.

П’єзометричними спостереженнями був виявлений нерівномірний розподіл напору підземних вод по глибині водоносного горизонту, що, очевидно, обумовлено неоднорідністю літологічних і фільтраційних властивостей відкладів. В добре проникних еолових пісках в верхній частині розрізу вертикальний градієнт напору дуже малий ($\approx 10^{-4}$ м/м). В алювіальних відкладах заплавової- старичної фацій в середній частині розрізу (110-106 м БСВ) вертикальний градієнт напору складає 0,02-0,04 м/м, що в 10-20 разів перевищує латеральний градієнт напору. Наведені дані ілюструє рис. 2.13 де представлена прогнозна гідродинамічна сітка (лінії рівного напору і лінії току) згідно моделювання фільтрації підземних вод на локальній двовимірній профільній моделі експериментальної ділянки (з використанням програми MODFLOW). В товщі еолових пісків фільтрація підземних вод (а значить і міграція радіонуклідів) відбувається в горизонтальному напрямі. В прошарку слабопроникних алювіальних відкладів (в інтервалі глибин 110-106 м БСВ) фільтрація підземних вод має переважно вертикальний характер [Бугай та ін, 2007].

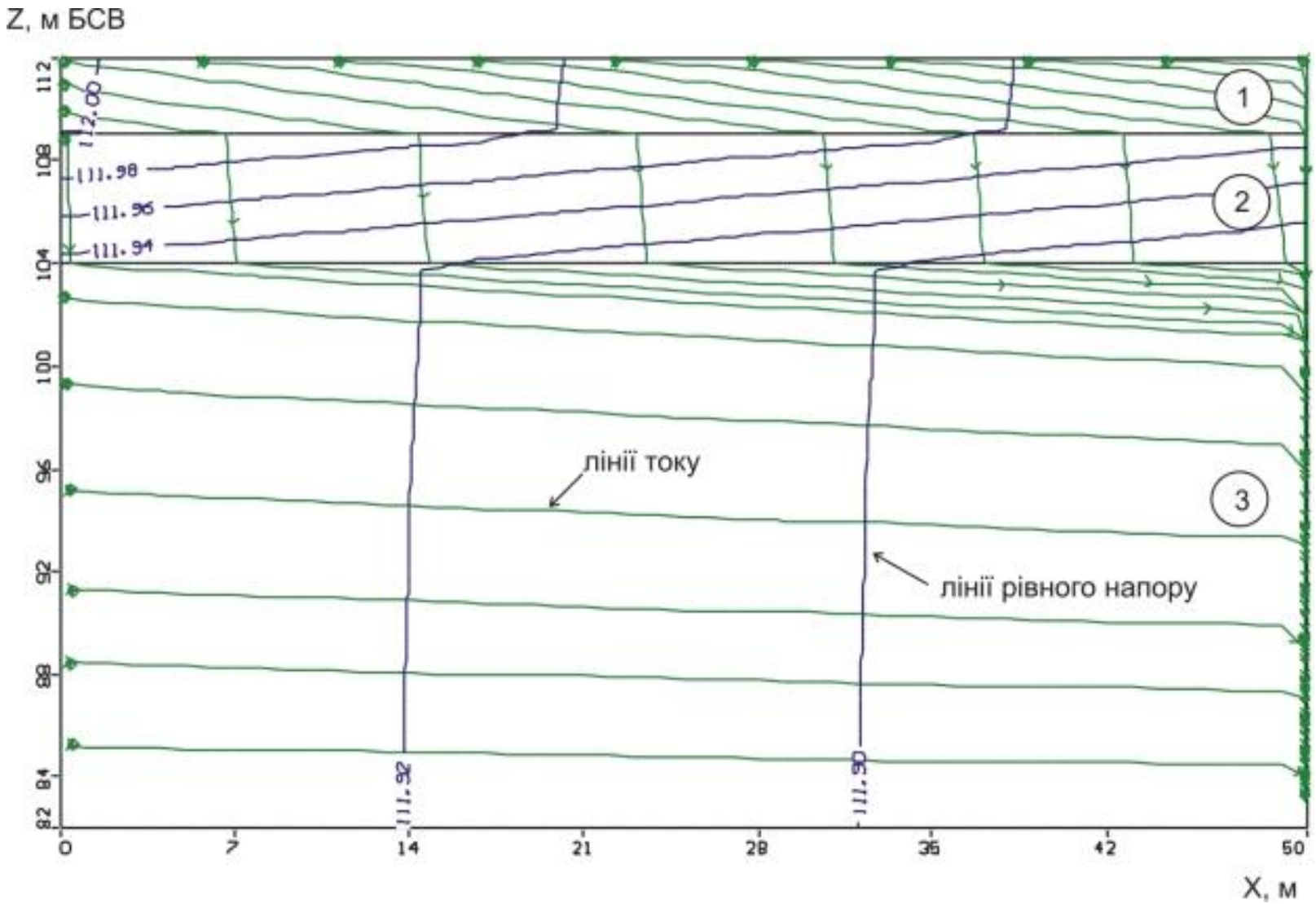


Рис. 2.13. Прогнозна гідродинамічна сітка руху підземних вод за даними моделювання профільної фільтрації за допомогою програми MODFLOW (1 – шар еолових пісків, 2 – шар алювіальних відкладів старичної фації, 3 – шар алювіальних відкладів руслової фації) [Бугай та ін., 2007].

Для вивчення фільтраційних властивостей геологічних відкладів експериментального полігону „Рудий ліс” було також застосовано комплекс методів, що включали лабораторні визначення (колонкові експерименти), польові дослідно-фільтраційні роботи (експрес-наливи, відкачки) і математичне моделювання (розв’язання зворотних задач). Оцінки фільтраційних параметрів еолових пісків, що складають верхню частину розрізу, де відбувається міграція радіонуклідів з траншеї, були підтверджені в ході трасерних експериментів в водоносному горизонті. Результати дослідно-фільтраційних робіт підсумовані в табл. 2.1.

Зазначимо, що алювіальним відкладам заплавної - старичної фації властива суттєва анізотропія коефіцієнта фільтрації: $K_X >> K_Z$ (де індекс X позначає горизонтальну, Z – вертикальну компоненту, див. табл. 2.1). Це обумовлено шаруватою структурою цих відкладів: наявністю добре проникних горизонтальних прошарків в товщі відкладів з загалом відносно низьким коефіцієнтом фільтрації [Бугай та ін, 2007].

2.4. Інструментальне обладнання, методики та програма моніторингових спостережень

2.4.1. Загальна характеристика системи моніторингу та програми спостережень

На експериментальному полігоні в 2000 р. була створена комплексна система гідрогеологічного моніторингу, яка включала: лабораторний модуль, мережу спостережних свердловин, автоматичну метеостанцію, шурф для моніторингу за вологоперенесенням у зоні аерації, мережу пробовідбірників ґрунтових вод [Бугай та ін., 2007].

Таблиця 2.1

Типові літологічні, фільтраційні і геохімічні властивості основних геологічних типів відкладів експериментального полігону [Бугай та ін., 2007].

Тип відкладів	**Щільність, кг/дм^3**	**Пористість, %**	**Глиниста фракція (<0,01 мм) вміст, %**	**Коефіцієнт фільтрації (К), м/день**	**КОЄ, мг-екв /100 г**
Еолові	1,72	34-36	1-2	3-5 (ізотропний)	0,5-1,2
Алювіальні, заплавні і старичні фації	1,73	35	10-20	≈ 1 (K_x) ≈ 0,01 (K_z) (анізотропний)*	5-10
Алювіальні, руслова фація	1,67	37	2-8	5-15 (ізотропний)	0,5-4

Примітка: * - X – горизонтальний напрямок, Z – вертикальний напрямок.

2.4.2. Метеорологічні спостереження

На експериментальній ділянці виконувалися регулярні метеорологічні спостереження із використанням автоматичної метеостанції WS-STD1 (рис. 2.14) виробництва фірми Delta-T Devices Ltd., Великобританія (https://www.delta-t.co.uk/).

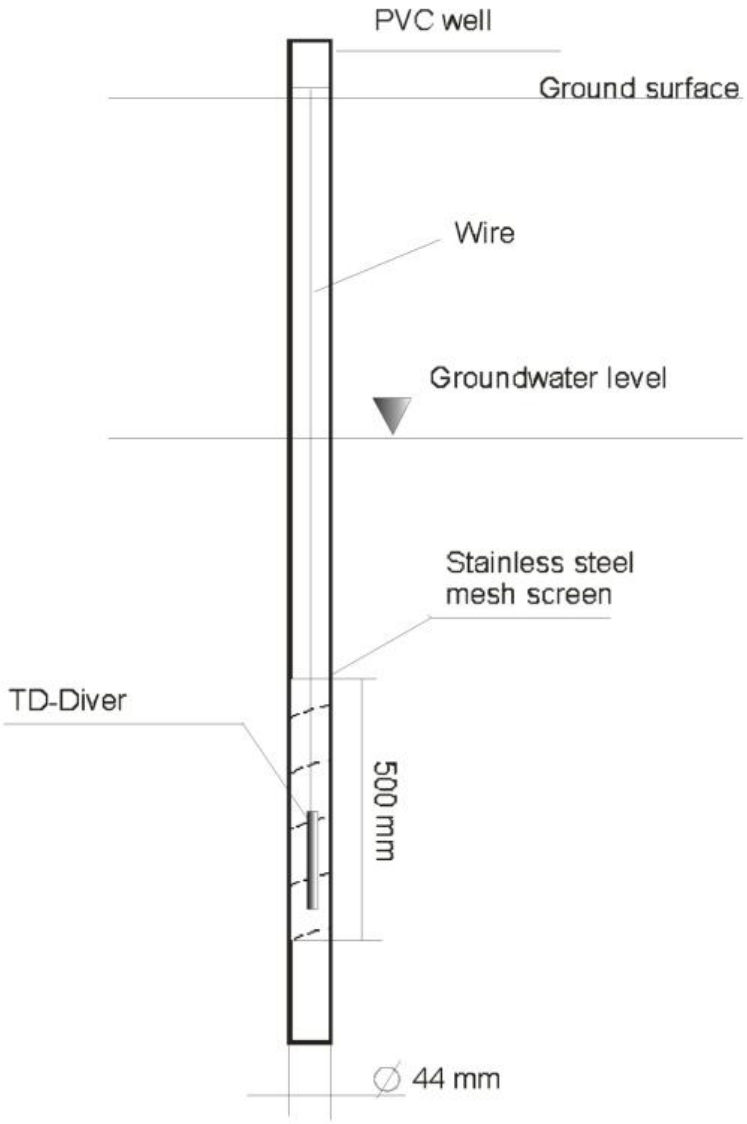
Метеостанція розміщена на площадці 6x6 м в центральній частині експериментальної ділянки (див рис. 2.7). Перелік підконтрольних метеопараметрів включав: температуру і відносну вологість повітря, напрямок і швидкість вітру, кількість атмосферних опадів (приклад даних атмосферних опадів за 2000-2004 рр. див на рис. 2.12), сонячну радіацію, температуру ґрунту. Одержані дані дозволяють оцінити потенційну евапотранспірацію на поверхні ґрунту, що є важливою складовою розрахунку водного балансу експериментальної ділянки. Для накопичення даних також використовується регістратор Datalogger DL2e [Бугай та ін, 2007].

2.4.3. Спостереження за рівневим режимом ґрунтових вод

Основою системи гідрогеологічного моніторингу полігону є мережа спостережних свердловин глибиною 5-6 м, обладнаних з ПВХ труб діаметром 44 мм, фільтр з нержавіючої сталевої сітки 0,5-1 м (рис. 2.16). Свердловини для спостережень за РҐВ оточують центральну частину траншеї (див. рис. 8; зовнішній вигляд частини мережі зображено на рис. 2.15).

Рис. 2.14. Автоматична метеостанція дослідного полігону ІГН НАНУ в ЧЗВ

Рис. 2.15. Вигляд частини мережі спостережних свердловин полігону ІГН НАНУ в ЧЗВ



(а)

(б)

Рис. 2.16. Схема розміщення автоматичного датчика РҐВ TD-Diver з логером у моніторинговій свердловині (а), та завантаження даних з TD-Diver до ноутбука (б) [Bugai and Deviere, 2004].

В свердловини встановлені електронні автоматичні датчики тиску води TD-Diver фірми Van Essen Instruments, Нідерланди (https://www.vanessen.com/products/water-level/td-diver) з вбудованими логерами, що реєстрували значення РҐВ 4 рази на добу (інтервал 6 годин). На додаток, періодично (під час візитів на полігон) виконувалися ручні вимірювання РҐВ за допомогою електричного рівнеміра SOLINST (https://www.solinst.com/products/level-measurement-devices/101-water-level-meter/), з метою перевірити та відкалібрувати датчики тиску. Спостереження, виконані за допомогою моніторингової системи свердловин, дозволяють визначити напрямки руху та градієнти напору ґрунтових вод [Bugai and Deviere, 2004; Бугай та ін., 2007]. Приклад накопичених даних за 2000-2004 рр. див. на рис. 2.12.

2.4.4. Моніторингові дослідження ґрунтів зони аерації

2.4.4.1. Станція моніторингу гідрофізичних характеристик ґрунтів зони аерації «Шурф»

Для моніторингу руху вологи в зоні аерації на полігоні в період 2000-2004 рр. застосовувався шурф глибиною 1,8 м (станція моніторингу „Шурф”), обладнаний на різних глибинах наступними електронними датчиками: тензіометрами моделі SWT6 (на глибинах 0,75, 1,25, 1,75 м в 2000-2001 рр., і 2,5 м в 2000-2004 рр.) і тензіометрами моделі EQ2 (на глибинах 0,25, 0,5 м в 2000 р.) для вимірювання капілярного тиску порової вологи, датчиками вмісту вологи в ґрунті Theta Probe ML2x (на всіх вказаних глибинах), температури ґрунту ST1 (на всіх вказаних глибинах) і електронним регістратором даних Datalogger DL2e. Схема шурфу показана на рис. 2.17., внутрішній вигляд – на рис. 2.18.

Основні типи датчиків більш детально описані нижче.

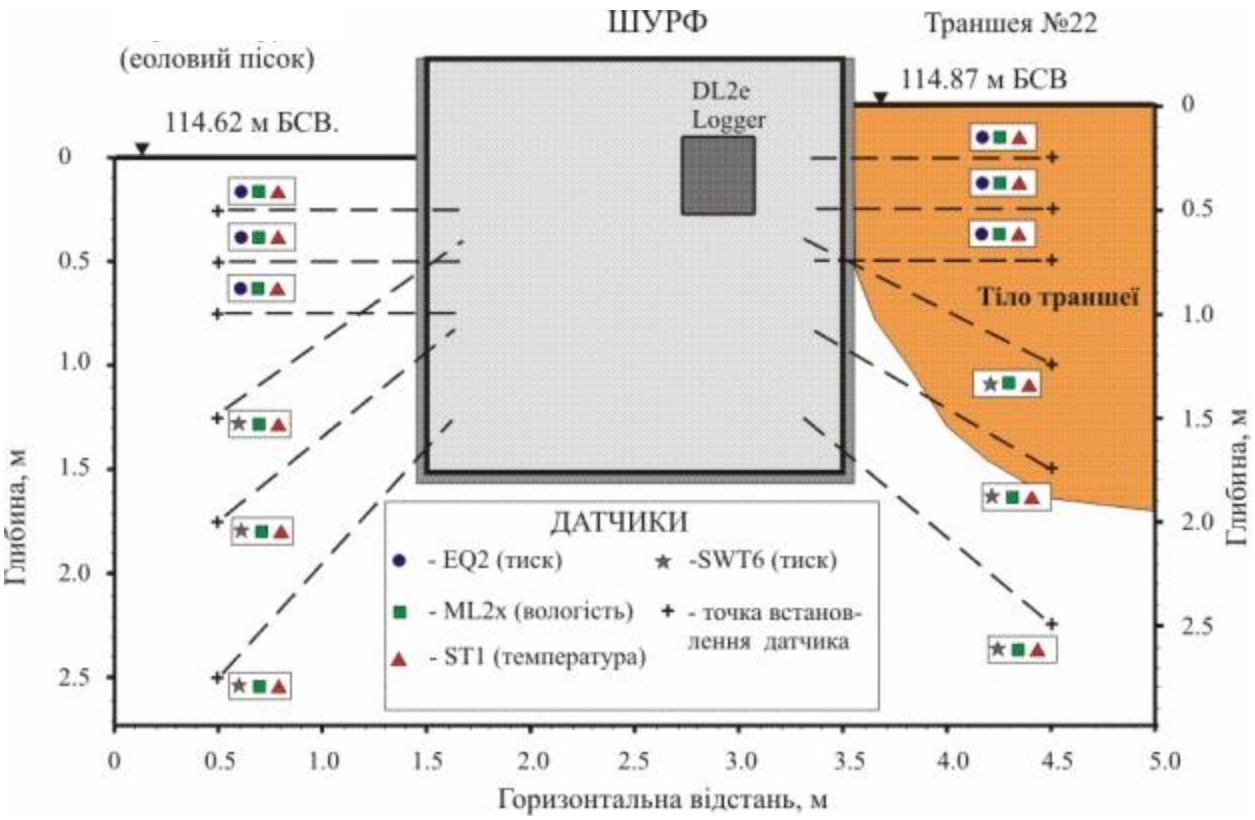


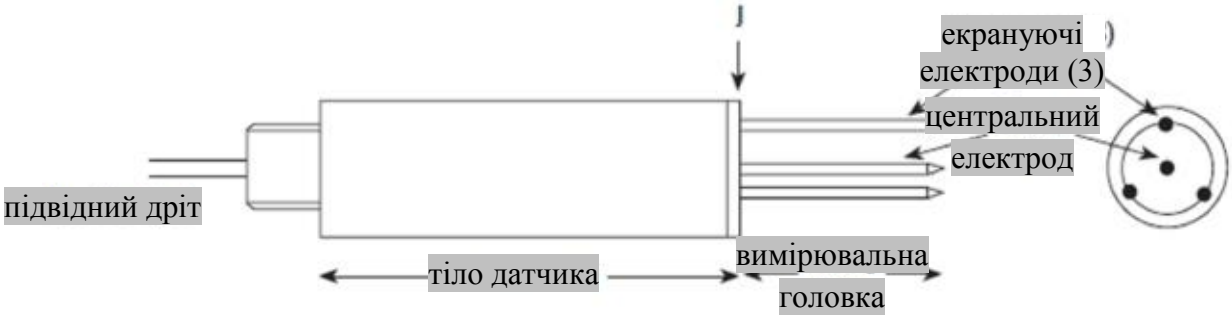
Рис. 2.17. Схема шурфу для моніторингу зони аерації (вертикальний розріз ґрунту) [Бугай та ін., 2007].

Рис. 2.18. Інтер'єр шурфу для моніторингу зони аерації.

2.4.4.1. Датчики вмісту вологи в ґрунті Theta Probe ML2x

На станції моніторингу зони аерації «Шурф» (див. рис. 2.17) на всіх глибинах, де проводились спостереження, використовувалися датчики вмісту вологи в ґрунті (для вимірювання об'ємної вологісті – θ, см^3/см^3) Theta Probe ML2x (рис. 2.19) (виробництва Delta-T Devices Ltd., Великобританія; https://www.delta-t.co.uk/).

(а)



(б)

Рис. 2.19. Зовнішній вигляд (а) та схема (б) датчика ML2x

Принцип дії датчиків ML2x полягає в вимірюванні діелектричної постійної ґрунту методом TDR (time-domain reflectometry англ., буквально: вимірювання відбитого сигналу). Значення діелектричної постійної води дуже велике в порівнянні з її значенням для скелету ґрунту та повітря, тому діелектрична постійну ґрунту залежить, в першу чергу, від його вологості. Метод TDR полягає у вимірюванні часу проходження електромагнітних хвиль вздовж паралельних металевих стрижнів (двох або більше) відомої довжини, вставлених у ґрунт [Haverkamp et al., 2007].

За умов калібрування точність вимірювань ML2x складає ± 0,01 $см^3/см^3$ (1%) об’ємного вмісту вологи в ґрунті в діапазоні 0,05-0,6 $см^3/см^3$ (5-60%), а загальний діапазон 0,0-1,0 [Delta-T Devices, 1999 (3)].

2.4.4.2. Тензіометри моделі SWT6

Тензіометр представляє собою прилад для вимірювання всмоктуючого (капілярного) тиску порової вологи (ψ, см водного стовпчика), що складається із заповненого водою керамічного наконечника-"чашки", що контактує керамічною поверхнею з ґрунтом, і під’єднаного до наконечника датчика тиску в контакті з водою, що заповнює керамічний наконечник (наприклад, ртутного манометру, або електронного п'єзометричного датчика). Пориста кераміка пропускає вологу, але не пропускає повітря. Таким чином тиск ґрунтової вологи передається через воду на датчик тиску. Опис традиційних тензіометрів і методику їх використання можна знайти, наприклад у [Кац и Пашковский, 1988].

У сучасних тензіометрах використовуються твердотільні високочутливі п'єзоелектричні датчики тиску. За умови використання дегазованої води реакція такого тензіометру на зміну тиску складає менше 1 с [Selker at al., 1999].

На станції моніторингу «Шурф» (див. рис. 2.17) використовувалися електронні тензіометри SWT6 (рис. 2.20) (виробн. UMS, Німеччина – сьогодні METER Group: https://www.metergroup.com /environment/products/). Тензіометри можуть під'єднуватись до логерів. Точність вимірювань SWT6 складає ± 5 см водного стовпчика, робочий діапазон 0-850 см водного стовпчика [Delta-T Devices, 1999 (2)].

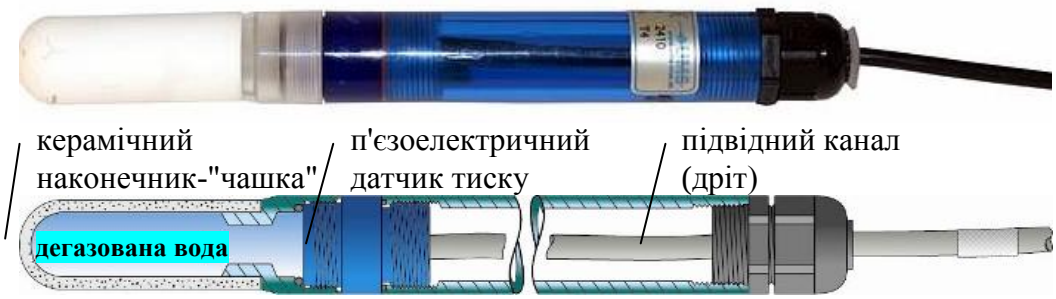


Рис. 2.20. Зовнішній вигляд і схема сучасного тензіометра

На станції «Шурф» тензіометри SWT6 використовувалися на глибинах 0,75 м, 1,25 м і 1,75 м в 2000-2001 рр., на глибині 2,5 м в 2000-2004 рр.

2.4.4.4. Тензіометр моделі EQ2

На станції моніторингу «Шурф» (див. рис. 2.17) в 2000 р. на глибинах 0,25 і 0,5 м використовувалися тензіометри, призначені для вимірювання всмоктуючого (капілярного) тиску порової вологи (ψ, см водного стовпчика) моделі EQ2 (виробництва Delta-T Devices Ltd., Великобританія; https://www.delta-t.co.uk/). Тензіометри моделі EQ2 працюють в діапазоні 0-10 м водного стовпчика, з точністю ±10 см в діапазоні 0-1 м, і ±5% в діапазоні 1-10 м (рис. 2.21) [Delta-T Devices, 1999 (1)].

Рис. 2.21. Зовнішній вигляд і схема тензіометра EQ2

Тензіометр моделі EQ2 фактично являє собою датчик вологості ML2x, вимірювальні електроди якого розміщені в спеціальному керамічному пористому моноліті. Моноліт розміщується в ґрунті, і капілярний тиск вологи в ньому входить в рівновагу з тиском вологи оточуючого ґрунту. Датчик вологості ML2x вимірює вологість керамічного моноліту, а потім по відомій для цієї кераміки залежності вологість перераховується у всмоктуючий тиск.

Тензіометри моделі EQ2 дозволяють проводити вимірювання всмоктуючого тиску в більшому діапазоні, ніж звичайні тензіометри (до 10 м водного стовпчика), але з більшою похибкою. Тому EQ2 доцільно використовувати в умовах невеликої вологості ґрунтів і підвищеного всмоктуючого тиску, де звичайні тензіометри використовувати неможна. Такі умови частіше спостерігаються в верхній частині ґрунтового профілю, тому на станції моніторингу «Шурф» тензіометри EQ2 були встановлені на глибинах 0,25 м і 0,5 м.

2.4.4.5. Електронний регістратор даних Datalogger DL2e

Електронний регістратор даних Datalogger DL2e (виробництва Delta-T Devices Ltd., Великобританія: https://www.delta-t.co.uk/product/dl2e/) (рис. 2.22) це пристрій, що здатен зчитувати та накопичувати дані з різноманітних датчиків (автоматичних метеостанцій, датчиків вологості ґрунтів, датчиків тиску). Може зчитувати інформацію з датчиків через інтервали, тривалістю від 1 с до 1 доби. Може працювати з 60 датчиками, накопичуючи до 128 000 записів. Працює від акумулятора. Перед початком роботи програмується з персонального комп’ютера (ПК) за допомогою спеціальної програми. Протягом роботи можливо зчитувати накопичені дані використовуючи ПК через серійний порт RS232 [Delta-T Devices, 1996].

Рис. 2.22. Зовнішній вигляд логера DL2e

2.4.4.6. Регламент спостережень і приклад одержаних даних

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 протягом усього терміну існування станції моніторингу «Шурф». Всмоктуючий тиск порової вологи вимірювався на глибинах 0,25 м і 0,5 м в 2000 р., на глибинах 0,75 м, 1,25 м і 1,75 м в 2000-2001 рр., на глибині 2,5 м в 2000-2004 рр. Також вимірювалася температура ґрунтів. Заміри характеристик виконувались із періодичністю 4-24 години.

Станція моніторингу «Шурф» була споруджена таким чином, що одна її стінка прорізала тіло поховання радіоактивних відходів (траншеї), а друга стінка забезпечувала доступ до профілю ґрунту за межами траншеї, див. підрозд. 2.2.3. Відповідно, станція дозволяла здійснювати моніторинг режиму зони аерації як у тілі траншеї, так і за межами траншеї в первинних еолових ґрунтах (датчики, розташовані глибше 0,5 м в профілі за межами траншеї встановлені в первинних ґрунтах). Поверхня ґрунту поруч з станцією не мала рослинного покриву [Бугай та ін, 2007].

2.4.5. Дані спостережень, використані в дисертаційній роботі

В дисертації аналізуються моніторингові дані, що були отримані співробітниками відділу моніторингу геологічного середовища ІГН НАН України на дослідному полігоні в 2000-2012 рр. Дисертант безпосередньо приймав участь у моніторингових дослідженнях на дослідному полігоні, починаючи з 2008 р.

В дисертаційних дослідженнях проаналізовано наступні дані:

1) метеорологічні дані, отримані за допомогою автоматичної метеостанції протягом 2000-2012 рр.;

2) дані моніторингу зони аерації (об’ємна вологість ґрунтів зони аерації, всмоктуючий тиск в ґрунтах зони аерації), отримані за допомогою станції автоматизованого моніторингу «Шурф» протягом 2000-2004 рр.;

3) дані коливань РҐВ, отримані за допомогою датчика з логером, встановленим у св. №2-99 протягом 2000-2012 рр.

2.5. Висновки до розділу

ПТЛРВ «Рудий ліс», де розміщено дослідний полігон ІГН НАН України, являє собою природно-техногенна екосистему, оскільки нинішні особливості ПТЛРВ, що визначають гідрогеологічні та міграційні характеристики геологічного середовища сформувалися внаслідок значного за масштабами техногенного впливу на природне середовище Прип’ятського полісся.

На сьогоднішній день дану екосистему не можна назвати ні лісовою, ні луговою, що характерні для Полісся в таких кліматичних і ландшафтних умовах. Щільність лісових насаджень тут помітно менша за природну, трав’яний покрив теж слабко виражений. Будова верхнього шару геологічного середовища (ґрунтового покриву) неприродна, ускладнена тілами траншей та «буртів», техногенними шарами ґрунту з різними характеристиками. Відповідно, гідрогеологічні та міграційні характеристики мають відрізняються від природних, зокрема величина інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту, гідрофізичні характеристики ґрунтів й т. ін.

Обладнання експериментального полігону ІГН НАН України «Рудий ліс» сучасними системами автоматизованих спостережень за метеорологічними, гідрогеологічними параметрами, зокрема гідрофізичними характеристиками зони аерації та РҐВ, дозволило накопичити унікальний за комплексністю та детальністю набір моніторингових даних.

Для аналізу й інтерпретації одержаних даних в дисертації запропоновано ряд вдосконалених та/або оригінальних методик оцінки гідрофізичних параметрів ґрунтів зони аерації і оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод, що представлені в наступних розділах дисертації.

РОЗДІЛ 3
АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ І ОЦІНКА ІНФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ДІЛЯНЦІ ПТЛРВ «РУДИЙ ЛІС» ПРОТЯГОМ 2000-2004 рр. ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГІДРОФІЗИЧНОГО МЕТОДУ

В цьому розділі дисертаційної роботи викладені результати аналізу особливостей вологоперенесення в зоні аерації ПТЛРВ “Рудий ліс”. Дослідження виконані на основі унікального за детальністю набору моніторингових даних, зібраних *in-situ* за допомогою автоматизованої станції моніторингу зони аерації “Шурф”, яка функціонувала на дослідному полігоні в 2000-2004 рр. (детальний опис станції наведено в підрозд. 2.4.4). Зокрема визначені інтервали глибин зони аерації із різнонаправленими напрямками вологоперенесення (вниз, вгору) і однонаправленим (вниз) напрямком вологоперенесення протягом календарного року. Також представлено результати кількісної оцінки інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту із застосуванням гідрофізичного методу.

Ключовим параметром для застосування гідрофізичного методу є залежність коефіцієнту вологоперенесення ґрунтів зони аерації від капілярного тиску. Для оцінки коефіцієнту вологоперенесення в дисертації застосовано вдосконалений методичний підхід, оснований на використанні методу «миттєвого профілювання балансу вологи в ґрунтовому профілі» in-situ на основі аналізу даних режимних спостережень за вмістом вологи і всмоктуючим тиском, зібраних за допомогою станції моніторингу “Шурф”. Зазначений методичний підхід і результати його застосування для оцінки коефіцієнту вологоперенесення еолового піску, що складає зону аерації полігону, описано у відповідному підрозділі цієї глави дисертації.

3.1. Аналіз особливостей режиму вологоперенесення в ґрунтах ПТЛРВ «Рудий ліс»

Нижче проаналізовано особливості вологоперенесення в ґрунтовому профілі полігону ІГН в ПТЛРВ “Рудий ліс” за межами траншеї з РАВ, де проводилися автоматизовані спостереження за режимом зони аерації за допомогою станції моніторингу зони аерації “Шурф” (схему станції моніторингу “Шурф” показано на рис. 2.17).

Досліджуваний ґрунтовий профіль зони аерації має наступну будову: верхня частина зони аерації представлена техногенними ґрунтами (до 0,5 м), залишками гумусованого шару (на глибині 0,5-0,6 м), нижня частина (до рівня ґрунтових вод) складається із відносно однорідних дрібнозернистих кварцових пісків еолового генезису. Коефіцієнт фільтрації еолових пісків складає ≈ 3-5 м/добу.

Беручи до уваги однорідність еолових пісків, при аналізі даних моніторингу ми виходимо із припущення про одномірний режим руху вологи в досліджуваному ґрунтовому профілі. Зазначимо, що поверхня ґрунту поруч з шурфом (розташована безпосередньо над датчиками вмісту вологи в ґрунті та тензіометрами) не мала рослинного покриву.

Автоматизовані спостереження за параметрами зони аерації проводилися станцією “Шурф” 1-6 раз на добу (в залежності від глибини: чим ближче до поверхні розміщувалися датчики – тим частіше). Паралельно виконувалися автоматизовані спостереження за метеорологічними параметрами (див. підрозд. 2.4.2). В результаті було зібрано набагато більш детальний набір даних у порівнянні із попередніми дослідженнями режиму ґрунтів зони аерації в ЧЗВ, коли заміри проводилися в ручному режимі [Джепо, 1988].

Завдяки наявності описаного набору даних із підвищеною роздільністю в просторі та часі з’явилися можливості для поглибленого вивчення особливостей вологоперенесення в ґрунтах зони аерації полігону і для вдосконалення методів аналізу і інтерпретації даних. Відповідні методи описані нижче в цьому розділі дисертації.

3.1.1. Аналіз моніторингових даних щодо об'ємної вологості ґрунтів зони аерації.

Спостереження за вологістю ґрунтів зони аерації за допомогою станції моніторингу “Шурф” проводилися протягом 2000-2004 рр. Виміри вмісту вологи проводилися на глибинах 0,25; 0,5; 0,75; 1,25; 1,75; 2,5 м. На рис. 3.1 зображено, для прикладу, режим об'ємного вмісту вологи в ґрунтах зони аерації в 2001 р. Наявні дані моніторингу за весь період 2000-2004 рр. по всіх глибинах, на яких велись спостереження, представлені в Додатку Б.Протягом 2000-2004 рр. на глибині 0,25 м об'ємна вологість коливалася в межах 0,04-0,2 $см^3/см^3$. Датчик на глибині 0,25 м знаходився найближче до поверхні. Відповідно, вплив евапотранспірації позначався на цьому датчику найбільше, і тут спостерігалися відносно великі коливання вмісту вологи в ґрунті під впливом метеорологічних чинників, і найменші величини вологості в ґрунтовому профілі зони аерації.

На глибині 0,5 м вологість коливалася в межах 0,08-0,15 $см^3/см^3$. Як було зазначено вище, на глибині 0,5-0,6 м фіксується шар гумусованого ґрунту (див. підрозд. 2.2.3), 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. 3.1).

На глибинах 0,75, 1,25, 1,75 м протягом 2000-2004 рр. об'ємна вологість коливалася в межах 0,05-0,1 $см^3/см^3$.

Датчик на глибині 2,5 м знаходився в межах коливань РҐВ та капілярної кайми, тому вологість на цій глибині коливалася в найбільшому діапазоні: 0,07-0,29 $см^3/см^3$, і досягала максимальних значень, порівняно з показами інших датчиків вологості.

Загалом для всього ґрунтового профілю спостерігається тісний зв’язок між вмістом вологи і опадами. Найбільш глибокі (1,75-2,5 м) датчики реагують на інтенсивні опади (> 25 мм/день) через 2-7 діб (в залежності від величини опадів і вологості профілю перед дощем).

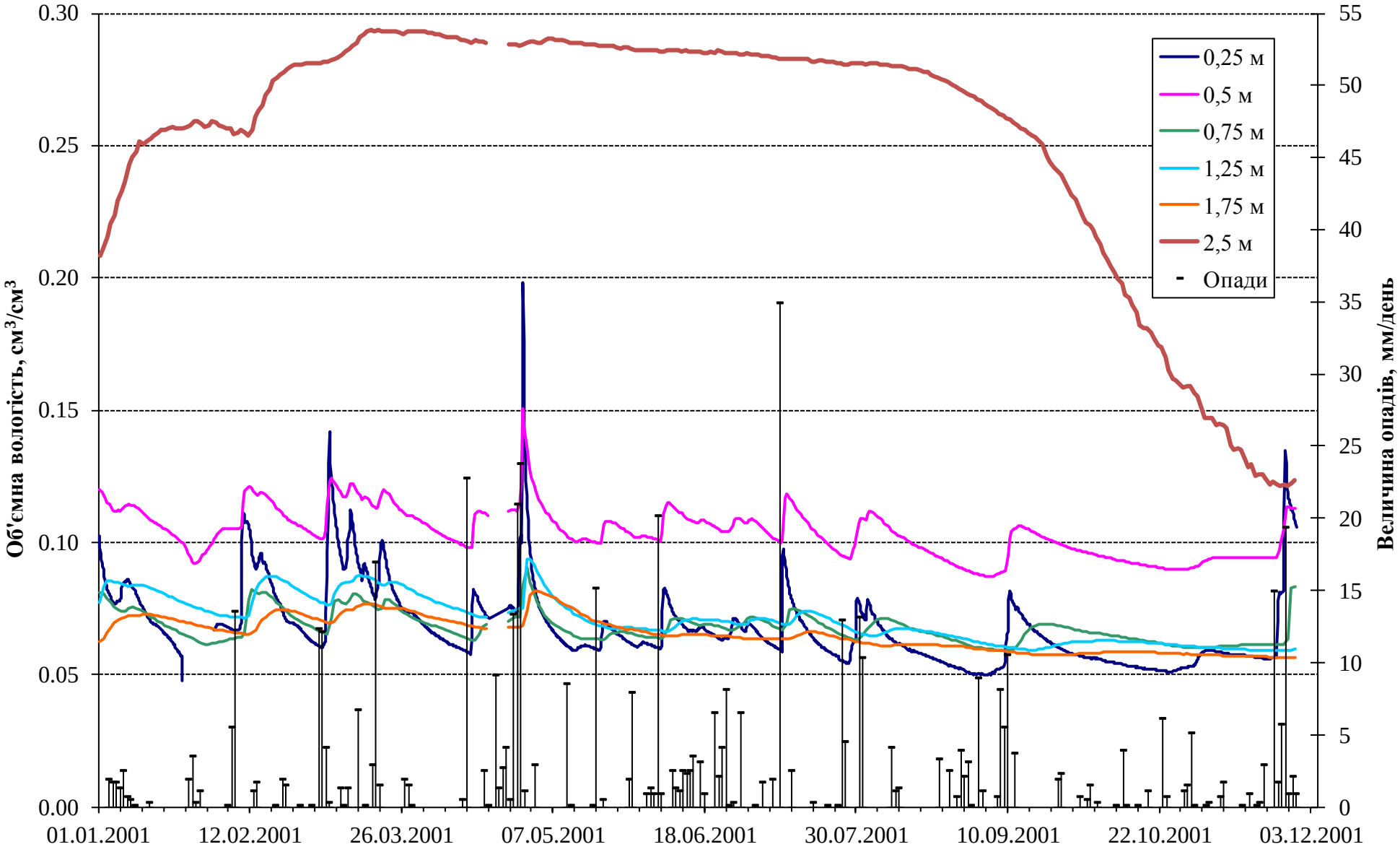


Рис. 3.1. Режим об'ємної вологості ґрунтів зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,25-2,5 м в 2001 р.

3.1.2. Розрахунок всмоктуючих тисків у ґрунтах зони аерації протягом 2001-2004 рр.

Спостереження всмоктуючих тисків у ґрунтах зони аерації на глибинах 0,75-1,75 м проводилися за допомогою станції автоматизованого моніторингу «Шурф» відносно короткий період – протягом 2000-2001 рр. (див. підрозд. 2.4.4). Заміри вмісту вологи в ґрунтовому профілі, в свою чергу, проводилися весь період спостережень (2000-2004 рр.). Для відтворення режиму всмоктуючих тисків протягом усього періоду спостережень станції моніторингу «Шурф» був використаний наступний підхід:

- за даними спостережень 2000-2001 р. були побудовані функціональні залежності всмоктуючого тиску від вмісту вологи в ґрунті для глибин встановлення датчиків: 0,75 м, 1,25 м, 1,75 м;

- побудовані функціональні залежності були використані для відтворення режиму всмоктуючого тиску на глибинах 0,75 м, 1,25 м, 1,75 м протягом 2002-2004 рр. на основі більш повного набору даних про режим вмісту вологи в ґрунті.

Для параметризації залежності всмоктуючого тиску від об'ємного вмісту вологи в ґрунті нами була використана формула ван Генухтена [van Genuchten, 1980] (див. підрозд. 1.1.1), що має наступний вигляд:

$$\psi = \frac{\left(\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{\frac{1}{\frac{1}{n}-1}}-1\right)^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \qquad (3.1)$$

де ψ – всмоктуючий тиск, см; θ – об'ємна вологість ґрунту, см^3/см^3; θ_r – мінімальна вологість, θs – вологість при повному насиченні ґрунту водою; α, n, – параметри рівняння. Параметри θ_r, θ_s були визначені в лабораторних дослідах раніше [Skalskyy et al., 2002]. Параметри α, n – підбиралися по набору визначених в ході режимних спостережень за допомогою станції «Шурф» пар значень “вологість ґрунту – всмоктуючий тиск” із застосуванням методу найменших квадратів.

Побудовані експериментальні залежності представлені на рис. 3.2. Відповідні коефіцієнти моделі ван Генухтена (див. рівн. (3.1)) склали: для глибини 0,75 м – α = 0,142; n = 1,74; для глибини 1,25 м – α = 0,046; n = 2,14; для глибини 1,75 м – α = 0,097, n = 1,84. Для залишкової вологості ґрунту і вологості при повному насиченні використані значення: $\theta_r = 0{,}02$ см^3/см^3, $\theta_s = 0{,}24$ см^3/см^3. Останнє значення враховує повітря, защемлене в порах ґрунтів зони аерації. Зазначимо, що згідно даних вимірювань вмісту вологи та всмоктуючого тиску, що були зібрані станцією моніторингу “Шурф”, на глибинах 0,75 м, 1,25 м та 1,75 м не спостерігається гістерезис гідрофізичних характеристик ґрунтів, що обумовлено досить вузьким діапазоном зміни вологості ґрунтів для цих глибин.

Графіки виміряних і розрахованих всмоктуючих тисків в 2001 р представлені на рис. 3.3., а за інші роки – в Додатку В. Величини всмоктуючих тисків протягом 2000-2004 рр. на глибинах встановлення тензіометрів 0,75-2,5 м коливалися в межах 25-110 см водного стовпчика.

3.1.3. Аналіз режиму гідравлічного напору в ґрунтах зони аерації протягом 2000-2004 рр.

На основі вимірювань всмоктуючого тиску було розраховано величину гідравлічного напору на відповідних глибинах встановлення датчиків станції моніторингу зони аерації “Шурф”. Саме розподіл гідравлічних напорів визначає напрямки і швидкості (величини інфільтраційного потоку) вологоперенесення в ґрунтовому профілі зони аерації. Нагадаємо, що гідравлічний напір на відповідній глибині (z) ґрунтового профілю зони аерації розраховується за відомою формулою:

$$H = z - \psi \qquad (3.2)$$

де H – гідравлічний напір у ґрунтах зони аерації, м; z – абсолютна відмітка встановлення тензіометра, м; ψ – всмоктуючий тиск за показами тензіометра , м.

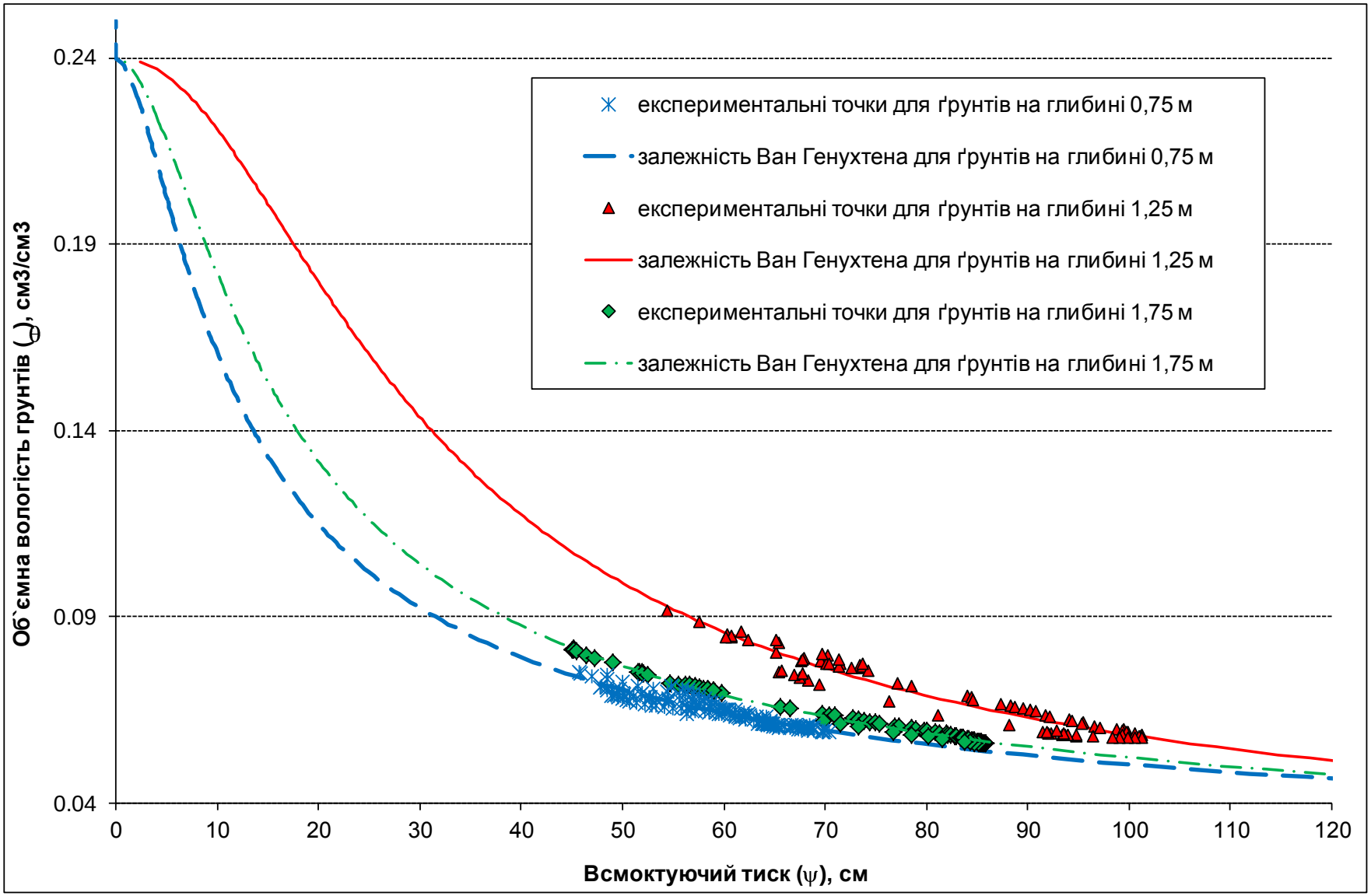


Рис. 3.2. *In-situ* залежності: „вміст вологи (θ) – всмоктуючий тиск (ψ)” для еолових пісків на глибинах 0,75 м, 1,25 і 1,75 м, розраховані за даними спостережень на станції моніторингу «Шурф», та їхні апроксимації за допомогою аналітичної моделі ван Генухтена.

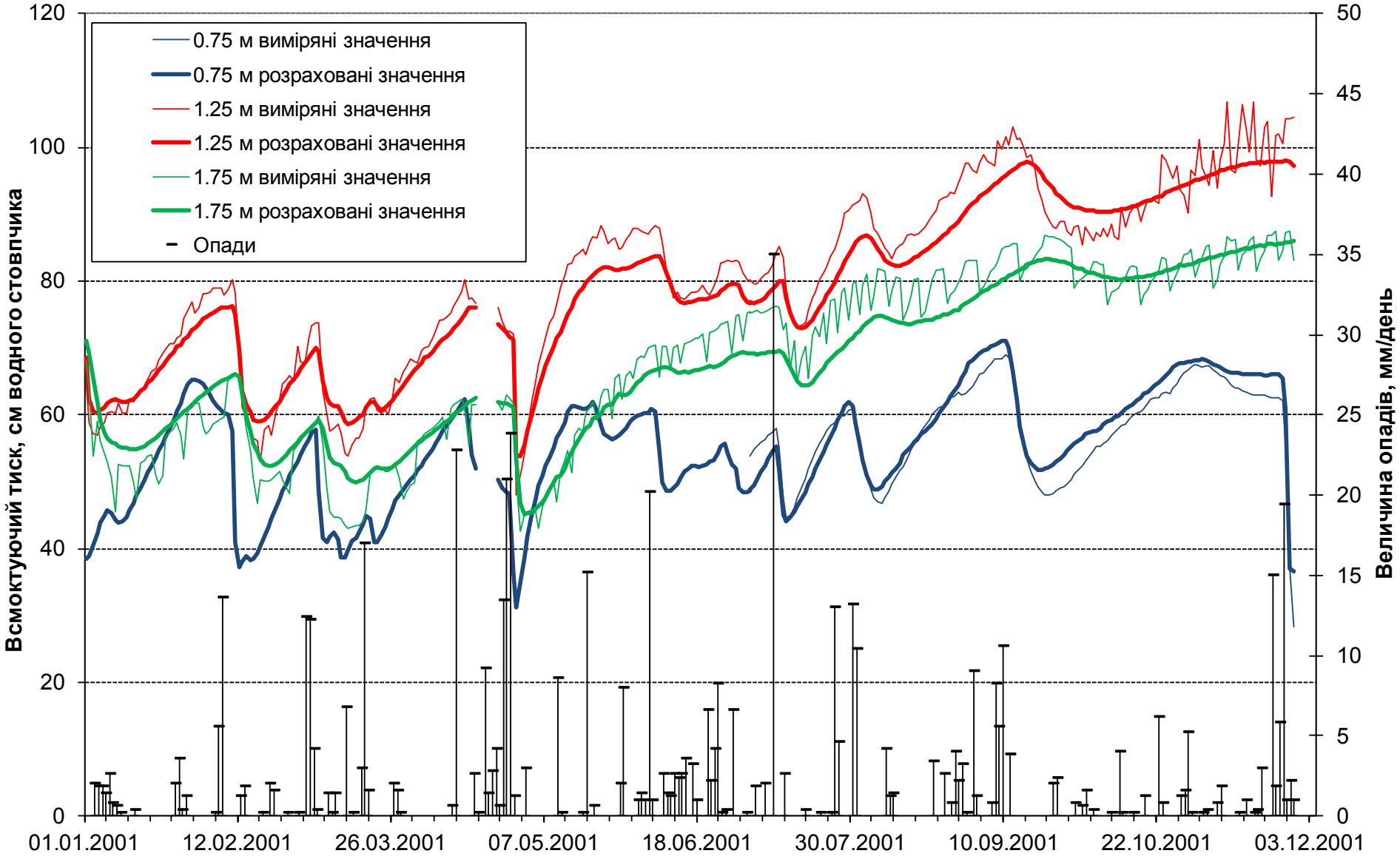


Рис. 3.3. Режим всмоктуючого тиску в 2001 р. за показами тензіометрів і розрахований на основі вимірів вмісту вологи із застосуванням моделі ван Генухтена.

Наявні дані спостережень дозволили найбільш детально охарактеризувати розподіл напорів в ґрунтовому профілі в 2000 р., коли вимірювання всмоктуючого тиску проводились за допомогою датчиків EQ2 на глибинах 0,25 м і 0,5 м, а також за допомогою тензіометрів SWT6 на глибинах 0,75 м; 1,25 м; 1,75 м і 2,5 м.

Графіки гідравлічних напорів в ґрунтах зони аерації на глибинах 0,25 м; 0,5 м; 0,75 м; 1,25 м; 1,75 м і 2,5 м протягом липня-грудня 2000 р. приведені на рис. 3.4. Напір коливався в межах 114,3-106,8 м на глибині встановлення тензіометра 0,25 м, і в межах 111,6-114 м на всіх інших глибинах встановлення датчиків тиску.

Дані, наведені на рис. 3.4, свідчать, що під час окремих сухих періодів в 2000 р. внаслідок посиленої евапотранспірації з поверхні ґрунту вологоперенесення в верхній частині ґрунтового профілю (до глибин 0,75-1,25 м) було направленим вгору. В ці періоди напір на глибині 0,5 м був більшим за напір на глибині 0,25 м, а напір на 0,75 м – більшим за напір на 0,5 м. В жовтні-листопаді і кілька діб в грудні 2000 р. напір на глибині 1,25 м був більшим за напір на глибині 0,75 м. Відповідно, напрямок вологоперенесення в ці періоди на цих глибинах (від 0,75 м-1,25 м і вище) був направленим вгору. Увесь інший час вологоперенесення в ґрунтовому профілі глибше 0,75 м було направлене донизу.

На рис. 3.5 показано графіки гідравлічних напорів в 2001 р. на глибинах 0,75 м, 1,25 м, 1,75 м, 2,5 м розраховані із застосуванням методу, описаного в попередньому підрозділі. Також, для порівняння, на рис.3.5 наведено рівень ґрунтових вод (по св. 2-99). Графіки напорів за інші роки (2002-2004 рр.) представлені в Додатку Г. Протягом 2001-2004 рр. гідравлічний напір на вказаних глибинах ґрунтового профілю зони аерації коливався в межах 111,3-113,6 м. За графіками напорів в 2001-2004 рр. можна зробити однозначний висновок, що протягом цього періоду в межах глибин 0,75-2,5 м вологоперенесення було направлене донизу.

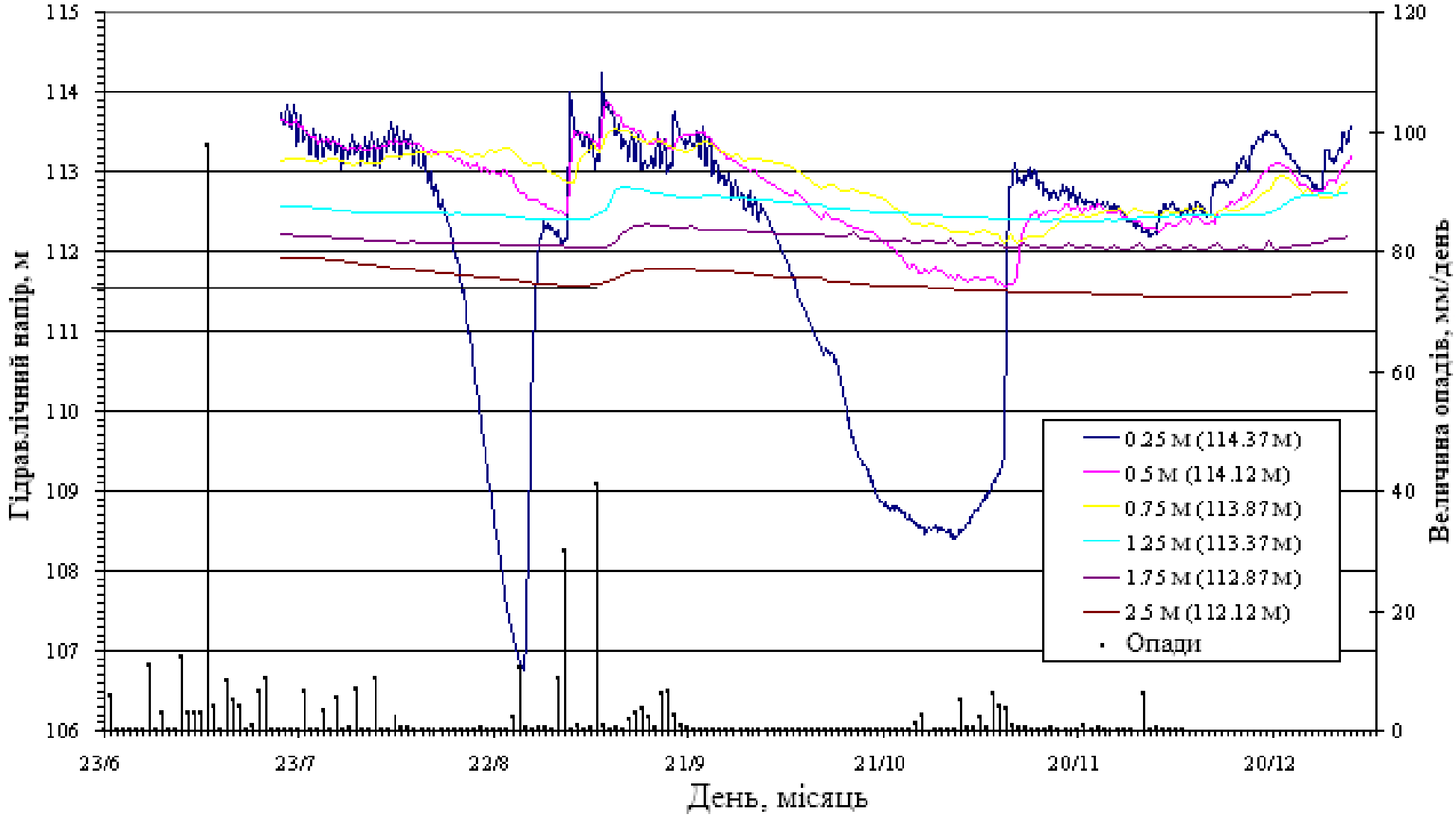


Рис. 3.4. Режим гідравлічного напору в ґрунтах зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,25-2,5 м в 2000 р.

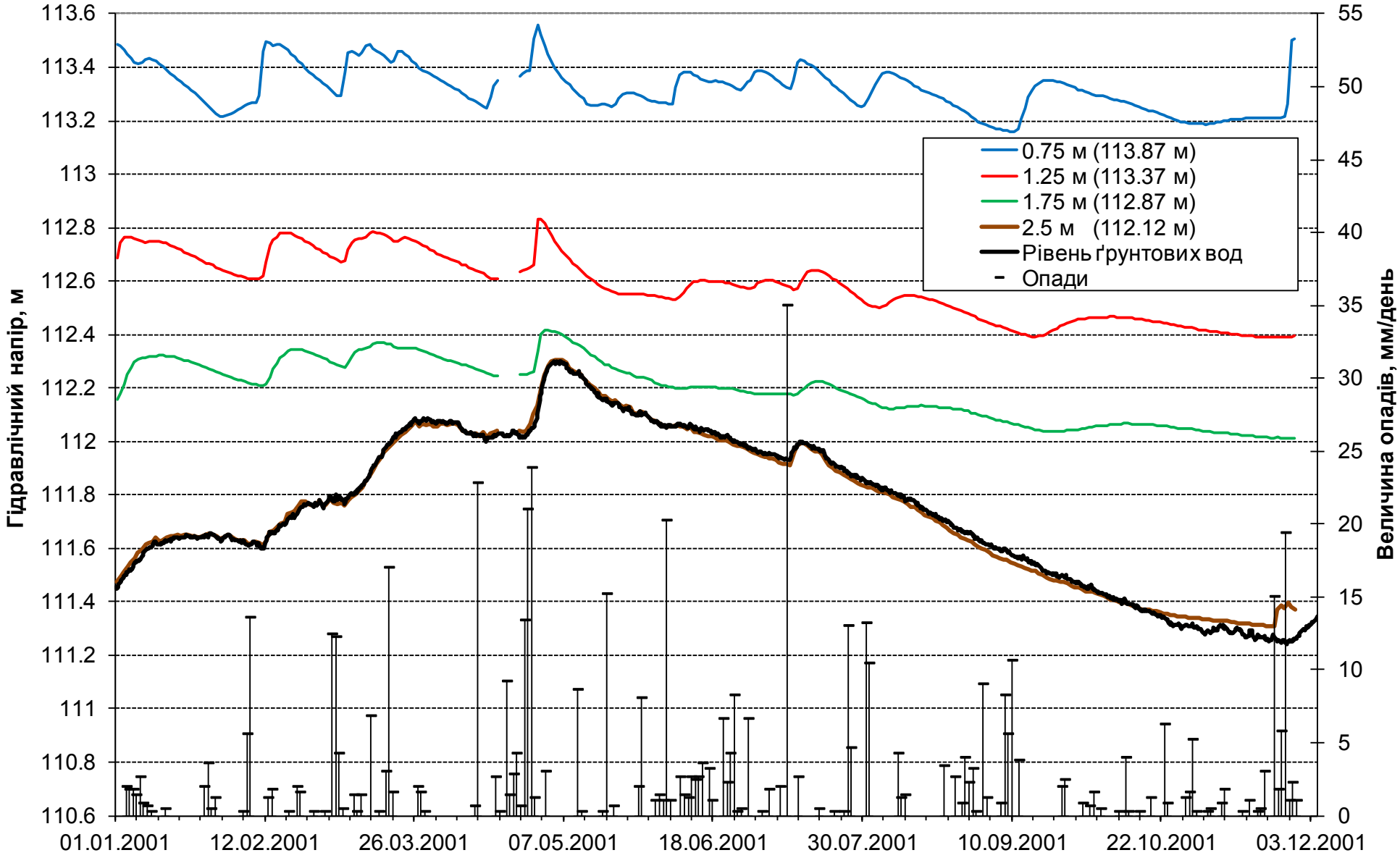


Рис. 3.5. Режим гідравлічного напору в ґрунтах зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,75-2,5 м в 2001 р.

Отже, згідно представленого вище аналізу спостережень за розподілом напорів в зоні аерації в 2000-2004 рр. ґрунтовий профіль за особливостями режиму вологоперенесення можна поділити на дві зони:

- в верхній частині розрізу (на глибинах до 1,25 м) протягом року під впливом метеорологічних чинників може відбуватися різно-направлене вологоперенесення (в вологі періоди – вниз, в сухі періоди – вверх);

- інтервал глибин від 1,25 м до РҐВ характеризується стійким направленим вниз вологоперенесенням протягом всього календарного року.

З урахуванням визначених особливостей режиму руху вологи в зоні аерації ПТЛРВ «Рудий ліс», дані замірів встановлених на глибинах 1,25 м і 1,75 м датчиків об'ємної вологості та тиску були використані для подальших розрахунків режиму інфільтраційного живлення гідрофізичним методом. Загальна теорія гідрофізичного методу більш детально описана в наступному підрозділі.

3.2. Методика розрахунків швидкості вологоперенесення (інфільтраційного потоку) гідрофізичним методом

Гідрофізичний метод розроблено в роботах [Ситников, 1978; Stephens and Knowlton, 1986] (в іноземній літературі метод має назву *Darcian flux calculations*) (див. розд. 1.2). Суть методу полягає в розрахунку швидкості вологоперенесення (величини потоку вологи) в зоні аерації із використанням закону Дарсі для ненасичених умов на основі вимірювань градієнту гідравлічного напору в вертикальному профілі ґрунту. Загальну розрахункову схему гідрофізичного методу наведено на рис. 3.6.

Розрахункові формули методу, що використовують режимні дані про вертикальний розподіл всмоктуючого тиску та гідравлічних напорів в ґрунтовому профілі, мають наступний вигляд:

$$v(t) = - K(\psi_{i+1/2})\,(H_{i+1}(t) - H_i(t))/\Delta Z_i \qquad (3.3)$$

де v – швидкість вологоперенесення (потік вологи), м/добу; $K(\psi_{i+1/2})$ – коефіцієнт вологоперенесення, м/добу (що залежить від величини

всмоктуючого тиску $\psi_{i+1/2}$, м); $H_i(t)=Z_i - H_i(t)$ – гідравлічний напір в точці „i”, м; $\psi_{i+1/2}=0,5\ (\psi_{i+1}+\psi_i)$, де $\psi_i\ (t)$– всмоктуючий тиск в точці „i” (згідно даних режимних спостережень); $\Delta Z_i=Z_{i+1} - Z_i$, відстань між точками заміру напорів, м (де Z_i – абсолютна відмітка точки „i”, м).

Сумарне інфільтраційне живлення отримується інтегруванням потоку за певний періоду часу. Використання формули (3.3) вимагає попереднього визначення залежності коефіцієнту вологоперенесення від всмоктуючого тиску.

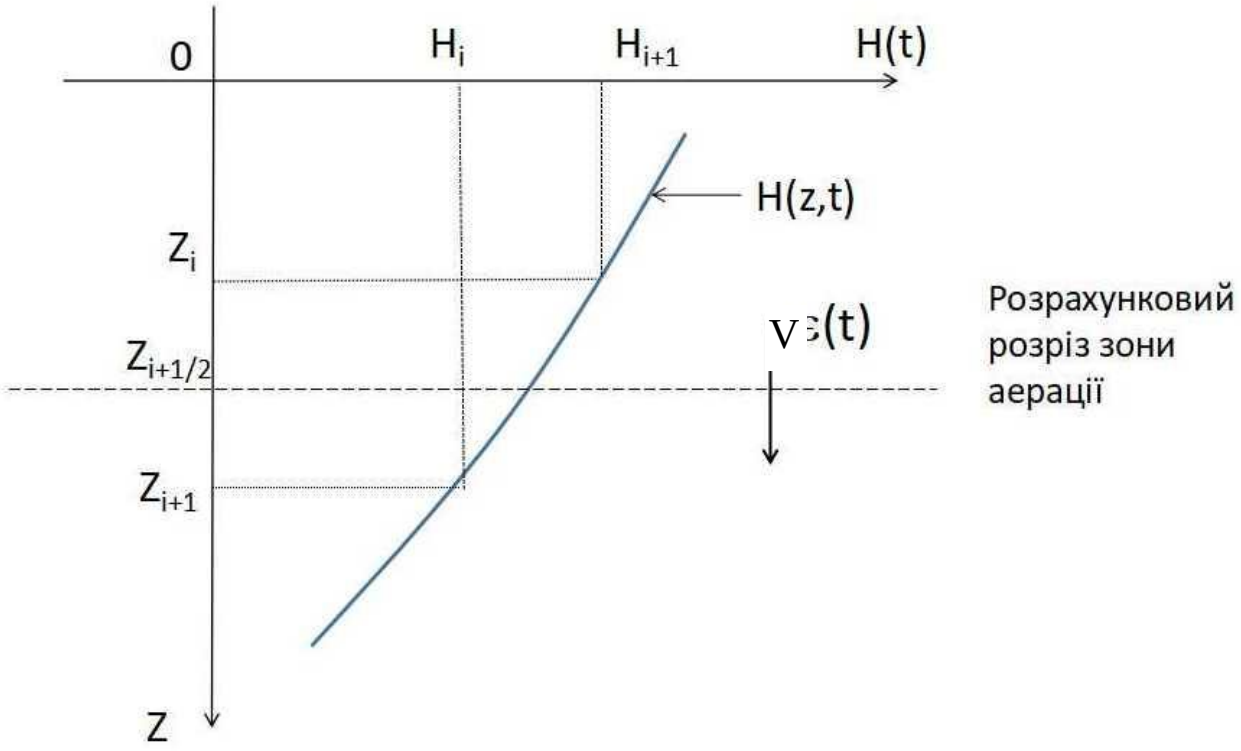


Рис. 3.6. Розрахункова схема гідрофізичного методу

3.3. Визначення коефіцієнту вологоперенесення in-situ на основі даних моніторингу методом “миттєвого профілювання балансу вологи” в ґрунтовому профілі

3.3.1. Методика розрахунку коефіцієнту вологоперенесення

Визначення коефіцієнту вологоперенесення піщаних ґрунтів (K(ψ)), який є різко нелінійною функцією всмоктуючого тиску, являє собою складну методичну проблему (див. підрозд. 1.1.2). Раніше при застосуванні гідрофізичного методу здебільшого застосовувалися дані визначення K(ψ) в лабораторних експериментах на ґрунтових колонках [Fredlund and Rahardjo, 2000; Watson, 1966]. Недоліком лабораторних визначень є їх методична складність, трудомісткість, чутливість результатів до можливих порушень природної структури ґрунтів, і ін.

Для розрахунків коефіцієнту вологоперенесення нами нижче використано вдосконалений підхід на основі методу “миттєвого профілювання балансу вологи” [Watson, 1966] із використанням даних режимних спостережень, одержаних за допомогою станції моніторингу режиму зони аерації „Шурф”. Принцип методу “миттєвого профілювання балансу вологи” полягає в оцінці коефіцієнту вологоперенесення на основі замірів швидкості зменшення запасів вологи в шарі ґрунту після його насичення водою (за рахунок гравітаційного стікання). Це дозволяє визначити витрати води в конкретному ґрунтовому перерізі. Величина витрат співвідноситься із значеннями всмоктуючих тисків, що також паралельно вимірюються в ґрунтовому профілі [Watson, 1966].

При застосуванні методу були використані дані режимних спостережень за вмістом вологи в ґрунтовому профілі зони аерації під час гравітаційного дренажу після сильних дощів, що проходили 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.

Розрахунок балансу ґрунтової вологи було проведено в інтервалі глибин від Z=0 до Z=1,5 м. Розрахункова глибина Z=1,5 м була вибрана виходячи із того, що вона відповідає середині відстані між датчиками шурфу, що встановлені на глибинах 1,25 м і 1,75 м. Згідно даних спостережень за зоною аерації (див. підрозд. 3.1.3) ґрунти на глибині Z=1,5 м знаходились поза зоною впливу капілярної кайми дзеркала ґрунтових вод та напрямок вологоперенесення на цій глибині був донизу (схематичний розріз ґрунтового профілю зони аерації, а також схему станції «Шурф», представлено на рис. 3.7).

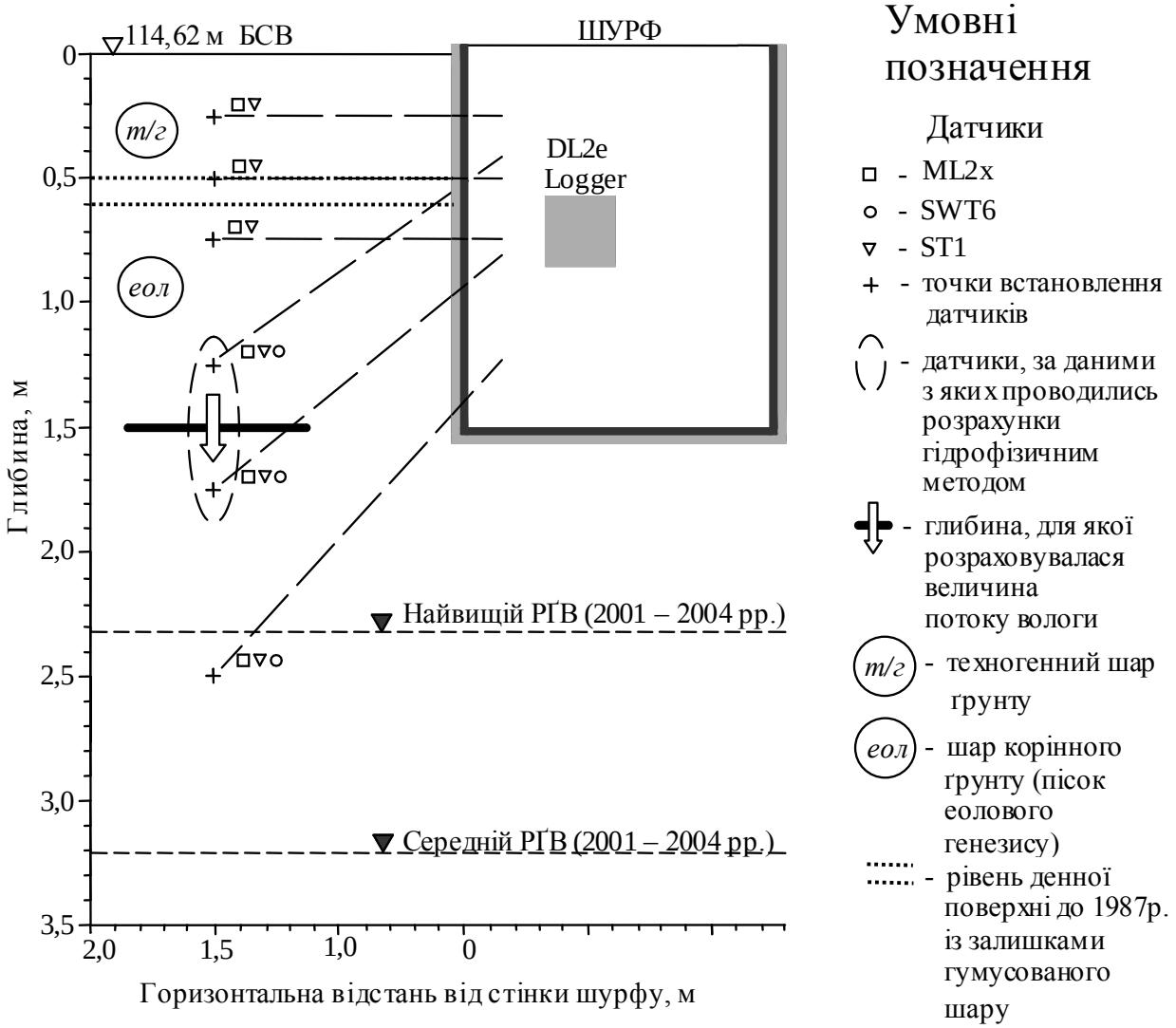


Рис 3.7. Схема станції «Шурф» для моніторингу вологоперенесення в зоні аерації з наведеним перерізом ґрунту, для якого проводилися розрахунки потоку вологи (швидкості вологоперенесення).

Для розрахунків ми звичайно використовували часовий відрізок дренування профілю, який слідував після інфільтрації фронту дощової вологи на глибину 1,75 м. В наступній фазі дренажу вологість ґрунтів монотонно знижувалась в усьому інтервалі глибин від Z=0 до Z=1,75 м.

Як вже зазначалося вище, метод “миттєвого профілювання балансу вологи” в ґрунтовому профілі полягає в розрахунку (на основі регулярних замірів вмісту вологи в ґрунтах) швидкості зменшення запасу вологи в відповідному шарі ґрунту зони аерації. В результаті розраховуються витрати потоку вологи через нижню границю досліджуваного шару ґрунту (в нашому випадку Z=1,5 м). В поєднанні з даними про градієнт напору вологи (що вимірюється в ході експерименту тензіометрами) розраховується відповідні значення коефіцієнту вологоперенесення (К), як функції капілярного тиску (ψ) (або вмісту вологи в ґрунтах, θ).

Розрахунки за методом передбачають послідовне визначення наступних параметрів:

1. Оцінюється запас вологи $R(Z_o,t)$ в шарі ґрунту в інтервалі глибин від z=0 до Z_o=1,5 м, в залежності від часу t (3.4):

$$R(Z_0,t)=\int_0^{Z_0}\theta(z,t)dz \qquad (3.4)$$

де θ – об'ємний вміст вологи в ґрунті згідно даних вимірювань датчиками.

2. Розраховується швидкість вологоперенесення (v) (або потік вологи) на глибині z=Z_o виходячи із динаміки втрат води відповідним шаром ґрунту (3.5):

$$v(Z_0,t)=\frac{dR(Z_0,t)}{dt} \qquad (3.5)$$

3. Оцінюється градієнт гідравлічного напору (i) в зоні аерації (3.6):

$$i(z,t)=\frac{dH(z,t)}{dz} \qquad (3.6)$$

де $H=z-\psi$, ψ - капілярний (всмоктуючий) тиск на глибині z в момент t.

4. Нарешті, визначається коефіцієнт вологоперенесення (3.7):

$$K(\psi(Z_0,t))=\frac{v(Z_0,t)}{i(Z_0,t)} \qquad (3.7)$$

і співвідноситься з даними про капілярний тиск (або вміст вологи) на глибині $z = Z_o$.

Для коректного застосування методу важливо забезпечити мінімальний вплив на баланс вологи в ґрунтовому профілі витрат вологи з поверхні ґрунту (на випаровування, евпотранспірацію). В контрольованих експериментах поверхня ґрунту з цією метою зазвичай закривається непроникною для води плівкою. В нашому випадку для розрахунків нами були обрані дощові епізоди в відносно холодні періоди року (рання весна, пізня осінь), коли випаровування з поверхні є мінімальним. Крім того, для контролю можливих похибок водного балансу були виконані розрахунки потенційної (тобто максимальної можливої) евапотранспірації (ПЕТ) з поверхні ґрунту на основі даних метеоспостережень. Для оцінки ПЕТ було використано метод Пенмана–Монтейна (для референтної поверхні “ґрунт без рослинності”) [Monteith, 1981].

3.3.2. Вхідні дані і результати визначення коефіцієнту вологоперенесення

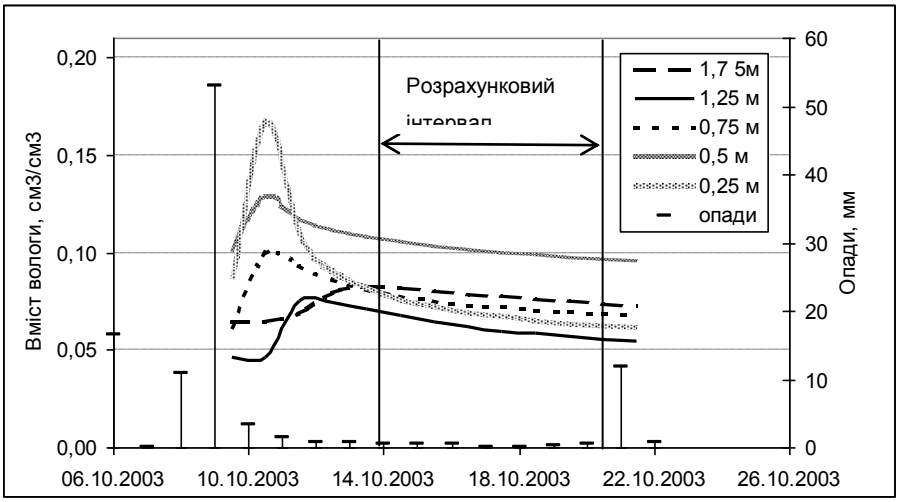
Описаний в підрозд. 3.3.1 метод “миттєвого профілювання балансу вологи в ґрунтовому профілі” було застосовано для побудови *in-situ* залежності K(ψ) для глибини 1,5 м. Для розрахунків коефіцієнту вологоперенесення було вибрано 6 слушних дощових епізодів в 2001-2004 рр., що перелічені в таблиці 3.1. Для кожного дощового епізоду було оцінено кілька (3-8) значень коефіцієнту вологоперенесення для відповідного діапазону значень капілярного тиску впродовж “стікання” вологи в ґрунтовому профілі.

Приклад вхідних моніторингових даних і розрахункових параметрів, отриманих із використанням описаної методики наведено на рис. 3.8, де проаналізовано гравітаційний дренаж ґрунтового профілю після інтенсивного дощу (108 мм опадів), що відбувся 09.10.2003 р.

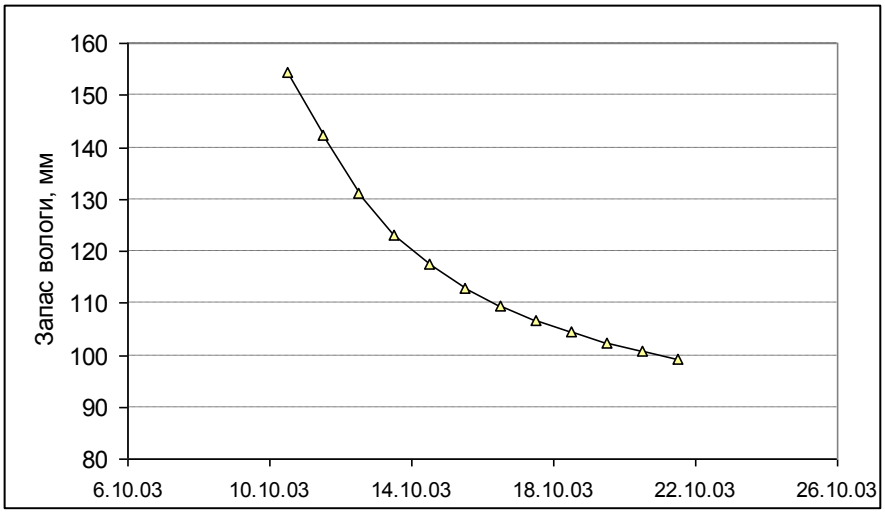
Таблиця 3.1.

Перелік дощових епізодів, що використані для розрахунку коефіцієнту вологоперенесення на глибині 1,5 м на станції моніторингу «Шурф»

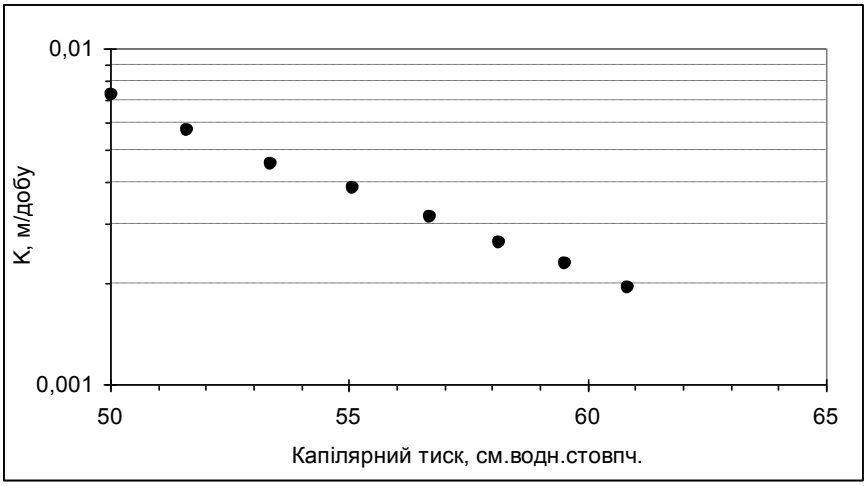
Дата дощу	Опади, мм	Розрахунковий інтервал (початок, кінець)	Щоденна евапотранспірація (діапазон та середнє значення), мм/добу	Щодення втрата води із ґрунтового профілю через дренування (діапазон та середнє значення), мм/добу
29/03/01	34 мм	29/03/2001 13/04/2001	2,4-0,5 1,7	1,4-0,7 1,0
01/05/01	83 мм	01/05/2001 11/05/2001	3,4-1,0 2,6	8,5-1,3 3,3
02/09/03	131 мм	11/09/2003 30/09/2003	2,0-0,8 1,3	1,7-0,7 1,1
09/10/03	108 мм	13/10/2003 21/10/2003	0,5-0,0 0,3	7,9-1,4 3,5
01/09/04	18 мм	06/09/2004 09/09/2004	0,8	5,3-3,5 4,3
19/10/04	72 мм	30/10/2004 13/11/2004	0,7-0,1 0,3	1,7-0,7 1,1



(а)



(б)



(в)

Рис. 3.8. Моніторингові дані і розрахункові параметри згідно методу “миттєвого профілювання вологи в ґрунтовому профілі” для дощу, що відбувся 10.10.2003: (а) динаміка зміни вмісту вологи в ґрунті на різних глибинах; (б) зміна запасу вологи в шарі ґрунту глибиною 1,5 м; (в) результуючий графік залежності коефіцієнту вологоперенесення від капілярного тиску.

Для деяких розрахункових інтервалів виявилось, що витрати на евапотранспірацію з поверхні ґрунту можуть бути значущими (особливо для пізніх етапів “стікання” ґрунтового профілю, коли запаси вологи в ґрунті зменшуються й інтенсивність дренажу затухає) (див. табл. 3.1). Відповідні дані не були враховані при побудові остаточних оцінок коефіцієнту вологоперенесення. Одержаний в результаті набір експериментальних точок K(ψ) та результати регресійного аналізу показано на рис. 3.9 (а).

Експериментальні дані описуються наступною *in-situ* експоненційною функціональною залежністю (3.8):

$$K(\psi) = 3{,}8 \exp(-0{,}13\,\psi) \qquad (3.8)$$

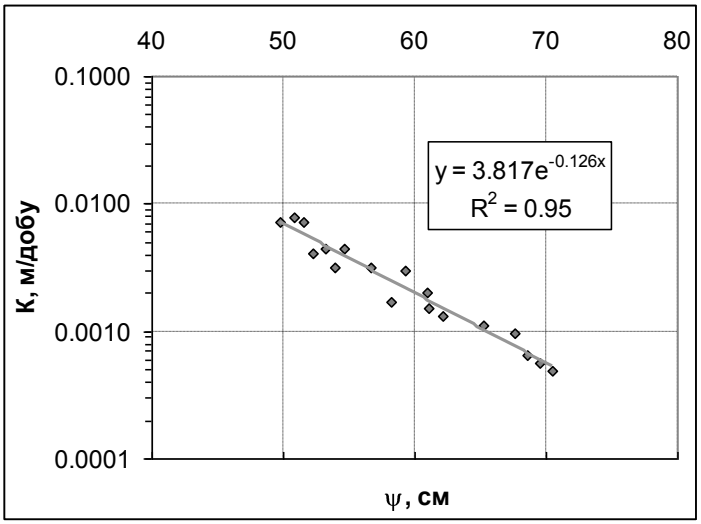
Тут коефіцієнт вологоперенесення K(ψ) вимірюється в одиницях м/добу, а капілярний тиск ψ – у см водн. стовпчика.

Одержані результати узгоджуються з оцінками фільтраційних параметрів зони аерації, одержаними в ході виконаного раніше контрольованого наливу (інфільтраційного тесту) на полігоні [Bugai et al., 2008] (рис. 3.9 (б)).

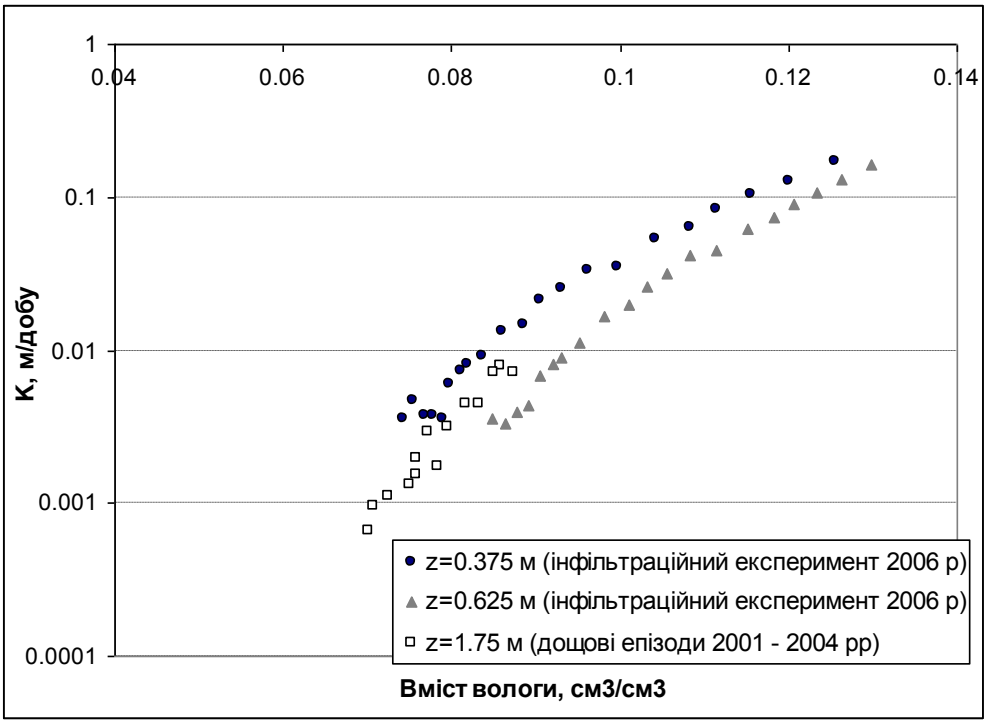
Для ψ=0 (тобто в умовах повного насичення пор ґрунту вологою) вищенаведена формула дає значення коефіцієнту фільтрації K_s=3,8 м/добу, що узгоджується з незалежними оцінками K_s для еолових пісків на полігоні (3-5 м/добу, див. підрозд. 2.3.4 табл. 2.1 або [Бугай та ін, 2007]).

Перевагою запропонованого методу є те, що коефіцієнт вологоперенесення визначається in-situ в умовах непорушеного ґрунтового профілю в діапазоні значень тиску вологи (або вмісту вологи в ґрунті), що є характерним для природного режиму зони аерації.

Одержані нами оцінки K(ψ) для різних дощових епізодів добре узгоджуються між собою і утворюють експоненційний тренд, що відповідає теоретичним уявленням (модель Гарднера [Bear, 1979; Fredlund and Rahardjo, 2000]) про рух вологи в ненасиченому пористому середовищі. Відповідні параметри експоненційного рівняння склали: K_s = 3,8 м/добу; a = -0,13 см$^{-1}$.



(а)



(б)

Рис. 3.9. Результати розрахунків залежності коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску К(ψ) на основі аналізу спостережень за дренажем ґрунтового профілю після дощів для ґрунту на глибині 1,5 м:
(а) експериментальні точки і результуючий експоненційний тренд для К(ψ) (аналітична модель Гарднера); (б) порівняння розрахованих значень К(θ) з даними інфільтраційного тесту на полігоні в листопаді 2006 р.
[Bugai et al., 2008]

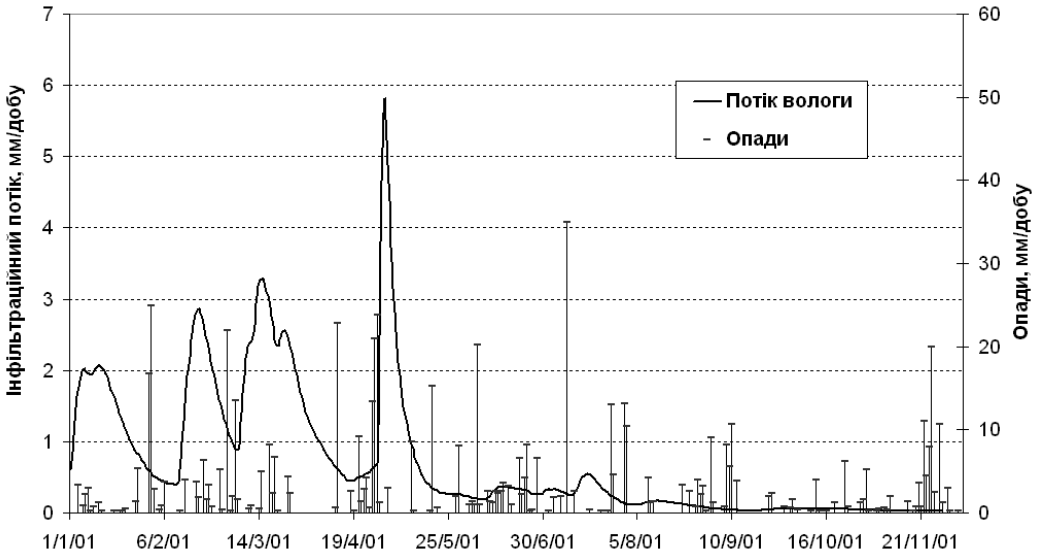
3.4. Результати застосування гідрофізичного методу: детальний щодобовий режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод протягом 2001-2004 рр. та його аналіз

Розрахунки швидкості вологоперенесення (або потоку вологи – V, мм/добу) із застосуванням формули (3.3) виконані для умовного розрізу ґрунтового профілю, що відповідає глибині Z=1,5 м. При цьому були використані дані про режим всмоктуючого тиску та гідравлічного напору на глибинах 1,25 м і 1,75 м (див. підрозд. 3.1.2, 3.1.3), і залежність для коефіцієнта вологоперенесення, наведена в підрозд. 3.3.2. Схематичний розріз ґрунтового профілю, для якого проводилися розрахунки вологоперенесення із використанням даних станції моніторингу “Шурф” див. на рис. 3.7.

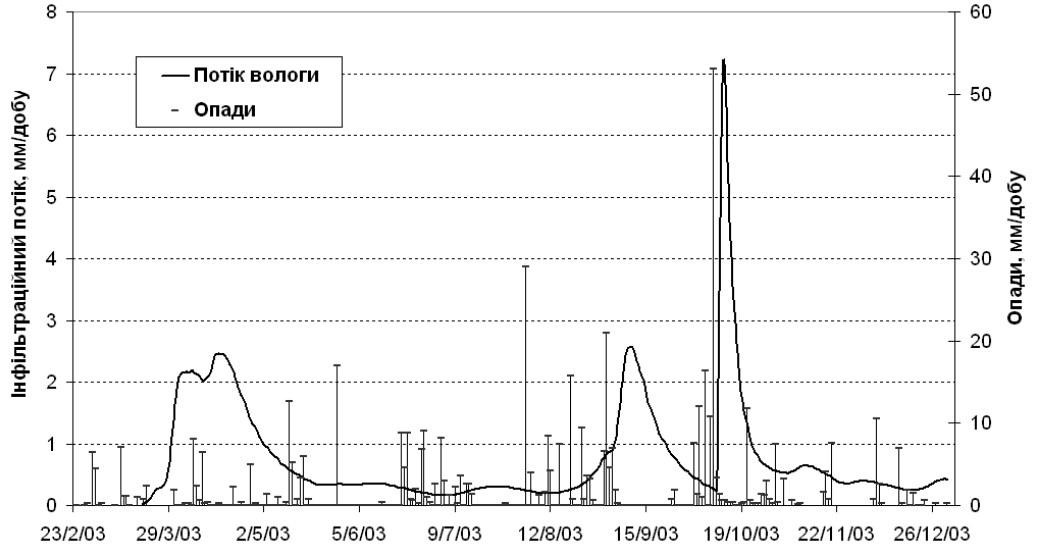
Одержані графіки інфільтраційного живлення ґрунтових вод (направленого донизу вологоперенесення) для 2001, 2003 і 2004 рр. представлено на рис. 3.10. (в 2000 та 2002 рр. станція «Шурф» відносно довго не функціонувала через неполадки з елементами живлення; через це розрахунки для цих років не проводилися).

Результати розрахунків (рис. 3.10) свідчать, що інфільтраційне живлення ґрунтових вод не є “рівномірно розподіленим” впродовж року, а є приуроченим до певних метеорологічних явищ, таких як весняне сніготанення, зимові відлиги, інтенсивні опади у весняний і осінній період (в деяких випадках літні зливи також призводять до залпових надходжень вологи до водоносного горизонту).

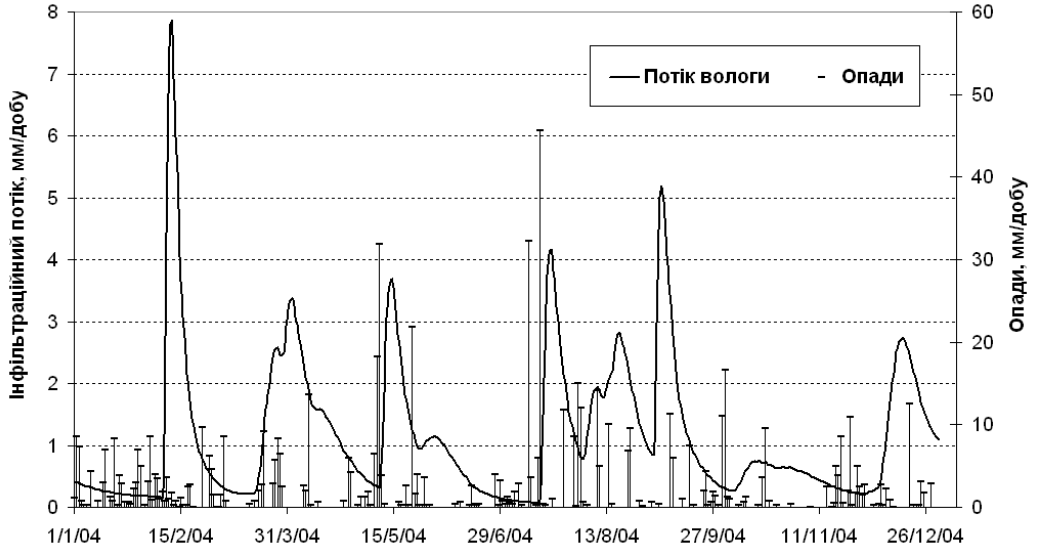
Відповідні “пікові” періоди дають найбільший вклад у річне інфільтраційне живлення ґрунтового водоносного горизонту. Максимальна величина інфільтраційного живлення для однієї доби склала ≈ 8 мм (на початку сніготанення в лютому 2004 р.; див. рис. 3.10 (в)). Для порівняння впродовж сухих періодів року інфільтраційне живлення зменшується до значень порядку 0,1 мм/добу (напр., осінній період 2001 р.; див. рис. 3.10 (а)).



(а)



(б)



(в)

Рис. 3.10. Режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод (на глибині 1,5 м): (а) в 2001, (б) 2003 та (в) 2004 рр.

Термін, коли добова величина інфільтраційного живлення становила 1-8 мм/добу (в середньому 2,2 мм/добу) склав 30% розрахункового періоду (295 діб з 987), за цей час сформувалося 72,7% інфільтраційного живлення (649 із 892 мм). Термін, коли величина вологоперенесення становила 0,01-1 мм/добу (в середньому 0,35 мм/добу) склав 70% розрахункового періоду, за цей час сформувалося 27,3% інфільтраційного живлення.

Величини річного інфільтраційного живлення для 2001, 2003 та 2004 рр. наведені в табл. 3.2. Річне інфільтраційне живлення змінюється в досить широких межах від ≈ 240 мм до ≈ 429 мм, що відповідає 40-64% річної кількості опадів. Середнє значення за період складає 311 мм (49% середньорічної кількості опадів).

Розподіл інфільтраційного живлення в межах конкретного року має свої особливості (див. рис. 3.8, табл. 3.2) та залежить від метеорологічних умов.

Великий вклад (у 2001 та 2004 найвагоміший вклад) у річне інфільтраційне живлення вносить весна, оскільки цього сезону тануть снігові опади, що накопичилися за зиму, ідуть дощі, а температурний режим не сприяє випаровуванню.

Незважаючи на звичайну для помірно-континентального клімату велику кількість опадів влітку, вклад 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 зволоженим) та помірний температурний режим.

Таблиця 3.2

Оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на експериментальному полігоні в чорнобильському “Рудому лісі” згідно гідрофізичного методу

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
Середнє					**311**	**49**	**625**

* - 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, див. розд. 4.

Для Полісся характерно, що за зиму випадає найменше опадів (див. підрозд. 2.3.1), але 2001 та 2004 роки були винятками, опадів було більше, ніж восени. Відповідно і величина інфільтраційного живлення (> 100 мм), і вклад у річне живлення (> 25 %) були значними. Частина 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 для осені суттєво відрізнялася для всіх 3 років. Для 2003 та 2004 рр. вона змінюється (107 мм, 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 це, незважаючи на достатньо велику сумарну кількість опадів (136 мм), інфільтраційний потік вологи протягом осені був майже відсутнім.

Зазначимо, що гідрофізичний метод оцінки інфільтраційного живлення забезпечує визначення інфільтраційного живлення в конкретному ґрунтовому профілі (в нашому випадку в ґрунтовому профілі зони аерації за межами траншеї, див. підрозд. 2.2.3). Тому одержані результати можуть в певних межах відрізнятися від регіональних оцінок інфільтраційного живлення. Зокрема, оскільки ділянка поруч з станцією моніторингу «Шурф» не була вкрита рослинністю, одержані величини інфільтраційного живлення можуть бути дещо вищими у порівнянні з регіональними оцінками, що зазнають впливу процесів евапотранспірації вологи рослинністю.

3.5. Висновки до розділу

За даними спостережень в 2000-2004 рр. на дослідному полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» ґрунтовий профіль можна поділити що до напрямків вологоперенесення на дві зони. В верхній частині розрізу зони аерації на глибинах до 1,25 м протягом року під впливом метеорологічних чинників може відбуватися різно-направлене вологоперенесення (в вологі періоди – вниз, в

сухі періоди – вверх). Інтервал глибин від 1,25 м до РҐВ характеризується стійким направленим вниз вологоперенесенням протягом всього календарного року.

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 вологоперенесення в ґрунтах зони аерації. Залучення автоматизованих систем збору даних дозволяє забезпечити високу детальність моніторингових даних в часі та просторі, що значно розширює можливості обробки й інтерпретації даних, зокрема дозволяє отримати режим щоденного інфільтраційного живлення для періоду спостережень.

Наведені результати засвідчують також, що метод “миттєвого профілювання балансу вологи” в ґрунтовому профілі може бути ефективно використаний для оцінки коефіцієнту вологоперенесення ґрунтів на основі аналізу автоматизованих спостережень за режимом зони аерації.

Цікавий висновок досліджень полягає в тому, що інфільтраційне живлення на протязі календарного року не є рівномірним у часі, а є значною мірою приурочене до окремих метеорологічних подій (весняне сніготанення, відлиги в холодні періоди року, великі зливи в теплі періоди року). Термін, коли добова величина інфільтраційного живлення становила 1-8 мм/добу (в середньому 2,2 мм/добу) склав 30% розрахункового періоду (295 діб з 987), за цей час сформувалося 72,7% інфільтраційного живлення (649 із 892 мм). Термін, коли величина вологоперенесення становила 0,01-1 мм/добу (в середньому 0,35 мм/добу) склав 70% розрахункового періоду, за цей час сформувалося 27,3% інфільтраційного живлення.

Визначене для 2001, 2003 і 2004 рр. річне інфільтраційне живлення ґрунтового водоносного горизонту експериментального полігону ІГН в ПТЛРВ “Рудий ліс” склало від ≈240 до ≈429 мм, що відповідає 40-64% кількості опадів. Середнє значення складає 311 мм (49% річної кількості опадів). Розрахунки свідчать, що величина інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту і його розподіл між сезонами року суттєво залежить від метеорологічних особливостей конкретного року.

Результати дисертаційних досліджень, представлені в даному розділі, наведено в наступних публікаціях:

1. **Саприкін В.**, Бугай Д., Скальський О., Ван Меєр Н. Визначення коефіцієнту вологопереносу пісків in-situ на основі аналізу динаміки вмісту вологи в ґрунтовому профілі після дощів. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Серія: Геологія*. 2010. №49. С. 42-46 (Особистий внесок – виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

2. **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”. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України.* 2011. Вип. 4. С. 141-151 (Особистий внесок – виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

3. Бугай Д.О., Скальський О.С., **Саприкін В.Ю.,** Natalie Van Meir. Оцінка коефіцієнту вологопереносу піщаного ґрунту *in-situ* на основі автоматизованих спостережень за режимом зони аерації. *Моніторинг геологічних процесів*: матеріали IX Міжнародної наукової конференції, 14-17 жовтня 2009 р. Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2009. С. 256-257.

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». *Сучасні напрями геологічних досліджень в Україні*: збірник матеріалів молодіжної наукової конференції, 9-10 листопада 2011 р. Київ, Інститут геологічних наук НАН України, 2011. С. 54-56.

5. **Volodymyr Saprykin**. The Regime of an Infiltration Flux in Unsaturated Zone to Groundwater at Chernobyl “Red Forest” Radioactive Waste Site. *3rd Students International Geological Conference*. Abstracts. April 27-30, 2012. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2012. 34-35 pp.

РОЗДІЛ 4
МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ІНФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД І ОЦІНКИ КОЕФІЦІЄНТУ ВОДОВІДДАЧІ ПІЩАНИХ ҐРУНТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОЛИВАНЬ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД ДЛЯ ПТЛРВ “РУДИЙ ЛІС”

В даному розділі дисертації запропоновано вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на основі аналізу коливань РҐВ, і наведено результати його застосування до набору моніторингових даних, одержаних на полігоні в ПТЛРВ “Рудий ліс”.

Для аналізу використано дані автоматизованого моніторингу РҐВ і метеорологічних параметрів на експериментальному полігоні ІГН в ПТЛРВ «Рудий ліс» (опис полігону наведений в розд. 2; засоби автоматизованого моніторингу описані в підрозд. 2.4.2-2.4.4). Також використано дані про режим інфільтраційного потоку в зоні аерації полігону, розрахований гідрофізичним методом (див. розд. 3).

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 (нестачі насичення) ґрунтів зони аерації на основі аналізу коефіцієнтів кореляції між величинами опадів і відповідними інтегральними (з урахуванням рецесії) підвищеннями РҐВ.

Вдосконалені методики застосовано для розрахунку інфільтраційного живлення підземних вод на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» за період 2000-2012 рр. В окремому підрозділі порівнюються та аналізуються результати оцінки інфільтраційного живлення на полігоні різними методами.

4.1. Стандартна схема застосування методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод

Метод розрахунку інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ (або WTF-метод [Healy, Cook, 2002]) відноситься до балансових методів. Метод базується на припущенні, що підвищення РҐВ відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів з поверхні землі. Інфільтраційне живлення (w) за період часу Δt розраховується за загальною формулою (рис. 4.1):

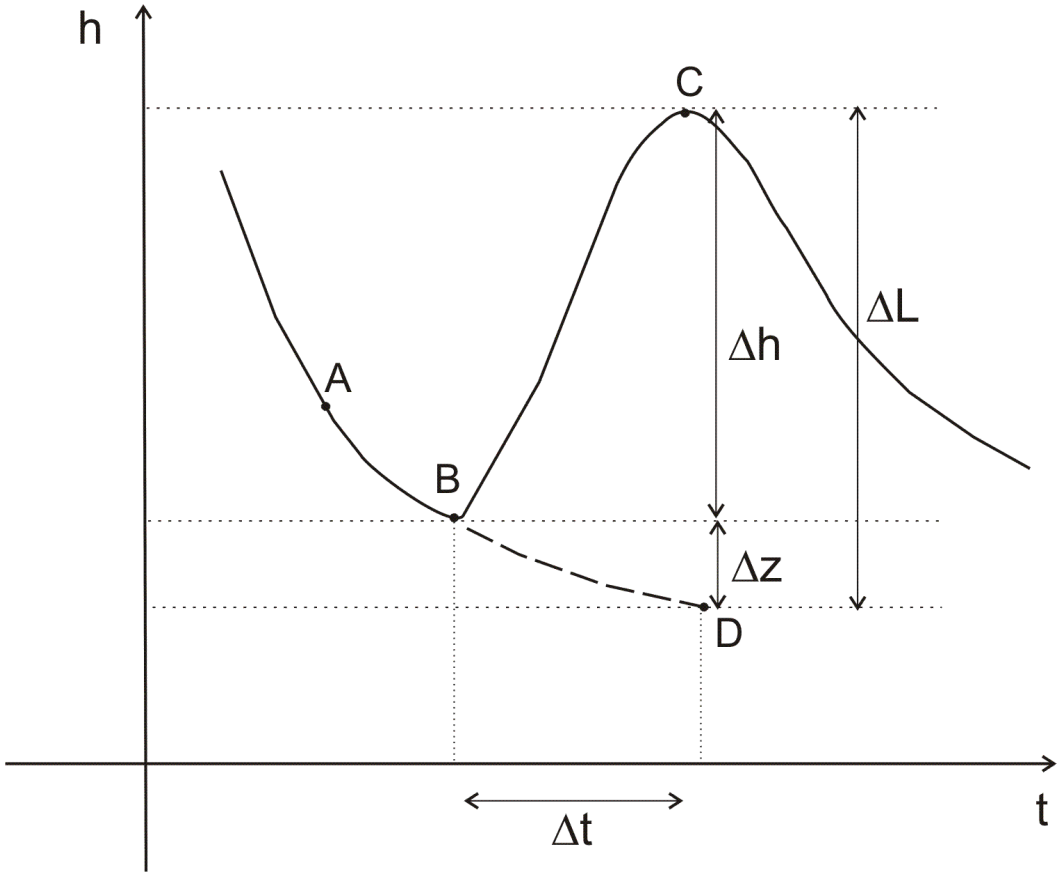


Рис. 4.1. Загальна схема методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод [Healy, Cook, 2002].

$$w = \mu\,(\Delta h + \Delta z) / \Delta t, \qquad (4.1)$$

де μ – коефіцієнт водовіддачі ґрунту (нестачі насичення); ΔL = Δh + Δz – інтегральний підйом РҐВ за період Δt (м), причому Δh – різниця між максимальним значенням РҐВ, досягнутим внаслідок надходження інфільтраційної вологи (точка C гідрографу РҐВ, рис. 4.1) і значенням РҐВ до початку підвищення (точка B); Δz – різниця між значенням РҐВ до початку підвищення (точка B) та екстрапольованим значенням РҐВ (точка D), до якого б

знизився РҐВ за час Δt у разі відсутності інфільтрації. Значення Δz (точка D, рис. 4.1) визначається графічно шляхом екстраполяції рецесії гідрографа свердловини.

Згідно з літературними джерелами [Біндеман, 1963; Healy and Cook, 2002], для того, щоб визначити Δz, потрібно графічно екстраполювати останній відрізок графіку зниження РҐВ, що передує наступному підвищенню (від точки A до точки B, на рис. 4.1). Нижче (розд. 4.2) ми покажемо, що до процедури оцінки швидкості рецесії РҐВ і відповідної екстраполяції гідрографа в загальному випадку треба ставитись прискіпливіше, враховуючи, зокрема, відомості про попередні атмосферні опади.

Нагадаємо, що застосування методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ потребує також визначення величини коефіцієнта водовіддачі (нестачі насичення ґрунту) μ. Коефіцієнт μ є емпіричним параметром, що характеризує баланс вологи в порах ґрунту в зоні коливань РҐВ. Питання оцінки коефіцієнта μ розглядається у розд. 4.3.

Зазначимо, що РҐВ 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, метод оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ є методом інтегральної (по площі) оцінки інфільтраційного живлення, на відміну від методів, які базуються на оцінюванні інфільтраційного потоку в конкретному ґрунтовому профілі (таких як гідрофізичний метод, див. розд. 3).

4.2. Вдосконалений варіант оцінки швидкості рецесії РҐВ при застосуванні методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод

Як вже зазначалося, було виконано комплексний аналіз даних моніторингу РҐВ на експериментальному полігоні ІГН в ПТЛРВ “Рудий ліс” (опис системи моніторингу – див. підрозд. 2.4.3; приклад даних моніторингу – див. рис. 2.12), метеоданих (див. підрозд. 2.4.2), а також одержаних у результаті застосування гідрофізичного методу даних про інфільтраційний потік вологи в

зоні аерації (див. розд. 3). На рис. 4.2 представлені результати моніторингових спостережень на полігоні (у вигляді графіків) за період з травня по листопад 2003 р. Уверху зображено комбінований графік коливання РҐВ (ліва вісь ординат, м БСВ) і графік інфільтраційного потоку в зоні аерації на глибині 1,5 м (права вісь ординат, мм/добу). Внизу подано графік атмосферних опадів.

На рис. 4.2. видно, що з травня по липень 2003 р. відбувалася стійка рецесія (зниження) РҐВ (відрізок «точка А – точка В» гідрографа, рис. 4.2): кількість опадів в цей період була незначною та витрачалася на евапотранспірацію; інфільтраційний потік був дуже малим і становив десяті частки мм/добу (рис. 4.2). 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 РҐВ 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 РҐВ (відрізок «точка С – точка D» гідрографа).

Очевидно, що для коректної оцінки інфільтраційного живлення для інфільтраційного епізоду, зображеного на рис. 4.2, екстраполяцію рецесії РҐВ для визначення Δz (формула (1)) потрібно виконувати, виходячи зі швидкості рецесії РҐВ 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. 4.2.

Якщо використати для екстраполяції гідрографа інтервал безпосередньо перед підвищенням РҐВ (в нашому випадку це відрізок «точка В – точка С»), то швидкість рецесії РҐВ буде суттєво занижена (пунктирна лінія «точка В – точка С – точка F»). Відповідно, були б занижені оцінки величини Δz в формулі (4.1) і результуюча оцінка інфільтраційного живлення.

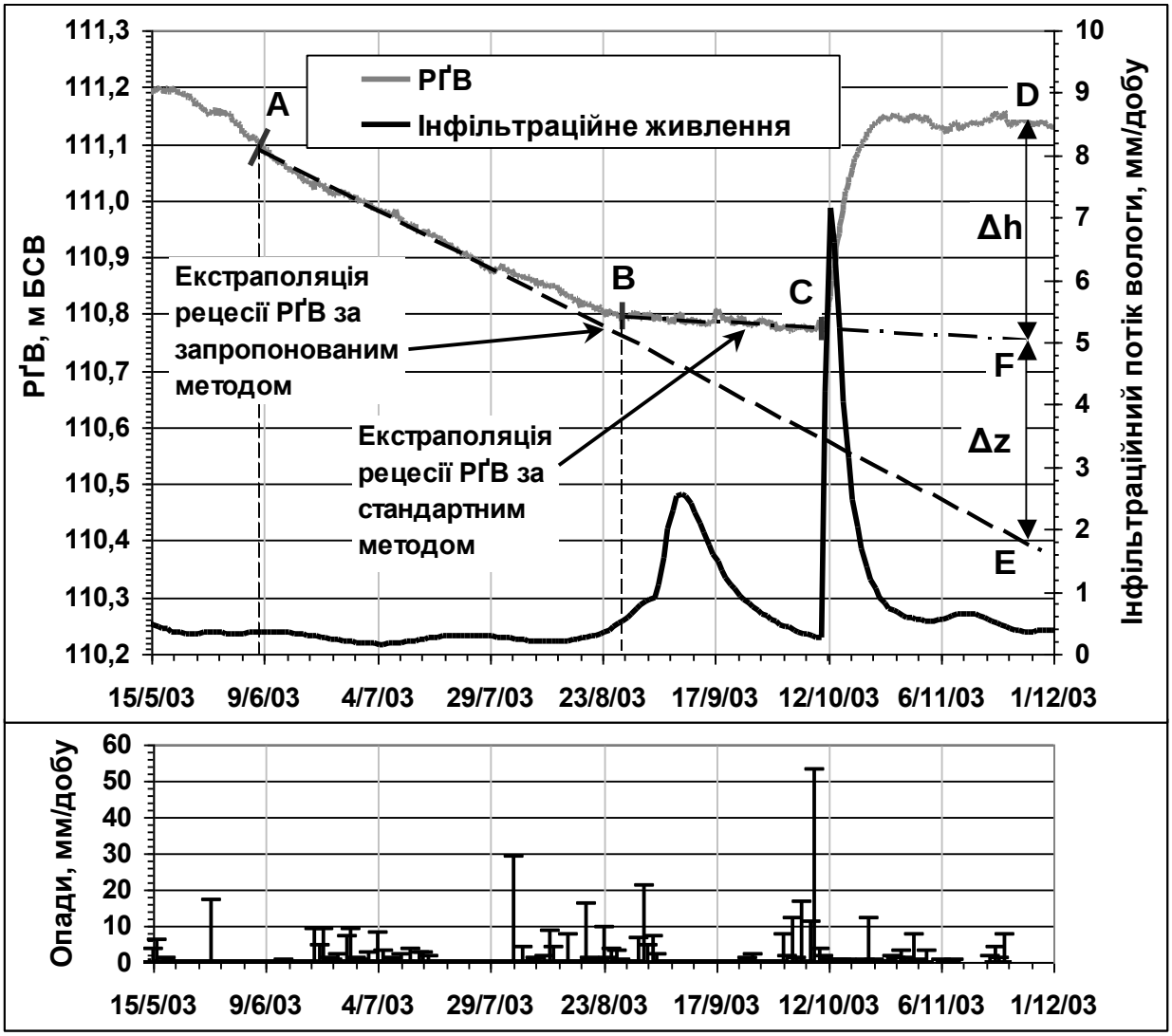


Рис. 4.2. Схема та приклад застосування модифікованого методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод для розрахунку інфільтраційного живлення ґрунтових вод полігону, розташованого в ПТЛРВ «Рудий ліс» для одного з періодів інфільтрації опадів (травень – листопад 2003 р.)

Таким чином, запропонована дисертантом модифікована схема застосування WTF-методу полягає в наступному:

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

2. Для оцінки швидкості рецесії РҐВ 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 РҐВ.

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 РҐВ безпосередньо після великих дощів можуть бути спричинені ефектами, пов'язаними з впливом капілярної кайми, перепадами атмосферного тиску і затисненим у порах ґрунту повітрям (так званий ефект Ліззе) [Healy, Cook, 2002]. Тому краще не використовувати інтервали гідрографа РҐВ одразу після великих опадів для оцінки швидкості рецесії впродовж більш тривалих і менш динамічних наступних інтервалів.

Варто зазначити, що характер коливань РҐВ у спостережній свердловині може визначатись не тільки вертикальним надходженням вологи до РҐВ та латеральним відтоком води через водоносний горизонт, але й впливом інших чинників, зокрема змінами величини регіонального гідравлічного градієнта в водоносному горизонті (що може бути пов'язано, наприклад, зі змінами рівнів регіональних дрен – річок, струмків), змінами величини випаровування та транспірації рослинами (через зміну метеорологічних параметрів, внаслідок видалення чи навпаки насадження рослинності та її зростання) та ін. Тому чинники, що впливають на рецесію РҐВ, в кожному конкретному випадку є специфічними для відповідних гідрогеологічних умов.

Уникнути похибок, пов'язаних з переліченими факторами, можна, якщо періоди для екстраполяції гідрографа розподілити досить рівномірно протягом року. Якщо, в такому випадку, при аналізі гідрографу (з метою відбору періодів рецесії РҐВ для подальшої екстраполяції) немає змоги відкинути всі періоди, в межі яких потрапляють "проміжні" опади, наведену вище рекомендацію варто врахувати хоча б частково, тобто обрати періоди з мінімальною кількістю опадів.

4.3. Методика визначення коефіцієнта водовіддачі ґрунтів зони аерації

Для оцінки інфільтраційного живлення за допомогою методу аналізу коливань РҐВ необхідно знати коефіцієнт водовіддачі (або нестачі насичення – μ) ґрунтів, які потрапляють в зону коливання РҐВ. Величина цього емпіричного коефіцієнта суттєво впливає на результати розрахунків.

Розглянемо узагальнений епізод атмосферних опадів (якому відповідає шар води P), що викликає інтегральне підвищення РҐВ $\Delta L = \Delta h + \Delta z$, тобто підвищення РҐВ розраховується з урахуванням рецесії РҐВ (рис. 4.1).

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

$$P = w + Tr, \qquad (4.2)$$

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

Підставивши в рівняння (4.2) формулу (4.1) для w, маємо:

$$P = \mu (\Delta h + \Delta z) + Tr. \qquad (4.3)$$

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) коефіцієнт Tr можна вважати в першому наближенні константою.

Таким чином, при наявності експериментального набору даних про величини окремих дощів та відповідні інтегральні підвищення РҐВ {(Pi, ΔLi), I = 1,…, N} величини μ та Tr можуть бути емпірично визначені за допомогою лінійної регресії по цьому набору даних. Одержані в такий спосіб значення μ та Tr є усередненими за всім набором даних.

Даний метод оцінки μ було застосовано до експериментального набору даних, одержаних на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» (табл. 4.1). Результати лінійної регресії представлені на рис. 4.3. Оцінені величини коефіцієнтів становлять: μ = 0,11 (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 відрізняється від усередненого значення (22 мм) в залежності від конкретних метеорологічних умов.

Таблиця 4.1.

Експериментальний набір величин опадів та відповідних підйомів РҐВ, одержаний на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс», за яким було розраховано коефіцієнт водовіддачі (нестачі насичення) ґрунтів

Періоди проходження опадів	P, мм	Δ*h*, мм	Δ*h* + Δz, мм	Δz, мм
10/07/00	101	568	677	109
26/04/01 - 28/04/01	58	277	389	112
09/07/01	35	56	123	67
07/05/04 - 09/05/04	56	144	282	138
01/10/04 - 02/10/04	28	52	152	100
17/06/05 - 18/06/05	66	293	369	76
11/6/07 - 12/6/07	41	71	151	80
23/7/07 - 25/7/07	31	23	63	40
12/7/10 - 13/7/10	52	98	170	73
Середнє значення	52	176	264	88

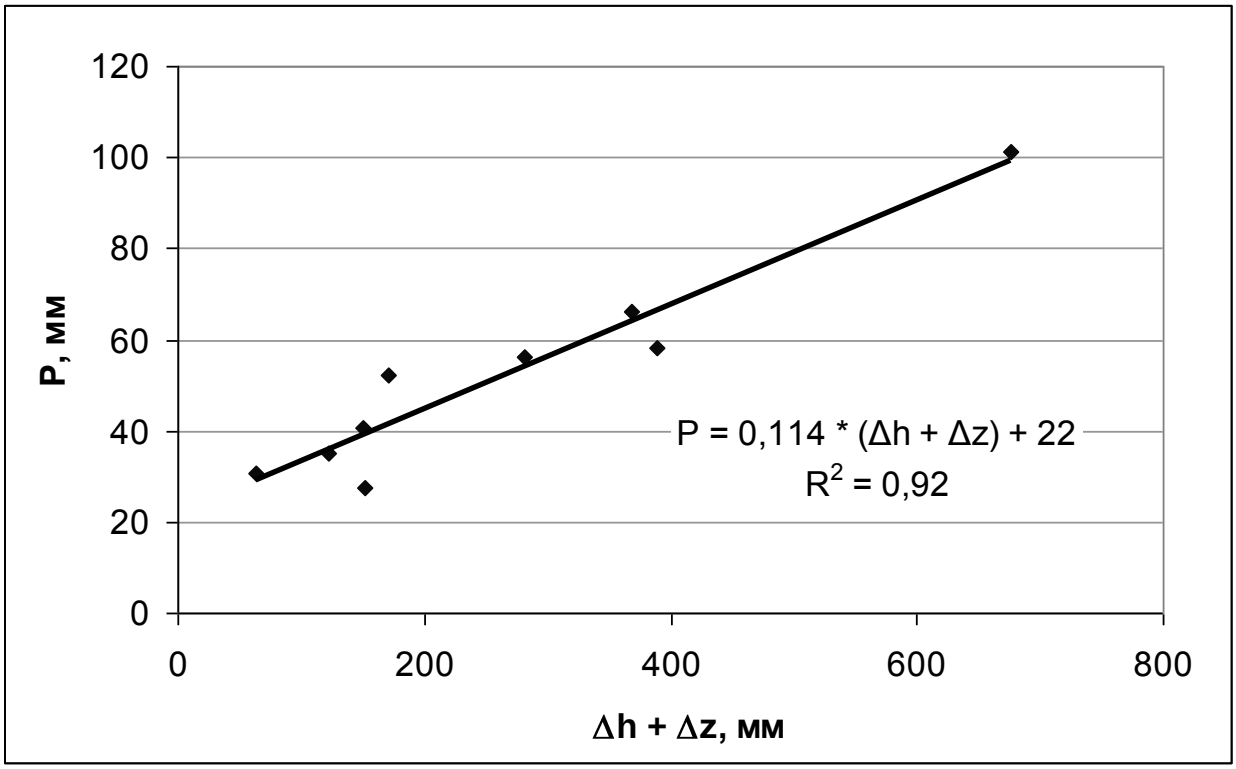


Рис. 4.3. Кореляційна залежність (лінійна регресія) між кількістю опадів та відповідними інтегральними підвищеннями РҐВ (дані спостережень на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» за 2001-2010 рр.).

Одержане значення μ = 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 РҐВ.

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

4.4. Результати розрахунків інфільтраційного живлення ґрунтових вод на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс» за 2000-2012 рр. із застосуванням вдосконаленого методу

Результати розрахунків інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ на полігоні ІГН НАН України в ПТЛРВ «Рудий ліс» наведено в табл. 4.2, рис. 4.4. Розрахунки виконувалися за методикою, описаною в розд. 4.2, і використовували оцінену в розд. 4.3 величину $\mu = 0{,}11$. Приклад розрахунку інфільтраційного живлення в графічному вигляді показано на рис. 4.2. (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. 4.5 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 рівняння лінійної регресії інфільтраційне живлення може бути наближено оцінене величиною в 63% від річної суми опадів мінус 100 мм (рис. 4.5).

Таблиця 4.2.

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

Рік	Кількість опадів, мм	Інфільтраційне живлення, мм			
		Гідрофізичний метод*	% від опадів	Метод аналізу коливань РҐВ	% 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

* Див. розд. 3.

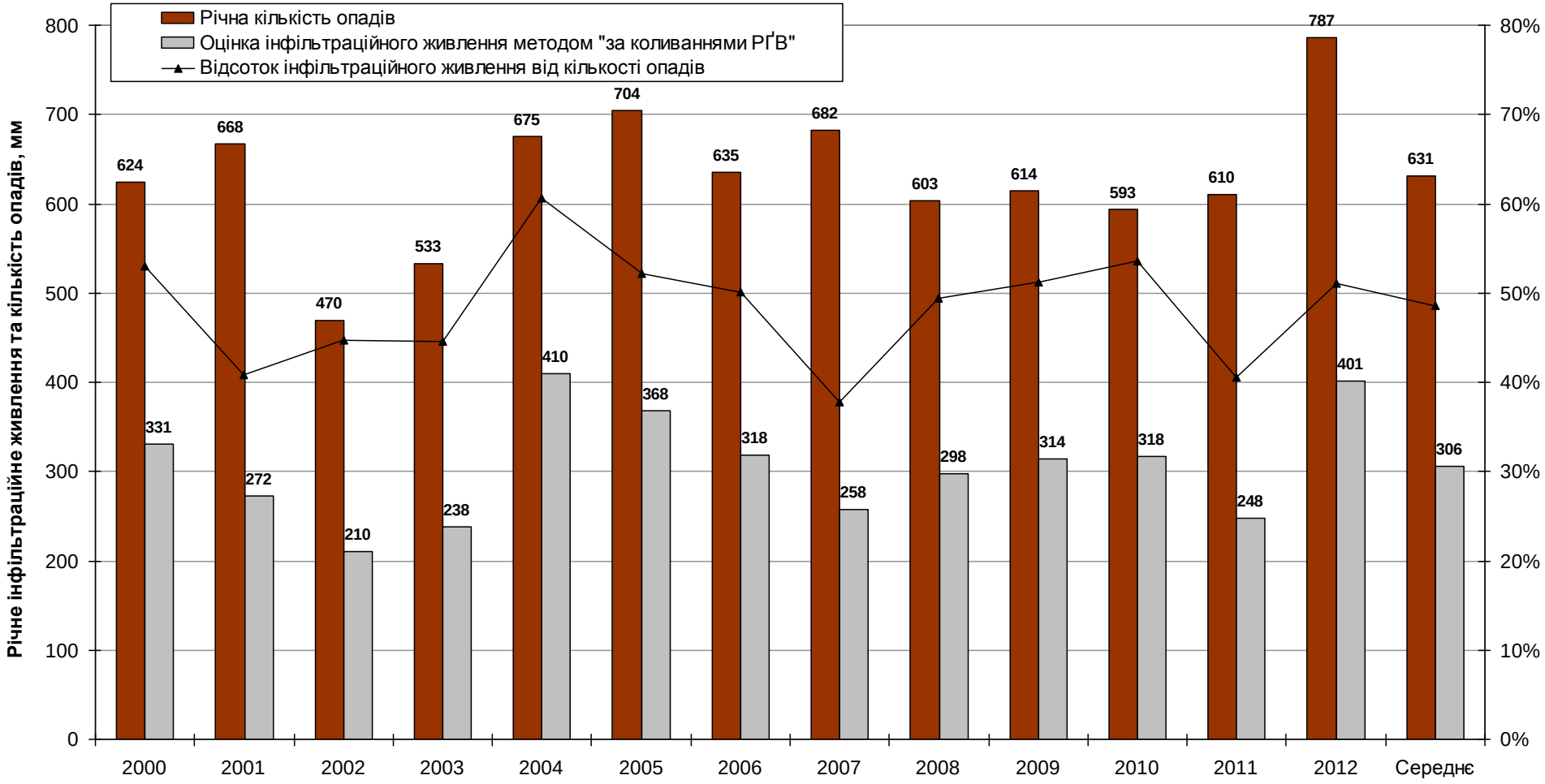


Рис. 4.4. Інфільтраційне живлення за 2000-2012 рр. на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс», розраховане модифікованим методом аналізу коливань рівня ґрунтових вод, в порівнянні з річними кількостями опадів.

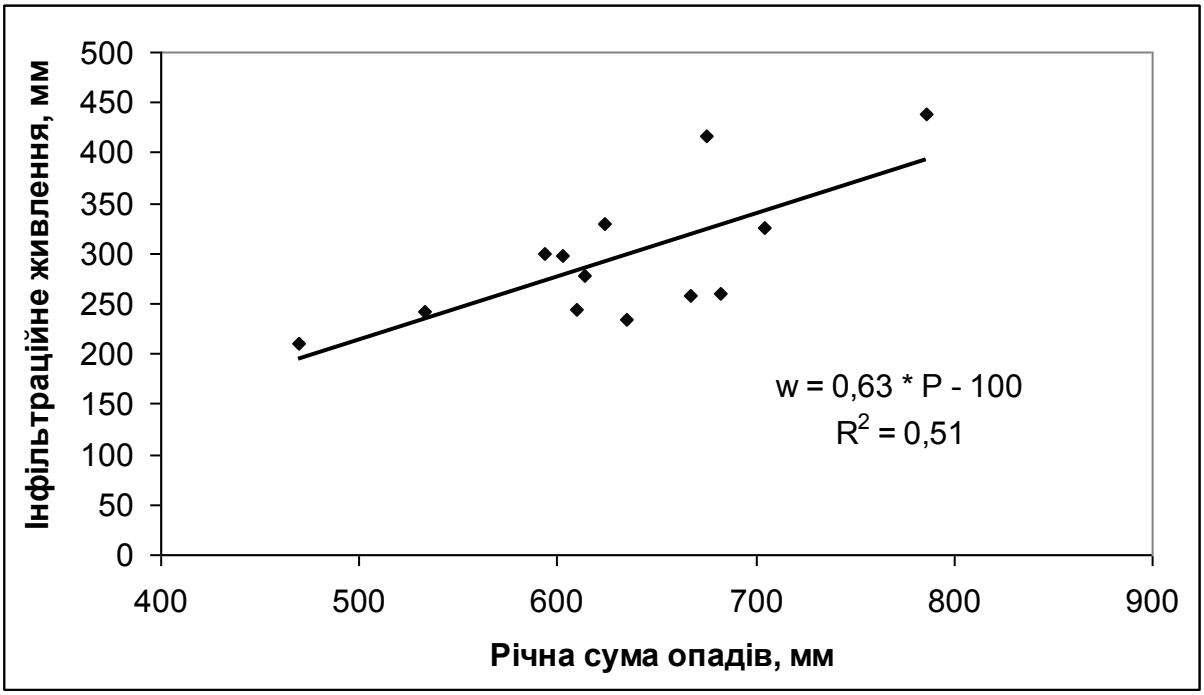


Рис. 4.5. Кореляційна залежність (лінійна регресія) між річною сумою атмосферних опадів та інфільтраційним живленням на полігоні в ПТЛРВ «Рудий ліс», оціненим за методом аналізу коливань РҐВ

4.5. Порівняння оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод ПТЛРВ "Рудий ліс" різними методами

Інфільтраційне живлення підземних вод на полігоні ІГН НАНУ в ЧЗВ досліджувалося на протязі 2000-2012 рр. наступними основними методами:

- гідрофізичним методом (див. розд. 3),
- методом аналізу коливань РҐВ,
- гідрохімічним методом [Bugai and al., 2012],
- методом оцінки інфільтраційного живлення на основі ізотопного датування віку підземних вод [Бугай и др., 2010],
- на основі калібрування регіональної планової фільтраційної моделі із використанням програми MODFLOW [Скальский и Кубко, 2011],
- на основі калібрування профільної фільтраційної моделі із використанням програми MODFLOW [Бугай и др., 2010] .

Результати порівняння інфільтраційного живлення полігону в ПТЛРВ “Рудий ліс” різними методами узагальнені в табл. 4.3. Для періоду 2000-2012 рр. інфільтраційне живлення оцінюється в діапазоні 200-440 мм/рік (в середньому ~300 мм/рік). Осереднені багаторічні (50-60 років) значення складають 180-220 мм/рік .

Зазначимо, що отримані методом аналізу коливань РҐВ оцінки інфільтраційного живлення для 2001, 2003 та 2004 рр. добре узгоджуються з оцінками гідрофізичним методом (див. табл. 4.2., 4.3; докладний опис методу наведений в розд. 3).

Таблиця 4.3.

Оцінки інфільтраційного живлення підземних вод експериментального полігону «Рудий ліс».

Метод	Період	Тип оцінки	Інфільтраційне живлення, мм/рік	Використане джерело
Гідрофізичний метод	2001, 2003, 2004	Точкова	310 (середнє)	Див. розд. 3
Аналіз коливань РҐВ	2000-2012	Локальна	295 (середнє)	-
Гідрохімічний	Середнє за 5-10 р.	Локальна	200-250	[Bugai and al., 2012]
Калібрування профільної моделі за даними ізотопного датування ґрунтових вод	Багато-річна (50-60 р.)	Регіональна	180-220	[Бугай и др., 2010]
Калібрування планової моделі згідно РҐВ	1990-2000	Регіональна	250	[Скальский и Кубко, 2011]

Середньорічні оцінки величини інфільтраційного живлення в період 2000-2012 рр. за вдосконаленим методом аналізу коливань РҐВ (w ≈ 295 мм/рік, див. табл. 4.3) та в 2001-2004 рр. за гідрофізичним методом (w ≈ 310 мм/рік) є дещо більшими, ніж оцінки на основі датування віку підземних вод і калібруванням моделі фільтрації для досліджуваної території (w ≈ 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 XX 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 в порівнянні із умовами станом на 2000-2012 рр. (див. підрозд. 2.2.1, 2.2.4).

Наведемо також близьку за значенням (до отриманої для дослідного полігону ПТЛРВ «Рудий ліс») оцінку інфільтраційного живлення ґрунтових вод на лівобережній високій заплаві р. Прип'ять, отриману гідродинамічним методом і описану в [Шевченко та ін., 2011]. Тут для періоду 1998-2002 інфільтраційне живлення в середньому складає біля 250 мм/рік, а оцінки для 2000, 2001 і 2002 рр. складають 203, 245 і 249 мм/рік відповідно.

З точки зору експериментальної простоти і ефективності, метод аналізу коливань РҐВ в багатьох випадках (за умов відсутності порушень природного режиму РҐВ внаслідок антропогенних впливів, впливу поверхневих водотоків) може бути рекомендований як оптимальний підхід до визначення інфільтраційного живлення. Також бажаним є перехресне підтвердження параметрів інфільтраційного живлення мінімум двома (або більше) незалежними методами.

4.6. Висновки до розділу

В 4 розділі дисертаційної роботи запропоновано і застосовано на практиці вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ. Зокрема, задіяно відмінний від стандартного підхід до екстраполяції швидкості рецесії РҐВ при графічній екстраполяції гідрографа спостережної свердловини, що є важливим розрахунковим етапом методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ.

Також запропоновано метод оцінки коефіцієнта водовіддачі (нестачі насичення – μ) на основі регресійного визначення коефіцієнтів лінійної залежності між величиною опадів та інтегральним (з урахуванням рецесії) підвищенням РҐВ (для відповідного набору експериментальних даних). Для практичного застосування методу, окрім даних про гідрограф РҐВ у спостережних свердловинах, важливо мати відомості про величину атмосферних опадів для досліджуваного району (бажано з інтервалом спостережень не менше ніж 1 доба).

Вдосконалений і розроблений методи було застосовано для аналізу даних моніторингових спостережень за 2000-2012 рр., одержаних на експериментальному полігоні ІГН в ПТЛРВ «Рудий ліс». Оцінена величина коефіцієнта водовіддачі для піщаних ґрунтів полігону становить μ = 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.

Запропонована вдосконалена процедура застосування методу оцінки інфільтраційного живлення на основі аналізу коливань РҐВ може бути використана при визначенні інфільтраційного живлення в аналогічних гідрогеологічних і кліматичних умовах. Важливо відмітити, що

достовірність 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.

Коректність отриманих оцінок інфільтраційного живлення підтверджується їх узгодженістю з результатами застосування гідрофізичного та інших методів оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод ПТЛРВ «Рудий ліс» (див. табл 4.2, 4.3).

Результати дисертаці йних досліджень, представлені в даному розділі, наведено в наступних публікаціях:

1. **Саприкін В.Ю.**, Бугай Д.О., Скальський О.С., Кубко Ю.І. Методика розрахунку інфільтраційного живлення ґрунтових вод і оцінки коефіцієнта водовіддачі піщаних ґрунтів на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод. *Геологічний журнал*. 2015. № 1 (350). С. 89-98 (Особистий внесок – брав участь в експериментальних роботах, виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

2. **Саприкін В.Ю.**, Бугай Д.О. Порівняльний аналіз методів визначення інфільтраційного живлення підземних вод: досвід досліджень на експериментальному полігоні в чорнобильському «Рудому лісі». *Ідеї та новації в системі наук про землю*: матеріали VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції, 10-12 квітня 2019 р. Київ, Інститут геологічних наук НАН України, 2019. С. 92-93.

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ В ҐРУНТАХ ЗОНИ АЕРАЦІЇ ПТЛРВ “РУДИЙ ЛІС”

В даному розділі дисертації представлено модель вологоперенесення в ґрунтах зони аерації полігону ІГН в ПТЛРВ "Рудий ліс". Ціль моделювання полягає в тому, щоб кількісно описати процеси вологоперенесення в ґрунтах зони аерації полігону, і зокрема уточнити шляхом калібрування відповідні гідрофізичні параметри ґрунтів полігону. В дослідженнях використовується математична модель на основі нестаціонарного рівняння збереження маси вологи для ненасиченого пористого середовища – рівнянні Річардса (див. підрозд. 1.1.1).

При побудові математичної моделі вологоперенесення вирішено наступні методичні питання, що описані нижче:

– вибір програмного забезпечення для розрахунків вологоперенесення;

– розробка структури та вибір просторової дискретизації моделі;

– формулювання граничних і початкових умов;

– оцінка параметрів (коефіцієнтів) моделі;

– а також доведення того, що побудована модель адекватно описує відповідну гідрогеологічну систему (шляхом валідації моделі).

Огляд досліджень з математичного моделювання вологоперенесення і пов’язаних з цим проблемних питань представлено в розд. 1.3. Нагадаємо, що моделювання процесів вологоперенесення в піщаних ґрунтах є особливо складним завданням у зв’язку із значною нелінійністю гідрофізичних характеристик піщаних порід (тобто залежності між вмістом вологи і капілярним тиском, і залежності між капілярним тиском і коефіцієнтом вологоперенесення) [Kool et al, 1987].

5.1 Набір експериментальних даних

Для калібрування і валідації моделі використано масив даних (режимні дані щодо розподілу об'ємної вологості, всмоктуючого тиску в ґрунтовому профілі), зібраних станцією автоматизованого моніторингу за зоною аерації "Шурф" протягом 2000-2004 рр. (див. підрозд. 2.4.4), а також дані спостережень одержані із допомогою автоматизованої метеостанції (див. підрозд. 2.4.2).

Нагадаємо, що ґрунтовий профіль зони аерації полігону, в якому виконувалися спостереження за допомогою станції “Шурф” (ґрунтовий профіль за межами траншеї, див. підрозд. 2.2.3, 2.4.4.6) складається з 3 окремих шарів ґрунту:

Верхній шар (глибини 0-0,5 м) – насипний пісок, який було використано для ізоляції забрудненого радіонуклідами гумусованого шару при створенні поховань РАВ “Рудий ліс”. Середній шар (глибини 0,5-0,75 м) – гумусований піщаний ґрунт, що до дезактиваційних робіт 1987 р. являв собою приповерхневий шар. Цей шар відрізняється від інших шарів підвищеним вмістом дрібних фракцій. Нижній шар (з глибини 0,75 м та до рівня підземних вод) – дрібнозернистий кварцовий пісок еолового генезису. Загальна потужність зони аерації протягом періоду спостережень складала 2,3-3,9 м. Гранулометричний склад перелічених вище ґрунтів представлено в Таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Типовий гранулометричний склад ґрунтів профілю, що моделюється

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

5.2 Методика моделювання процесів вологоперенесення

5.2.1 Вибір програмного забезпечення

Для створення математичної моделі вологоперенесення була обрана програма HYDRUS-1D [Šimůnek et al, 2005] (див. підрозд. 1.3.3), яка базується на розв'язанні рівняння Річардса (див. рівн. 1.1) для порового насичено-ненасиченого середовища. Для розв’язання рівняння застосовується чисельний метод Галеркіна. Програма обладнана зручним графічним інтерфейсом, що спрощує роботу по підготовці вхідних та аналізу вихідних даних. HYDRUS-1D дозволяє моделювати вологоперенесення, масоперенесення, випаровування та транспірацію вологи рослинами, здатна автоматично підбирати ряд параметрів шляхом вирішення обернених задач. Програма HYDRUS-1D знаходиться у вільному доступі та може бути завантажена через Інтернет [https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?H1d-downloads].

5.2.2 Параметричні залежності для гідрофізичних характеристик ґрунтів

Для опису гідрофізичних характеристик ґрунтів в HYDRUS можна обирати кілька альтернативних аналітичних моделей. В нашому випадку для апроксимації залежності об'ємної вологості (θ) та коефіцієнта вологоперенесення від всмоктуючого тиску (ψ) було використано моделі ван Генухтена [van Genuchten, 1980] та Муалема [Mualem, 1976] (див. підрозд. 1.1.1, формули (1.5), (1.3)). Рівняння ван Генухтена (1.5) та Муалема (1.3) пов'язані між собою спільними коефіцієнтами, що під час калібрування моделі підбираються для двох рівнянь одночасно. Рівняння (1.5), (1.3) добре апроксимують натурні дані $\theta(\psi)$, $K(\psi)$ для пісків чорнобильського полігону (див. розд. 3). Більшість коефіцієнтів мають зрозумілий фізичний зміст, завдяки чому можна слідкувати за коректністю отриманих значень.

5.2.3 Структура та дискретизація чисельної моделі

Математична модель відтворює частину зони аерації біля станції “Шурф” від поверхні до глибини 1,8 м. Рівень ґрунтових вод та капілярна кайма протягом періоду спостережень були нижче цього діапазону глибин. Модель складається з трьох шарів (рис. 5.1), що відповідають охарактеризованим вище шарам ґрунту.

При побудові моделі застосована просторова дискретизація з змінним кроком (рис. 5.1), згущена біля меж моделі та границь шарів (від 5 до 1 см). Загальна кількість вузлів чисельної дискретизації – 52. Як відомо, при правильно обраній нерегулярній просторовій дискретизації, розрахунок виконується більш ефективно і точно. Зокрема, важливо щоб біля меж моделі та меж шарів величина просторового кроку складала не більше 1 см, для уникнення похибок при розрахунку потоку [Carrera-Hernández et al., 2012].

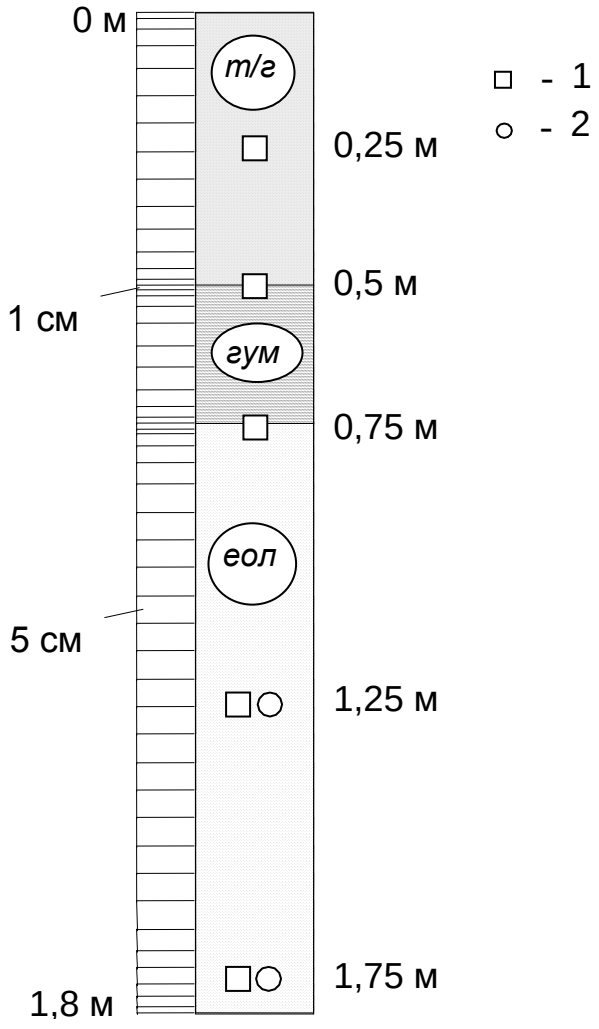


Рис. 5.1. Структура та просторова дискретизація моделі: 1 – глибина, де був встановлений датчик вологості ML2x; 2 – глибина, де був встановлений датчик тиску SWT6; т/г – техногенний шар ґрунту; гум – гумусований шар ґрунту; еол – шар первинного ґрунту (пісок еолового генезису).

5.2.4. Граничні умови

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

$$\left| -K\frac{\partial \psi}{\partial x} - K \right| \le E \text{, за умови: } \psi_A \le \psi \le \psi_S \qquad (5.1)$$

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

Потенційне випаровування розраховане з застосуванням методу Пенмана-Монтейна для поверхні “еталонний рослинний покрив”. Даний метод рекомендовано Організацією продовольчих товарів та сільського господарства об'єднаних націй [Allen et al., 1998]. Реальне випаровування для соснового лісу може складати 80-90% від еталонного. Схематизація передбачала, що 30% опадів витрачалося на перехоплення кронами соснового лісу [Shuttleworth, 1993].

Нижня гранична умова обрана як “вільне стікання”:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \qquad (5.2)$$

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

5.3. Результати моделювання

Для моделювання були обрані три часові інтервали, що включали дощовий епізод і наступну інфільтрацію вологи. Один інтервал (08/07/2001-28/07/2001) був використаний для калібрування, два інші (24/04/2001-12/05/2001; 08/10/2003-22/10/2003) – для перевірки адекватності (валідації) моделі.

5.3.1. Попередня параметризація моделі

Для нижнього шару моделі значення коефіцієнтів α, n, K_S залежностей (1.2), (1.5) визначені за даними режимних спостережень станції “Шурф” із використанням методу „миттєвого профілювання балансу вологи” (див. підрозд. 3.3; табл. 5.2, графіки залежностей для всіх шарів ґрунтового профілю, що моделювався – рис. 5.2).

Таблиця 5.2.

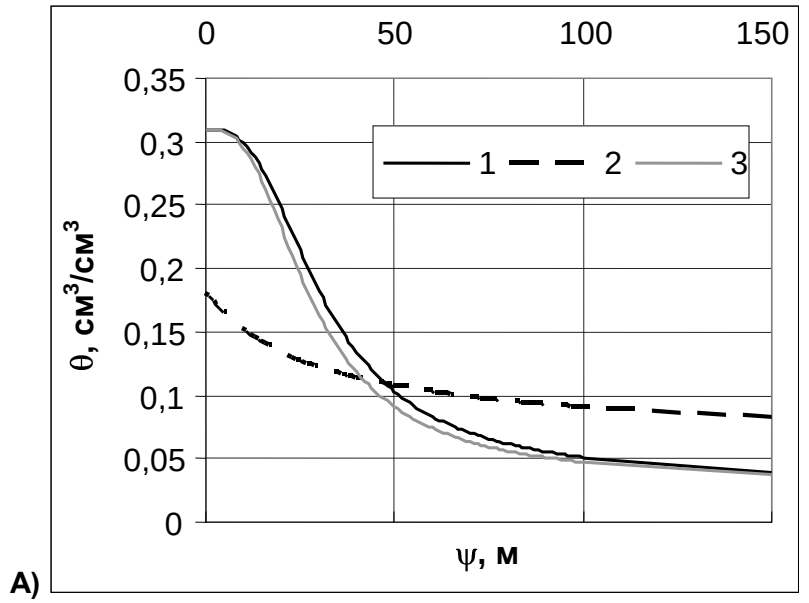
Коефіцієнти рівнянь ван Генухтена та Муалема для різних шарів моделі.

Шар моделі	θr, см^3/см^3	θs, см^3/см^3	Ks, см/добу	α, см$^{-1}$	n	l
0-0,5 м	0,03	0,31	406	0,04	2,9	0,5
0,5-0,75 м	0,03	0,18	164	0,1	1,4	0,5
0,75-1,8 м	0,03	0,31	350	0,04	2,9	0,5

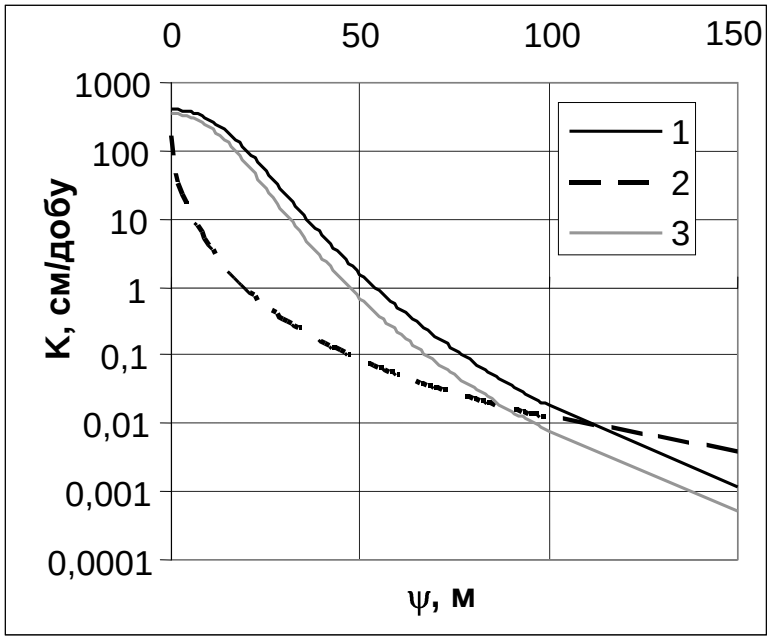
В межах середнього (гумусованого) шару ґрунту в профілі, що моделювався, не було встановлених тензіометрів, щоб використати оригінальні дані тиск-вологість для підбору значень коефіцієнтів α, n залежності ван Генухтена (рівняння 1.5, див. підрозд. 1.1.1) методом найменших квадратів. Через це, коефіцієнти було визначено за натурними даними спостережень за вологістю та всмоктуючим тиском у траншеї із захороненим “Рудим” лісом на глибині 0,75 м (профіль траншейного ґрунту, який теж досліджувався за допомогою станції «Шурф», див. підрозд. 2.4.4.6, рис. 2.17) [Dewiere, 2002]. Ці дані можна було

застосувати для середнього шару, оскільки траншейний ґрунт аналогічний за режимом вологості і літологічними властивостями до ґрунту середнього шару. Значення K_S підбиралися шляхом калібрування чисельної моделі (на основі розв'язання обернених задач).

Для верхнього шару гідрофізичні параметри підбиралися шляхом калібрування моделі. Параметр θ_r був заданий за попередніми лабораторними дослідженнями 0,03 $см^3/см^3$ для всіх шарів. Значення коефіцієнту θ_s було задано 0,31 $см^3/см^3$ для верхнього та нижнього шарів (за лабораторними дослідженнями). Для середнього шару величина θ_s була підібрана при моделюванні.



А)



Б)

Рис. 5.3. Гідрофізичні залежності, для шарів математичної моделі: А) залежність ван Генухтена (2), Б) залежність Муалема (3), 1 – для техногенного ґрунту, 2 – для гумусованого ґрунту, 3 – для первинного еолового ґрунту

5.3.2 Калібрування і валідація моделі

Модель калібрувалася на основі рядів спостережень вмісту вологи в модельованому ґрунтовому профілі для глибин 0,25; 0,5; 0,75; 1,25; 1,75 м. Для визначення якості калібрування моделі використовувалися наступні параметри: середнє квадратичне відхилення модельних значень вологості від виміряних (SSQ), та коефіцієнт кореляції (R^2) між ними.

При розв'язанні зворотних задач, коефіцієнти підбиралися в декілька кроків. Спочатку α, потім K_S, потім n та K_S. Так було зроблено, щоб спростити процедуру автоматичного підбору [Yeh, 1986]. Для K_s було задано діапазон вірогідних значень (50-800 см/добу), на основі попередніх досліджень ґрунтів полігону [Бугай та ін., 2007].

Результати калібрування моделі наведено на рис. 5.3. Для “дощового епізоду”, використаного для калібрування, одержано SSQ=0,05 і R^2=0,96.

Коефіцієнти модельних гідрофізичних функцій $\theta(\psi)$, $K(\psi)$ для різних шарів, отримані в результаті калібрування, наведені в табл. 5.2 (відповідні графіки наведені на рис. 5.2). Коефіцієнти для 2-го шару ґрунту суттєво відрізняються від коефіцієнтів для 1-го та 3-го шарів. Ця відмінність обумовлена літологічними властивостями шарів ґрунту.

Результати валідації моделі за даними спостережень для двох дощових епізодів (24/04/2001-12/05/2001) і (08/10/2003-22/10/2003) представлено на рис. 5.4 і 5.5.

Відкаліброваная модель добре відтворює режим вологості ґрунтового профілю для другого дощового епізоду 2001 року: SSQ=0,12 та R^2=0,9 (рис. 5.4).

Для дощового епізоду 2003 р. точність апроксимації моделлю даних режимних спостережень дещо погіршується – SSQ=0,29 та R^2=0,74 (рис. 5.5). Це може бути пов'язано з посиленням кореневого відбору соснами на полігоні внаслідок їх росту з 2001 р. (вік сосен 14 р.) до 2003 р. (вік сосен 16 р.).

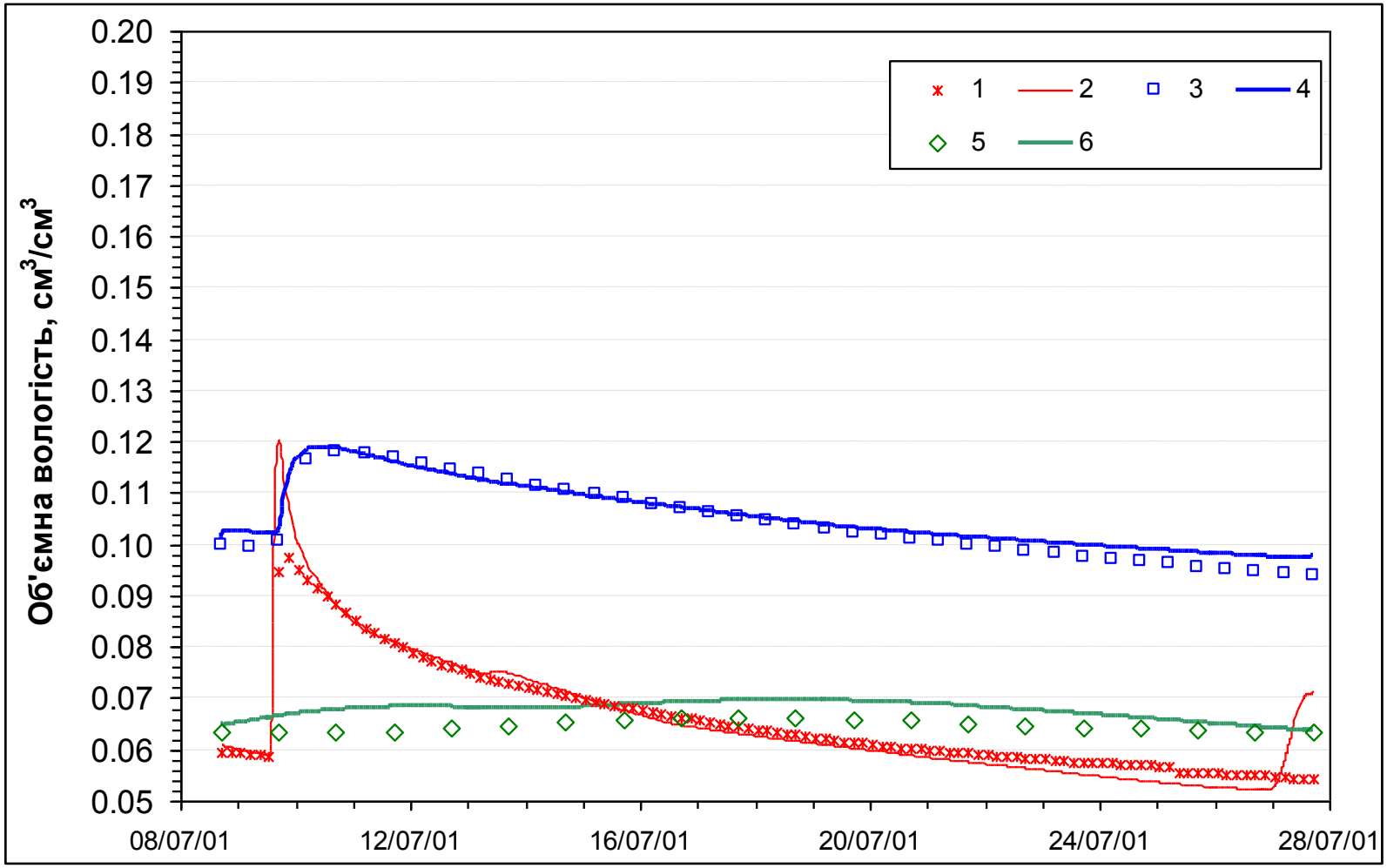


Рис. 5.3. Порівняння режиму природної вологості та розрахованої в результаті моделювання для періоду 08/07/01-27/07/01: 1 – натурні дані, глибина 0,25 м; 2 – “модельні” дані; 3 – натурні дані, глибина 0,5 м; 4 – “модельні” дані; 5 – натурні дані, глибина 1,25 м; 6 – “модельні” дані

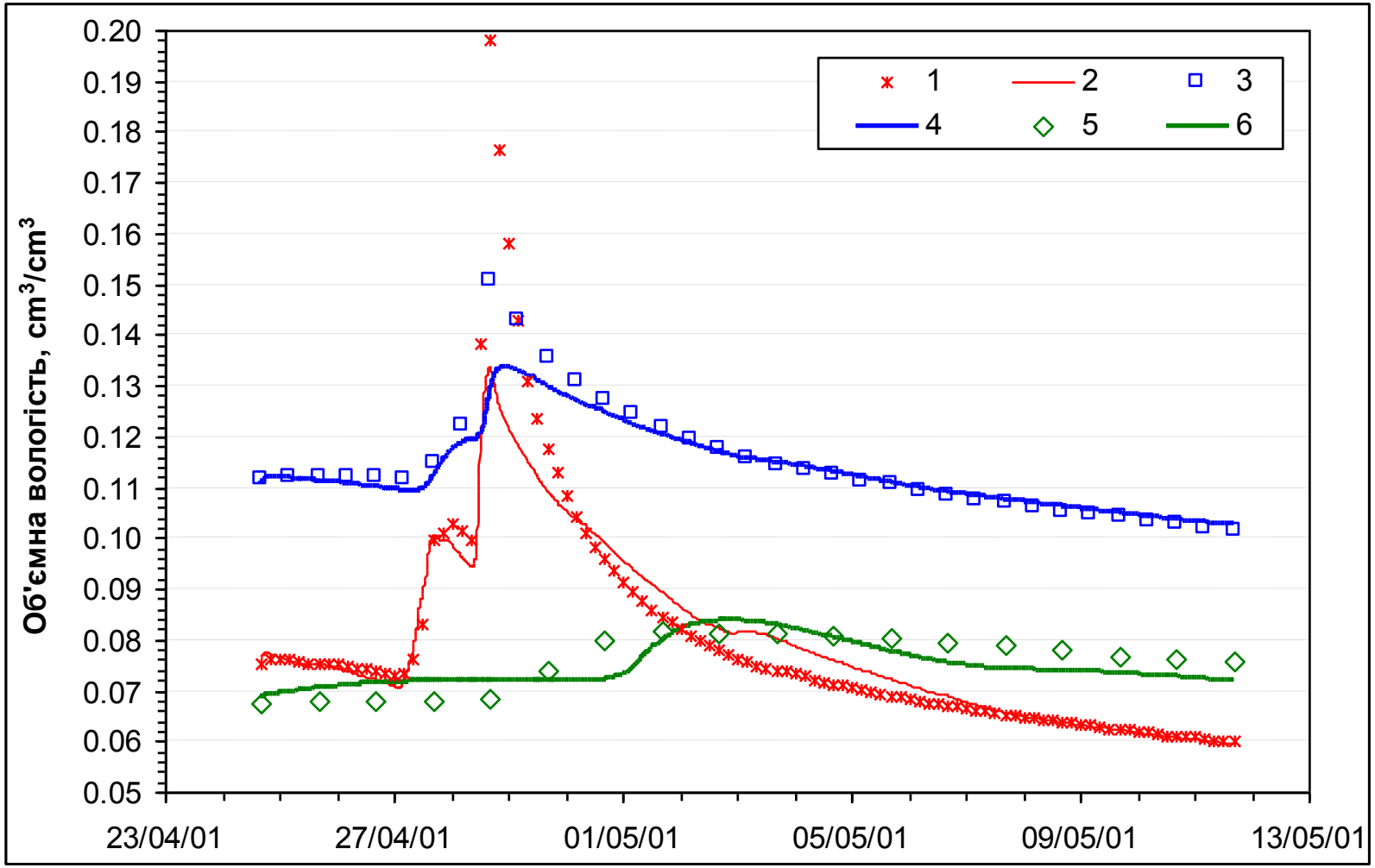


Рис. 5.4. Порівняння режиму природної вологості та розрахованої в результаті моделювання для періоду 24/04/01-11/05/01: 1 – натурні дані, глибина 0,25 м; 2 – “модельні” дані; 3 – натурні дані, глибина 0,5 м; 4 – “модельні” дані; 5 – натурні дані, глибина 1,25 м; 6 – “модельні” дані

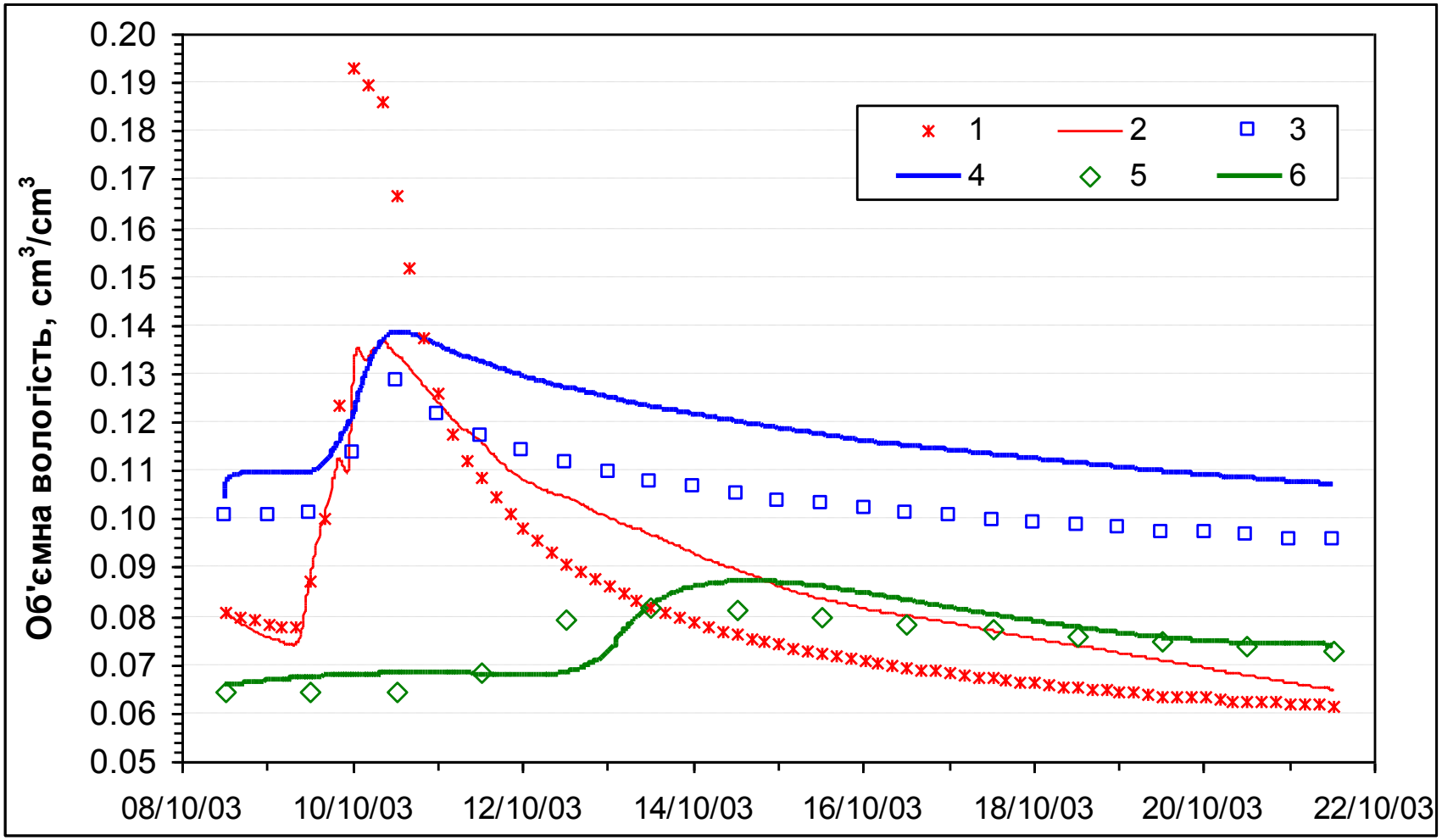


Рис. 5.5. Порівняння режиму природної вологості та розрахованої в результаті моделювання для періоду 08/10/03-21/10/03: 1 – натурні дані, глибина 0,25 м; 2 – “модельні” дані; 3 – натурні дані, глибина 0,5 м; 4 – “модельні” дані; 5 – натурні дані, глибина 1,25 м; 6 – “модельні” дані

5.4. Висновки до розділу

Наведена в розділі методика математичного моделювання загалом показала свою ефективність для прогнозування вологоперенесення в ґрунтових та кліматичних умовах полігону ІГН в ПТЛРВ “Рудий ліс”.

Успішна калібровка і валідація математичної моделі вологоперенесення підтверджує коректність і узгодженість одержаних за допомогою експериментальних методів гідрофізичних параметрів ґрунтів полігону (зокрема, залежності $\theta(\psi)$, $K(\psi)$ для первинних еолових пісків), що були представлені в попередніх розділах дисертації.

Наведена методика моделювання вологоперенесення може бути застосована для прогнозування режиму ґрунтів зони аерації, складеної піщаними відкладами, і прогнозної оцінки інфільтраційного живлення підземних вод.

Одержані параметри вологоперенесення можуть бути використані для розрахунку міграції радіонуклідів в ґрунтах на ділянці “Рудого лісу” та для математичного моделювання гідрогеологічних процесів для інших радіаційно-небезпечних об’єктів, розташованих в ближній зоні ЧАЕС.

Результати дисертаці йних досліджень, представлені в даному розділі, наведено в наступних публікаціях:

1. **Саприкін В.** Моделювання процесів руху вологи в ґрунтах зони аерації ділянки чорнобильського “Рудого лісу”. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Серія: Геологія.* 2012. № 59. С. 44-48.

2. **Саприкін В.Ю.** Одномірна математична модель вологоперенесення в зоні аерації ділянки чорнобильського “Рудого лісу”. *Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища*: матеріали X Міжнародної наукової конференції, 17-20 жовтня 2012 р. Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2012. С. 211-213.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційних досліджень одержано ряд теоретичних результатів. Зокрема запропоновано нові (або вдосконалено існуючі) методи визначення гідрофізичних параметрів ґрунтів і інфільтраційного живлення підземних вод, основані на аналізі детальних рядів моніторингових спостережень, одержаних із застосуванням автоматизованих систем збору і реєстрації даних.

Також одержано ряд практичних результатів з вивчення процесів вологоперенесення і оцінки гідрофізичних параметрів ґрунтів для досліджуваної природно-техногенної екосистеми – пункту локалізації РАВ «Рудий ліс» в ЧЗВ. Одержані параметри є важливими для оцінки безпеки радіаційно-небезпечних об’єктів в ЧЗВ, оскільки вологоперенесення в ґрунтах зони аерації є основним чинником, що обумовлює міграцію радіонуклідів із приповерхневих джерел забруднення в підземні і поверхневі води.

Основні результати дисертації перелічені нижче:

1. Досліджено процеси вологоперенесення в ґрунтовому профілі ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс». Зокрема визначено інтервали глибин із різнонаправленим і однонаправленим (донизу) протягом року вологоперенесенням. Так, за даними спостережень в 2000-2004 рр. ґрунтовий профіль можна поділити що до напрямків вологоперенесення на дві зони. В верхній частині розрізу зони аерації на глибинах до 1,25 м протягом року під впливом метеорологічних чинників може відбуватися різно-направлене вологоперенесення (в вологі періоди – вниз, в сухі періоди – вверх). Інтервал глибин від 1,25 м до РҐВ характеризується стійким направленим вниз вологоперенесенням протягом всього календарного року.
2. На основі даних моніторингу зони аерації та кліматичних параметрів із застосуванням модифікованого методу «миттєвого профілювання балансу вологи в ґрунтовому профілі» оцінено *in situ* коефіцієнт вологоперенесення первинних еолових піщаних ґрунтів полігону. Одержана залежність дозволила розрахувати із застосуванням гідрофізичного методу щодобовий

режим інфільтраційного потоку в зоні аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» в 2001, 2003, 2004 рр. Проаналізовано сезонну динаміку інфільтраційного живлення ґрунтових вод та головні фактори, що на нього впливають. Оцінені величини інфільтраційного потоку змінюються в межах 0,01-8 мм/добу. Показано, що інфільтраційне живлення ґрунтових вод в основному формується за рахунок окремих інфільтраційних подій (сніготанення, великі зливи), а не є рівномірно розподіленим впродовж року. На метеорологічні епізоди, коли добовий інфільтраційний потік складав 1 мм/добу і вище (макс. 8 мм/добу) припадає приблизно 30% від загального періоду спостережень станцією «Шурф», причому за цей час сформувалося приблизно 73% загального інфільтраційного живлення водносного горизонту. Річні оцінки інфільтраційного живлення гідрофізичним методом для ПТЛРВ «Рудий ліс» склали в середньому 310 мм/рік (тобто 49% від опадів).

3. Запропоновано вдосконалений метод оцінки інфільтраційного живлення ґрунтових вод на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод і атмосферних опадів. Також запропоновано методику для оцінки коефіцієнта водовіддачі ґрунтів на основі аналізу з застосуванням лінійної регресії між величинами опадів і відповідними інтегральними (з урахуванням рецесії) підвищеннями РҐВ.
4. Розраховано інфільтраційне живлення ґрунтових вод ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс» за період 2000-2012 рр. (з перехресним підтвердженням оцінок різними методами). Проаналізовано його багаторічну динаміку та головні фактори, що на нього впливають. Побудовано емпіричну регресійну модель для прогнозу інфільтраційного живлення в залежності від річної кількості опадів. Розрахована величина річного інфільтраційного живлення змінюється від 210 мм/рік до 439 мм/рік, (від 37 до 62% від річної кількості опадів в залежності від метеорологічних умов конкретного року). Середня величина річного інфільтраційного живлення протягом 13 років становить 295 мм/рік, або 47% від середньобагаторічної величини опадів (630 мм). За допомогою регресійного аналізу даних за 13 років встановлено, що величина

інфільтраційного живлення становить приблизно 63% від кількості опадів мінус 100 мм.

5. Одержано експериментальні оцінки залежності об’ємної вологості від всмоктуючого тиску для ґрунтів зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс». Коефіцієнти моделі ван Генухтена склали: для глибини 0,75 м – α = 0,142; n = 1,74; для глибини 1,25 м – α = 0,046; n = 2,14; для глибини 1,75 м – α = 0,097, n = 1,84. Для залишкової вологості ґрунту і вологості при повному насиченні використані значення: θ_r = 0,02 см^3/см^3, θ_s = 0,24 см^3/см^3. Визначена залежність коефіцієнту вологоперенесення первинних еолових піщаних ґрунтів від всмоктуючого тиску описується залежністю Гарднера з коефіцієнтами K_s = 3,8 м/добу, a = 0,13 см$^{-1}$. Коефіцієнт водовіддачі ґрунтів зони аерації та водоносного горизонту склав μ=0,11.
6. Побудована, відкаліброваna, і валідована математична модель вологоперенесення в ґрунтах зони аерації природно-техногенної системи ділянки локалізації РАВ «Рудий ліс», що дозволило підтвердити і уточнити величини гідрофізичних параметрів ґрунтів. Таким чином також створено інструмент моделювання і параметричну базу для геоміграціних прогнозів.

Список використаних джерел

1. Allen R.G., Pereira L..S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements // FAO Irrigation and Drainage Paper. – No. 56. – Rome, 1998.
2. Bear J. Hydraulics of Groudwater. McGraw-Hill, Inc., New York, 1979.
3. Bixio, A.C., Gambolati, G., Paniconi, C., Putti, M., Shestopalov, V.M., Bublias, V.N., Bohuslavsky, A.S., Kasteltseva, N.B., Rudenko, Y.F. (2002). *Modeling groundwater-surface water interactions including effects of morphogenetic depressions in the Chernobyl exclusion zone. Environmental Geology, 42(2-3), 162–177*. doi:10.1007/s00254-001-0486-7
4. Brooks, R. H. and Corey, C. T. 1964. Hydraulic Properties of PorousMedia. Hydrol. Paper 3. Colorado State University, Fort Collins.
5. Brutsaert,W. 1966. Probability laws for pore-size distributions. Soil Sci., 101: 85–92.
6. Bugai D., Skalskyy A., Dzhepo S., Kubko Yu., Kashparov V., Van Meir N., Stammose D., Simonucci C., Martin-Garin A. Radionuclide migration at experimental polygon at Red Forest waste site in Chernobyl zone. Pt. 2: Hydrogeological characterization and groundwater transport modeling. Applied Geochemistry. 2012 a. Vol. 27, iss. 7. P. 1359–1374. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.09.028
7. Bugai D., Tkachenko E., Van Meir N., Simonucci C., Martin-Garin A., Roux C., Le Gal La Salle C., Kubko Yu. Geochemical influence of waste trench no. 22T at Chernobyl Pilot Site at the aquifer: Long-term trends, governing processes, and implications for radionuclide migration. Applied Geochemistry. *(Special Issue: Chernobyl)* 2012 b. Vol. 27, iss. 7. P. 1320–1338. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.09.021
8. Bugai D.A., Dzhepo S.P., Skalskyy A.S., Van Meir N., Gaudet J.P. Estimation of hydraulic properties of unsaturated sandy soils using laboratory and field methods // Геологічний журнал. – 2008. – № 4. – с. 99-105.

9. Bugai D.A., Skalskiy A.S., Dzhepo S.P. Water protection measures for radioactive groundwater contamination in the Chernobyl exclusion zone. In: Chernobyl – what have learned? The successes and failures to mitigate water contamination over 20 years. Netherlands: Springer Publishers, 2007. P. 203-245. DOI: 10.1007/1-4020-5349-5_7
10. Bugai D.A., Smith L., Beckie R. Risk-Cost Analysis of Strontium-90 Migration to Water Wells at Chernobyl Nuclear Power Plant. Environmental & Engineering Geoscience. 1996. Vol. II, No. 2. P. 151-164. DOI: 10.2113/gseegeosci.II.2.151
11. Bugai D.A., Waters R.D., Dzhepo S.P., Skal'skij A.S. Risks from Radionuclide Migration to Groundwater in the Chernobyl 30-km Zone. Health Physics. 1996. Vol. 71, Num. 1. P. 9-18. DOI: 10.1097/00004032-199607000-00002
12. *Bugai D.A., Gudzenko V.V., Dzhepo S.P., Skal'skij A.S.* Hydrogeology of the Shelter and Risk of Contamination of the Underground Water. *Documents 'Sarcophagus Safety' 94'. The state of the Chernobyl Nuclear Power Plant Unit #4. (Proc. of an Int. Symp. Zeleny Mys, Chernobyl, Ukraine, 14 -18 March, 1994)*. NEA-OECD, 1995, pp. 358-370.
13. Bugai, D., Dewiere, L. Geology structure and hydrogeology conditions of the Chernobyl Pilot Site. Institute for Radioprotection and Nuclear Safety, Rapport IRSN/DEI/SARG no.04-16, 2004, 150 p.
14. Carrera-Hernández J.J., Smerdon B.D., Mendoza C.A. Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization // Journal of Hydrology. – 2012. – Vol. 452-453. – P. 90-101.
15. Cassiani G., Binley A., Ferré T.P.A. Unsaturated zone processes. 2006. in *Applied Hydrogeophysics. NATO Science Series.* Vereecken, H., Binley, A., Cassiani, G., Revil, A., Titov, K. (Eds.). Springer Netherlands. 371 p.
16. Dane, J.H., Hopmans, J.W.,"Water retention and storage", Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods, 3rd edn,(DANE J.H., TOPP, G.C., Eds), SSSA, Madison, WI (2002) Ch. 3.3, p. 671-720.

17. Dawes, W. R., L. Zhang, T. J. Hatton, P. H. Reece, G. T. H. Beale, and I. Packer, Application of a distributed parameter ecohydrological model (TOPOG_IRM) to a small cropping rotation catchment, J. Hydrol., 191, 67– 89, 1997.
18. Delottier, H., Pryet, A., Lemieux, J.M., Dupuy, A. May 2018. Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the water-table fluctuation method. Hydrogeology Journal.
19. Delta-T Devices. DL2e Data Logger. 64 Channel Research-Grade Logger with support for a comprehensive range of sensors. Quick Start Guide Version 1.1. Delta-T Devices Ltd. 1996.
20. Delta-T Devices. Equitensiometer Soil Matric Potential Sensor Type EQ2. User Manual. EQ2-UM-1.2. Delta-T Devices Ltd. 1999.
21. Delta-T Devices. Tensiometer Type SWT6 including Service Kit type SKT6. SWT6-UM-1. Delta-T Devices Ltd. 1999.
22. Delta-T Devices. ThetaProbe Soil Moisture Sensor Type ML2x. User Manual. ML2x-UM-1.21. Delta-T Devices Ltd. 1999.
23. Dewiere L. Validating a Pilot Plan in the Chernobyl Exclusion. Area by Means of Experiments // Report 2000-2001. IRSN/Departement de PRotection de l`Environnement. Rapport DPRE / SERGD / 02-36. Septembre 2002. 46 p.
24. Dzhepo S.P., Skals’skii A.S. Radioactive contamination of groundwater within the Chernobyl exclusion zone. In: Chernobyl disaster and groundwater. Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2002. P. 25-69.
25. Eching S.O., Hopmans J.W. Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1993. – Vol. 57. – P. 1167-1175.
26. Faybishenko B., Nicholson T., Shestopalov V., Bohuslavsky A., Bublias V. *Groundwater Vulnerability: Chernobyl Nuclear Disaster*, Monograph Number 69. 2015 American Geophysical Union. Published 2015 by John Wiley & Sons, Inc. 128 p.

27. Fayer, M. J., M. L. Rockhold, and M. D. Campbell, Hydrologic modeling of protective barriers: Comparison of field data and simulation results, Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 690– 700, 1992.
28. Flerchinger, G. N., C. L. Hanson, and J. R. Wight, Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed, Water Resour. Res., 32, 2539–2548, 1996.
29. Flint, A. E., L. E. Flint, J. A. Hevesi, F. D'Agnese, and C. Faunt, Estimation of regional recharge and travel time through the unsaturated zone in arid climates, in Dynamics of Fluids in Fractured Rock, Geophys. Monogr. Ser., vol. 122, edited by B. Faybishenko, P. A. Witherspoon, and S. M. Benson, pp. 115–128, AGU, Washington, D. C., 2000.
30. Fredlund D.G., Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2000. – 517 p.
31. Freeze RA, Cherry JA (1979) Groundwater. Prentice-Hall, Englewood. Cliffs, NJ, 604 pp
32. Gardner,W.R., 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. Soil Sci. 85: 228–232.
33. Gee G.W., Hillel D. Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods // *Hydrological processes*, – 1988, – vol. 2. – p. 255–256.
34. Harter, T. and J.W. Hopmans. Role of vadose zone flow processes in regional scale hydrology: review, opportunities and challenges. IN: Unsaturated zone modeling: Progress, Challenges and Applications. Eds. R.A. Feddes, G.H. De Rooij, and J.C. van Dam. Kluwer Academic Publs. Dordrect. 2004. Pages. 179-210.
35. Hatton, T. The basics of recharge and discharge, part 4, Catchment scale recharge modeling, 19 pp., Commonwealth Sci. Indust. Res. Organ., Collingwood, Victoria, Australia, 1998.

36. Haverkamp, R. and Vauclin, M. 1979. A note on estimating finite difference interblock hydraulic conductivity values for transient unsaturated flow problems. Water Resour. Res., 15: 181–187.

37. Haverkamp, R. et al. Soil Properties and Moisture Movement in the Unsaturated Zone. Haverkamp, R., Debionne, S., Viallet, P., Angulo-Jaramillo, R., de Condappa, D. *in* The handbook of groundwater engineering, editor-in chief, Jacques W. Delleur. Boca Raton, CRC Press 2007.

38. *Healy R.W., Cook P.G.* Using groundwater levels to estimate recharge // Hydrogeology Journal. – 2002. – № 10. – P. 91-109.

39. HOPMANS, J.W., ŠIMŮNEK, J., ROMANO, N., DURNER, W., "Inverse modeling of transient water flow", Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods (DANE, J.H., TOPP G.C., Eds), 3rd edn, SSSA, Madison, WI (2002) Ch. 3.6.2.

40. Hopmans, J.W., van Genuchten, M.T. (2005). VADOSE ZONE | Hydrologic Processes. Encyclopedia of Soils in the Environment, 209–216. doi:10.1016/b0-12-348530-4/00434-3

41. Johansson P.O. Estimation of groundwater recharge in sandy till with two different methods using groundwater level fluctuations // J. Hydrol. – 1987. – Vol. 90. – P. 183-198.

42. Kearns, A. K. and J. M. H. Hendrickx, Temporal variability of diffuse groundwater recharge in New Mexico, Tech. Completion Rep. 309, 43 pp., N. M. Water Resour. Res. Inst., Las Cruces, 1998.

43. Keese K.E., Scanlon B.R., Reedy R.C. Assessing controls on diffuse groundwater recharge using unsaturated flow modeling // Water Resour. Res. – 2005. – Vol. 41. – P. 1-12.

44. Khire, M. V., C. H. Benson, and P. J. Bosscher, Water balance modeling of earthen final covers, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 123, 744– 754, 1997.

45. Kim, C. P., J. N. M. Stricker, and P. J. J. F. Torfs, An analytical framework for the water budget of the unsaturated zone, Water Resour. Res., 32, 3475– 3484, 1996.

46. Kool J.B., Parker J.C., Van Genuchten M.Th. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models – a review // J. Hydrol. – 1987. – Vol. 91. – P. 255-293.

47. 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.

48. Lewis, M. F., and G. R. Walker, Assessing the potential for episodic recharge in south-western Australia using rainfall data, Hydrogeol. J., 10, 229– 237, 2002.

49. Matoshko A., Bugai D., Dewiere L., Skalskyy A. Sedimentological study of the Chernobyl NPP site to schematize radionuclide migration conditions // *Environmental Geology.* – 2004. – vol. 46. iss. 6-7. – p. 820-830. DOI: 10.1007/s00254-004-1067-3

50. *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.

51. Milly, P. C. D., A minimalist probabilistic description of root zone soil water, Water Resour. Res., 37, 457– 463, 2001.

52. Milly, P. C. D., Climate, soil water storage, and the average annual water balance, Water Resour. Res., 30, 2143– 2156, 1994.

53. Milly, P.C.D., and K.A. Dunne, Sensitivity of the global water cycle to the water-holding capacity of land, J. Clim., 7, 506– 526, 1994.

54. *Monteith, J. L.* Evaporation and temperature// Q.J. Royal Meteo. Soc. 1981, Vol. 107. P.1-27.

55. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res. – 1976. – Vol. 12. – P. 513-522.

56. NNC Ltd (2001): Review and Analysis of Solid Long-lived and High Level Radioactive Waste arising at the Chernobyl Nuclear Power Plant and the Restricted Zone, DG Environment Project No B7-5350/99/51983/MAR/C2, 293 p.

57. 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.

58. Pierce, L. L., J. Walker, T. I. Dowling, T. McVicar, T. J. Hatton, S. W. Running, and J. C. Coughlan, Hydroecological changes in the Murray-Darling Basin, part 3, A simulation of regional hydrological changes, J. Applied Ecol., 30, 283– 294, 1993.
59. Qurtas, S.Sh. 2018. Using groundwater levels and Specific Yield to Estimate the Recharge, South of Erbil, Kurdistan Region, Iraq. Academic Journal of Nawroz University, [S.l.], v. 7, n. 4. pp. 191-196. ISSN 2520-789X.
60. 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.
61. Rockhold, M.L., Fayer, M.J., Kincaid, C.T., Gee, G.W. 1995. Estimation of natural ground water recharge for the performance assessment of a low-level waste disposal facility at the Hanford site. Report PNL-10508. Battelle Pacific Northwest Laboratory.
62. Rodriguez-Iturbe, I., A. Porporato, F. Laio, and R. Rodolfi, Plants in watercontrolled ecosystems: Active role in hydrological processes and response to water stress, 1, Scope and general outline, Adv. Water Resour., 24, 695– 706, 2001.
63. Scanlon, B. R., Milly P. C. D., Water and heat fluxes in desert soils, 2, Numerical simulations, Water Resour. Res., 30, 721– 733, 1994.
64. Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge // Hydrogeol. J. – Vol. 10. – 2002(a). – P. 18–39.
65. Scanlon B.R., Christman M., Reedy R.C., Porro I., Simunek J., Flerchinger G.N. Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions // Water Resour. Res. – 2002 (b). – Vol. 38, №12. p. 1323–1339. doi:10.1029/2001WR001233

66. Schaap, M. G., and F. J. Leij, Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions, Soil Sci., 163, 765–779 pp., 1998.
67. Schaap, M. G., F. J. Leij, and M. T. van Genuchten, Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties, Soil Sci. Soc. Am. J., 62, 847–855 pp., 1998.
68. Schroeder, P. R., C. M. Lloyd, P. A. Zappi, and N. M. Aziz, The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, user's guide for version 3, EPA/600/168a, U.S. Environ. Prot. Agency Risk Reduction Eng. Lab., Cincinnati, Ohio, 1994.
69. Selker, John S. Vadose zone processes / John. S. Selker, C. Kent Keller, James T. McCord. 1999 by CRC Press LLC.
70. Shuttleworth W. J. Chapter 4. Evaporation // Handbook of Hydrology / aft. red. Maidment D. R. – New York, 1993. – P. 4.1-4.53.
71. Simmons, C. S., and P. D. Meyer, A simplified model for the transient water budget of a shallow unsaturated zone, Water Resour. Res., 36, 2835–2844, 2000.
72. Šimůnek J., Šejna M., van Genuchten M. T. HYDRUS-1D, version 4.14, code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated porous media // Tech. rep. – University of California, Riverside, 2005.
73. Simunek, J. 2015. Estimating Groundwater Recharge Using HYDRUS-1D. *Engineering Geology and Hydrogeology*. 29: 25-36.
74. ŠIMŮNEK, J., HOPMANS J.W., "Parameter optimization and nonlinear fitting", Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods (DANE, J.H., TOPP, G.C., Eds.), 3rd edition, SSSA, Madison, WI (2002) Ch. 1.7, 139-157.
75. ŠIMŮNEK, J., JACQUES, D., HOPMANS, J.W., INOUE, M., FLURY, M., VAN GENUCHTEN, M.T., "Solute transport during variably-saturated flow - inverse methods", Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods (DANE, J.H., TOPP, G.C., Eds.), 3rd edition, SSSA, Madison, WI (2002) Ch. 6.6, 1435-1449.

76. ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.T., ŠEJNA, M., Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages, Vadose Zone J. **15** 7 (2016) 25.

77. Stauffer F., Kinzelbach W. Cyclic hysteretic flow in porous medium column: model, experiment, and simulations. Journal of Hydrology. – 2001. – Vol. 240. – P. 264–275.

78. 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.

79. Stothoff S.A. Sensitivity of long-term bare soil infiltration simulations to hydraulic properties in an arid environment // Water Resour Res. – 1997. – Vol. 33. – P. 547–558.

80. Thiry, Y., Colle, C., Yoschenko, V., Levchuk, S., Van Hees, M., Hurtevent, P., & Kashparov, V. (2009). Impact of Scots pine (Pinus sylvestris L.) plantings on long term 137Cs and 90Sr recycling from a waste burial site in the Chernobyl Red Forest. Journal of Environmental Radioactivity, 100(12), 1062–1068. doi:10.1016/j.jenvrad.2009.05.003

81. Tindall J.A., Kunkel J.R., Anderson D.E. 1999. Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 624 p.

82. UKRAINE NATIONAL REPORT. On Compliance with Obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 2011, Kyiv. 111 p.

83. van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am J. – 1980. – Vol. 44. no. 5. – P. 892-898.

84. *Voitsekhovitch O., Sansone U., Zhelesnyak M., Bugai D.* Water Quality Management of Contaminated areas and its Effects on Doses from Aquatic Pathways// *The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. (Proceedings of the First International Conference, Minsk, Belarus, 18 to 22 March 1996.)* EUR 16544 EN, Luxembourg, 1996. - P. 401-410.

85. *Vovk I.F., Yakovlev Ye.A., Dzepo S.P., Gudzenko V.V., Skalsky A.S., Bugay D.A.* Geological and Hydrogeological Features of the Ch.AES 30-kilometer Zone and Possibilities for Deep and Shellow Burial of Radioactive Wastes. *rcophagus Safety' 94'. The state of the Chernobyl Nuclear Power Plant Unit #4.* (*Proc. of an Int. Symp. Zeleny Mys, Chernobyl, Ukraine, 14 -18 March, 1994)*. NEA-OECD, 1995, pp. 341-358.

86. Watson K. K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials// Water Resour. Res. 1966. – Vol. 2. – P. 709-715.

87. 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.

88. Wood, W. W., Sanford, W. E. (1995). Chemical and Isotopic Methods for Quantifying Ground-Water Recharge in a Regional, Semiarid Environment. Ground Water, 33(3), 458–468. doi:10.1111/j.1745-6584.1995.tb00302.x

89. Yeh W.W.-G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem // Water Resour. Res. – 1986. – Vol. 22, №2. – P. 95–108.

90. Алексеевский В.Е., Вивикленко Н.К., Иванушкина Н.И. и др. Водный режим и охрана осушаемых территорий. – Киев: Урожай, 1989. – 224 с.

91. Бабинец А.Е., Боревский Б.В., Шестопалов В.М. и др. Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины. – Киев: Наук.думка, 1979. 117 с.

92. Белявский Г.А. Природные ресурсы пресных подземных вод Украинского Полесья. - Киев: Наук. думка, 1971. – 127 с.

93. Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод: методическое руководство. Москва: Госгеолтехиздат, 1963. 203 с.

94. Бублясь В.Н., Шестопалов В.М. Аномальные зоны и их роль в перераспределении радионуклидов из поверхности почв в подземные воды

// *Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч. 1. Распространение чернобыльских радионуклидов в гидрогеологических структурах.* (за ред.) В.М. Шестопалов. — Киев, 2001. — С. 251–356.

95. Бублясь В.Н., Шестопалов В.М. Западинний мікрорельєф та його роль у перерозподілі радіонуклідів. у Закономірності міграції техногенних радіонуклідів на меліоративних системах Чорнобильської зони відчуження за результатами досліджень 1986-2004 рр. Шевченко О.Л., Козицький О.М., Насєдкін І.Ю., Рябцева Г.П., Бублясь В.М., Іванушкіна Н.І., Осадча Н.М., Сізоненко В.П., Шестопалов В.М, Перехейда В.В. 2011, Херсон: Олді-плюс, 160-183 сс.

96. Бугай Д.А. , Джепо С.П. , Скальский А.С. Прогнозы геомиграции, оценки риска и принципы водоохранной деятельности в связи с радиоактивным загрязнением подземных вод в Чернобыльской зоне отчуждения// Радиогеоэкология водных объектов зоны влияния на Чернобыльской АЭС. Том 2. Прогнозы загрязнения вод, оценки рисков водопользования и эффективности водоохранных контрмер для водных экосистем зоны влияния Чернобыльской аварии (под ред. О.В. Войцеховича). МЧС, Киев, 1998. - С. 169-217.

97. Бугай Д.А., Гиллу Ф., Девиер Л., и др. Изучение миграции радионуклидов в геологической среде на экспериментальном полигоне «Пилотный участок» в районе приповерхностного захоронения радиоактивных отходов в ближней зоне ЧАЭС // Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч.1. Распространение чернобыльских радионуклидов в гидрогеологических структурах (под ред. В.М. Шестопалова). Киев, ИГН НАН Украины, 2001. С.357-393.

98. *Бугай Д.А., Фурре Э., Жан-Баптист П., Дапоньи А., Бомьер Д., Ле Галь Ла Саль К., Ланселот Ж., Скальский А.С., Ван Меер 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.

99. *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.

100. Варава К.Н., Вовк И.Ф., Негода Г.Н. Подземные воды четвертичных отложений платформенной части Украины. – Киев: Наук.думка, 1973. – 141 с.

101. Варава К.Н., Негода Г.Н. Подземные воды палеогеновых и меловых отложений Днепровско-Донецкой впадины. – Киев: Наук.думка, 1968. – 117 с.

102. Веклич М.Ф. Детальні стратиграфічні схеми та легенда для крупномасштабних геологічних карт антропогену України.//Вісник АН УРСР №2, 1972. – с. 33-43.

103. Веклич М.Ф. Четвертинні відклади правобережжя Середнього Дніпра. Київ: Вид-во АН України, 1958. –200 с.

104. ВНИИ-геолнеруд. Изучение геохимических особенностей миграции радионуклидов из ПВЛРО зоны Чернобыльской АЭС. Промежуточный отчет ВНИИ-геолнеруд. – Казань, 1991.

105. ВНИПИпромтехнология. Изучение мест захоранения РАО, разработка технологий и мероприятий по их долговременной локализации или перезахоронению, осуществление радиационного и гидрогеологического мониторинга в районах захоронений и в сопредельных территориях (исп. Кедровский О.Л., Мясников К.В., Либов Е.Я.). Отчет ВНИПИпромтехнология по контракту 720-Н., Том.1. Радиационные исследования. Архив № А-01/12-91. ЧНИПС. Москва-Чернобыль 1991 г.

106. ВНИПИпромтехнология. Изучение мест захоранения РАО, разработка технологий и мероприятий по их долговременной локализации или

перезахоронению, осуществление радиационного и гидрогеологического мониторинга в районах захоронений и в сопредельных территориях (исп. Ильичев В.А, Ахунов, В.Д.) Отчет ВНИПИпромтехнология по контракту720-Н. Архив № А-01/10-92. ЧНИПС. Москва-Чернобыль 1992 г.

107. ВНИПИпромтехнология. Исследование геологической обстановки в р-не "Рыжий лес" - водозаборы, Разработка технических мероприятий по контролю за подземными водами и ограничению переноса радионуклидов в речную сеть. ВНИПИпромтехнология, 1991-92 гг. г. Москва.

108. ВСЄГІНГЕО. Принципы размещения сети гидрогеологических наблюдательных пунктов в естественных и нарушенных услових /Методические рекомендации /Мінгео СРСР; ін-т ВСЄГІНГЕО. Москва, “Недра”, 1974.

109. ГГИ. Гидрогелогический и радиационный режим поверхностных и грунтовых вод 30-км зоны ЧАЭС. Отчет ГГИ.-Л.,1992. -157с.

110. Гожик П.Ф., Лаврушин Ю.А., Чугунный Ю.Г. Чернобыльско-Чистогаловский комплекс краевых ледниковых образований. Киев: Наукова Думка, 1976. 30 с.

111. Горецкий Г.И. Аллювиальная летопись Великого Пра-Днепра.- Москва: Наука, 1970. – 492 с.

112. Джепо С.П. *Закономерности влагопереноса на опытных участках Украинского Полесья*. Автореф. дис. …на соиск. учен. степ. канд. геол. - минерал. наук: (04.00.06). – К.: Ин-т геол. наук, 1988. – 15 с.

113. Джепо С.П., Скальский А.С., Бугай Д.А. Проблемы мониторинга подземных вод в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Геол. журн. 1996. № 1-2 (281). С. 107-112.

114. Джепо С.П., Скальский А.С., Бугай Д.А., Гудзенко В.В., Могильный С.А., Проскура Н.И. Полигонные исследования миграции радионуклидов на участке пункта временной локализации радиоактивных отходов "Рыжий лес"// Проблеми Чорнобильської зони відчуження. - 1995. - Вип. 2. С.77-84. Київ: Наукова думка.

115. Джепо С.П., Скальский А.С., Бугай Д.А., Марчук В.В., Ватерс Р. Воздействие на гидрогеологическую среду основных захоронений радиоактивных отходов в ближней зоне Чернобыльской АЭС// Геологический журнал. - 1994. - №4/6. - С.100-108.

116. Джепо С.П., Бугай Д.А., Гудзенко В.В., Скальский А.С., Варзацкий О.А. К вопросу о методике радиологического опробования подземных вод в зоне отчуждения ЧАЭС // Проблеми Чорнобильської зони відчуження . – 1994. - №1, 87-92 сс.

117. Дзекунов Н.Е., Жернов И.Е., Файбишенко Б.А. *Термодинамические методы изучения водного режима зоны аэрации*. – М.: Недра, 1987. – 176 с.

118. Звіт про НДР. Оцінка в ближній зоні ЧАЕС підземного виносу радіонуклідів ґрунтовими водами в р. Прип'ять. Скальський О.С., Бугай Д.О., Джепо С.П., Матошко А.В. Дог.14/68-Н-99 з МНС України, проміжний, етапи 1 та 2 договору, ІГН НАНУ. - Київ, 1999.

119. Кац Д.М., Пашковский И.С. Мелиоративная гидрогеология. – М.: Агропромиздат, 1988. – 256 с. – (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).

120. Кашпаров В.О., Йощенко В.І., Левчук С.Є. та ін. Дослідження міграції радіонуклідів на експериментальній ділянці-полігоні в ПТЛРВ “Рудий ліс”. Ч. 1: Характеристика РАВ і процесів трансформації паливних часток в похованні // Чорнобил. наук. вісн. — 2007. — №2 (30). — С. 3 - 15.

121. Козлов М.Ф. Гидрогеология Припятского Полесья. Т 1. – Минск: Наука и техника, 1976. 150 с.

122. Козлов М.Ф. Гидрогеология Припятского Полесья. Т 2. – Минск: Наука и техника, 1976. 274 с.

123. Козлов М.Ф. Карты по территории Припятского Полесья. Институт геохимии и геофизики, 1973.

124. Либов Е.Я., Ильичев В.А. Справка о состоянии ПВЛРО – ЧНИПС ВНИПИпромтехнология., исх.01-152 от 24.12.1991.

125. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод. – М.: Недра, 1986. – 208 с.

126. Матошко А.В. Типізація та районування осадового чохла Чорнобильської зони відчуження для гідрогеологічного моніторингу. Проблеми Чорнобильської зони відчуження, вип. 4. – Київ: Наукова думка, 1996.- С.95 - 108.

127. НИИПИпромтехнология. Анализ геолого-гидрогеологических мероприятий 30-км зоны и сопредельных территорий. Отчет НИИПИпромтехнология.-М.,1990.

128. Парамонова Н.К., Запольский И.Н., Гаврилюк Р.Б. Расчет интенсивности инфильтрационного питания и емкостных свойств грунтов по данным измерения уровня грунтовых вод с использованием зависимости van Genuchten. Геол. журн. № 2. 2011. 90-96 сс.

129. Пашковский И.С. Закономерности процессов насыщения и осушения водоносных горизонтов. – М., 1983. – 57 с. (Гидрогеол. и инж.геология: Обзор / ВНИИ экон.минер.сырья и геол.-развед.работ. ВИЭМС).

130. Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина. Определение удельной активности и радионуклидного состава проб грунта и грунтовых вод на участке К-1 ПВЛРО "Рыжий лес". Аннотационный отчет НПО Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина.- Л., 1991.

131. Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина. Радиохимические исследования характера радионуклидного загрязнения почвы (грунта) в зонах ПВЛРО ЧАЭС и разработка технических решений по локализации и ограничению миграции радионуклидов. Отчет НПО Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина. – Л., 1992. – 86с.

132. Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина. Радиохимические исследования характера радионуклидного загрязнения почвы (грунта) в зоне ПВЛРО ЧАЭС". Отчет НПО Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина. – Л.,1991.

133. Ситников А.Б. Водная равновесная и неравновесная миграция веществ (радионуклидов) в почвогрунтах. – К.: Фитоцентр, 2003. – 168 с.

134. Ситников А.Б. Вопросы миграции веществ в грунтах / Ситников А.Б. – К.: ИГН НАН Украины, 2010. – 626 с. Sitnikov,A.B. (2010), Voprosy migratsyi veshchestvv gruntakh [On the Issue of Migration of Matters in Soils], IGN NAN of Ukraine, Kiev, Ukraine.

135. Ситников А.Б. *Динамика влаги и солей в почвогрунтах зоны аэрации*. – К.: Наукова Думка, 1986. – 152 с.

136. Ситников А.Б. *Динамика воды в ненасыщенных и насыщенных грунтах зоны аэрации.* – К.: Наукова Думка, 1978. – 156 с.

137. Ситников А.Б., Головченко Ю.Г., Ткаченко К.Д. Гидрогеологическая станция „Феофания”: многолетние исследования и результаты. Киев „Наукова думка”, 2003 г. – 200 с.

138. Ситников А.Б., Рыбин В.Ф., Соболевский Э.Э. Принципы картирования инфильтрационного питания грунтовых вод Украины на основе гидрохимического метода // Геол. журн. АН УССР. – 1988. – № 3. – С. 65-70.

139. *Скальский А.С., Кубко Ю.И.* Фильтрационные модели района ЧАЭС. *Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Т. 2. Моделирование водообмена и миграции радионуклидов в гидрогеологических структурах* / За ред. В. М. Шестопалова. Киев, 2001. С. 462-494.

140. 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.

141. Шевченко О.Л. та ін. Закономірності міграції техногенних радіонуклідів на меліоративних системах Чорнобильської зони відчуження за результатами досліджень 1986-2004 рр.: монографія / О. Л. Шевченко, О. М. Козицький, І. Ю. Насєдкін, Г. П. Рябцева, В. М. Бублясь, Н. І. Іванушкіна, Н. М. Осадча, В. В. Перехейда, В. П. Сизоненко, В. М. Шестопалов; ред.: В. А.

Сташук; УААН, Ін-т гідротехніки і меліорації, НАН України, Наук.-інж. центр радіогідрогеоекол. полігон. дослідж. – К.: Олді-плюс, 2011. – 416 с.

142. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика: Учебник. 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.

143. Шестопалов В.М., Шевченко О.Л., Бугай Д.О., Кірєєв С.І., Насвіт О.І., Проскура М.І. Перспективи водоохоронної діяльності в Чорнобильській зоні відчуження. Бюл. екол. стану зони відчуження та зони безумовного (обов’язкового) відселення. 2006. № 1 (27). С. 62-73.

Додаток А

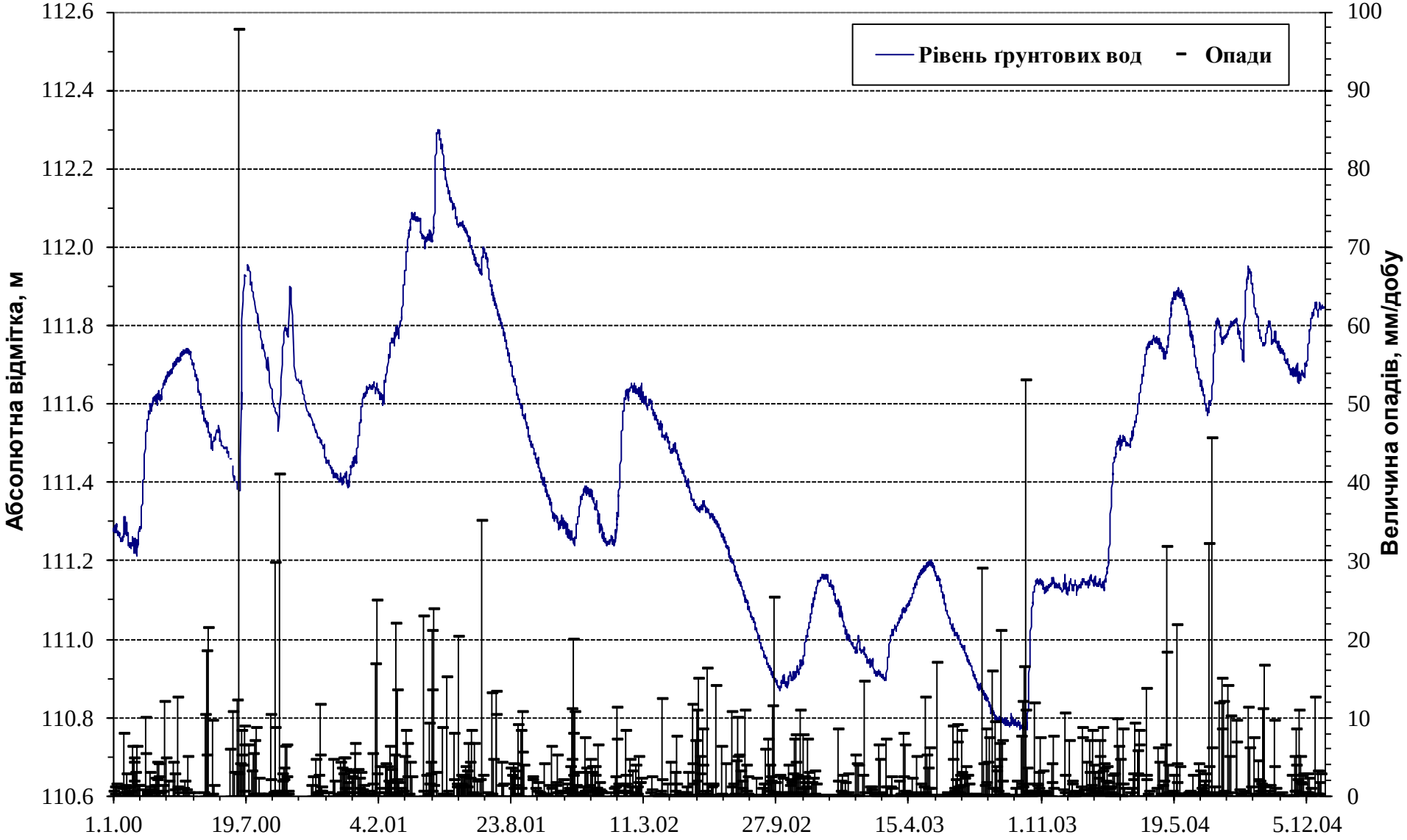


Рис. А.1. Режим рівнів ґрунтових вод ПТЛРВ «Рудий ліс» в 2000-2004 рр.

Продовж. дод. А

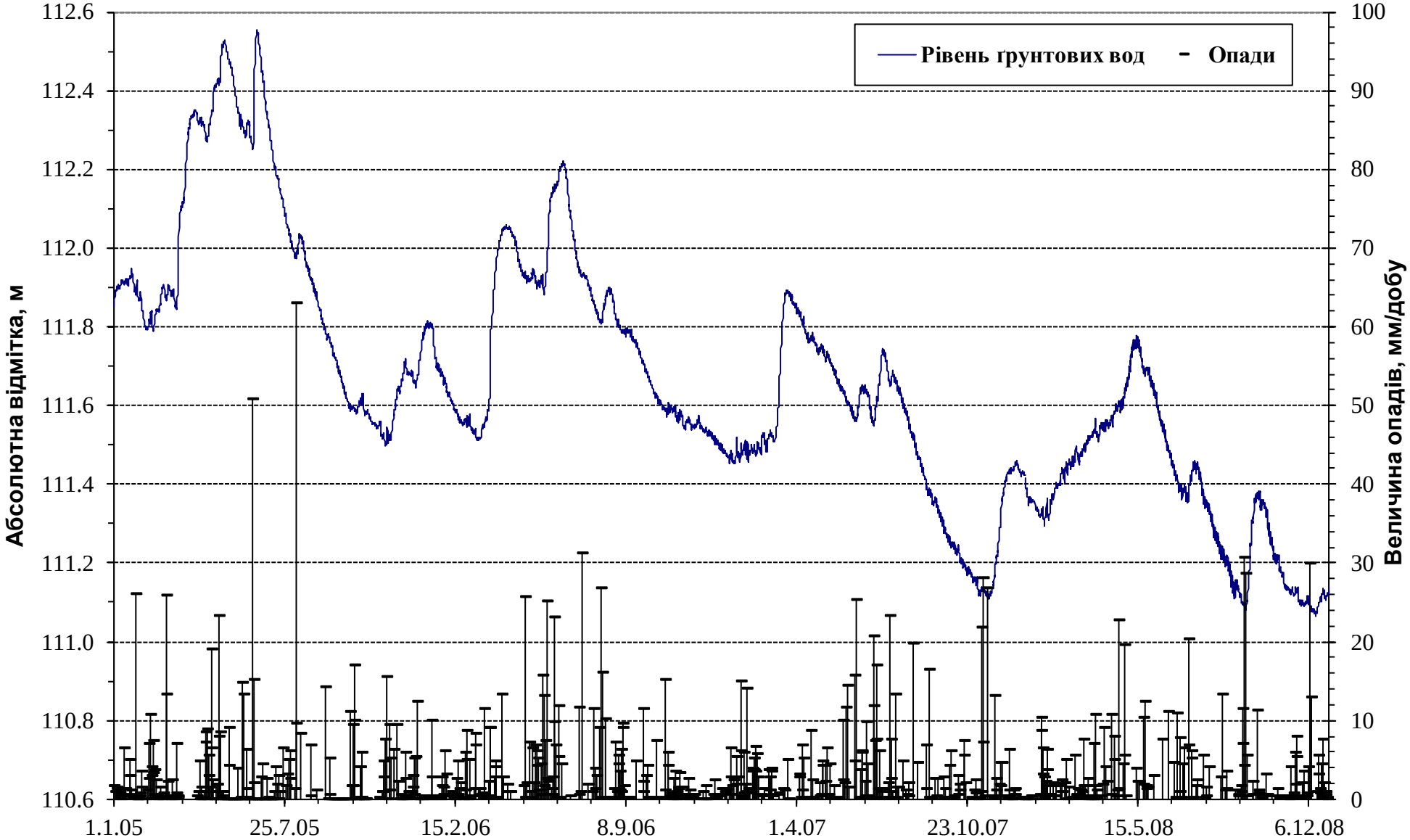


Рис. А.2. Режим рівнів ґрунтових вод ПТЛРВ «Рудий ліс» в 2005-2008 рр.

Продовж. дод. А

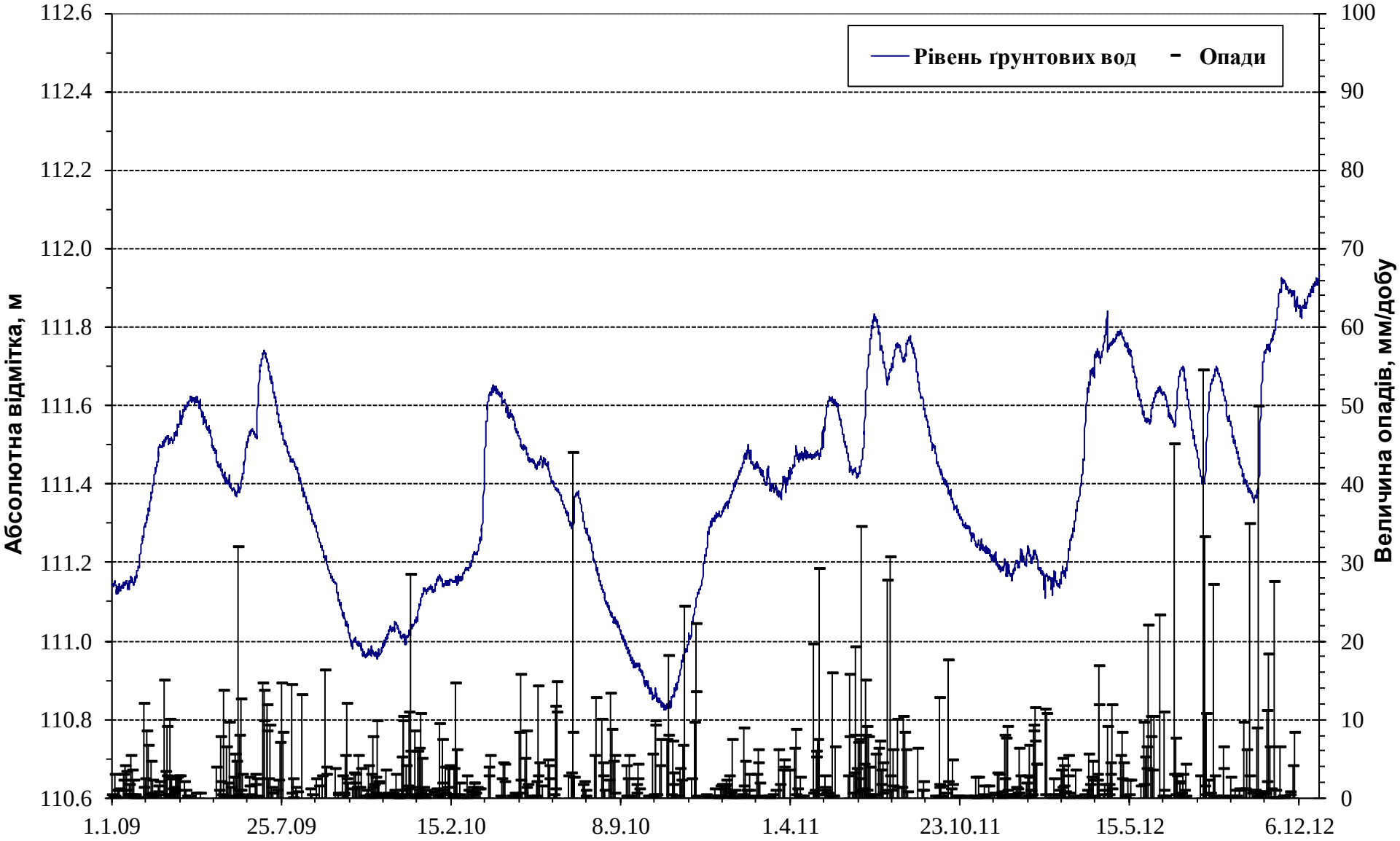


Рис. А.3. Режим рівнів ґрунтових вод ПТЛРВ «Рудий ліс» в 2009-2012 рр.

Додаток Б

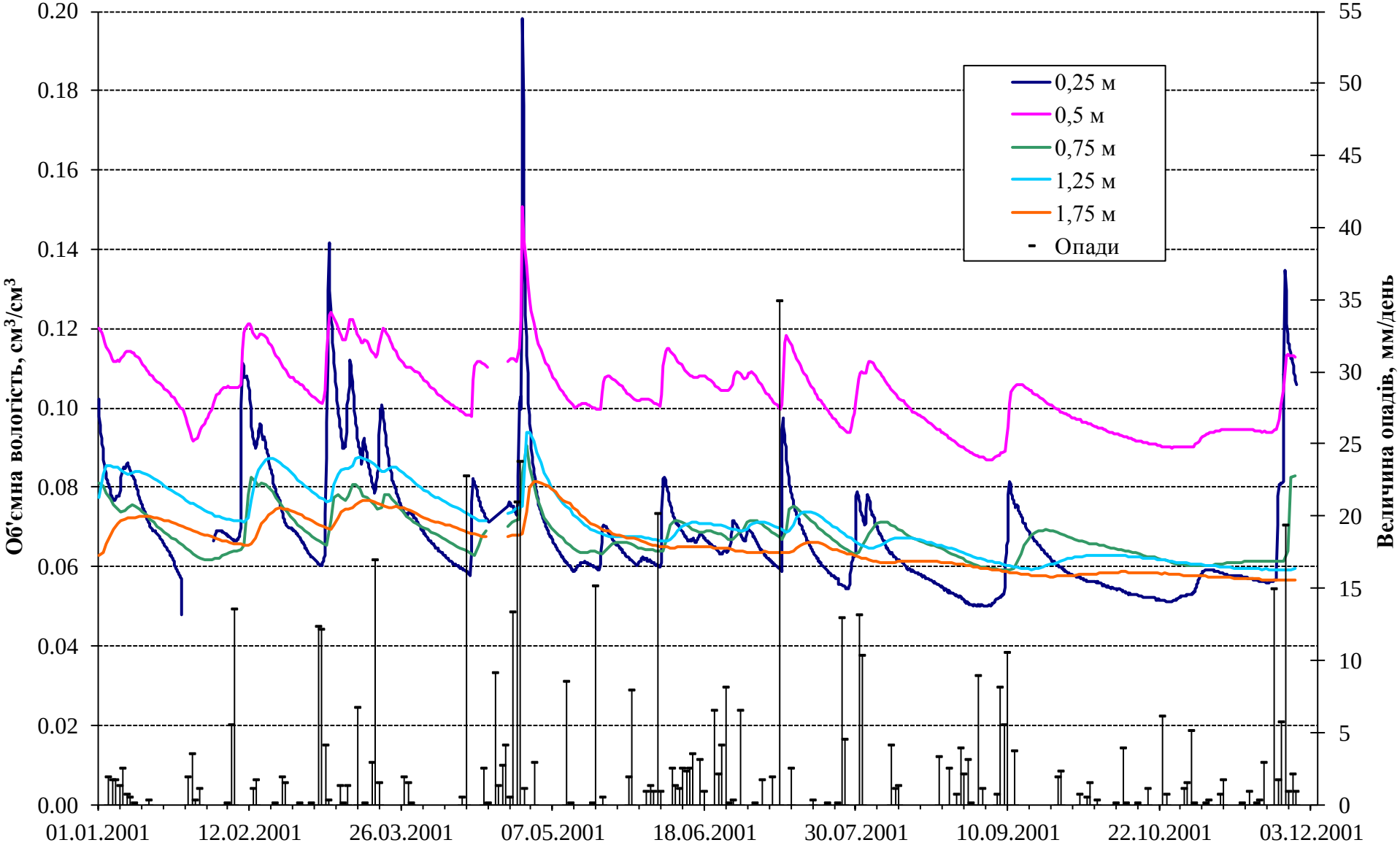


Рис. Б.1. Режим об'ємної вологості ґрунтів зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,25-1,75 м в 2001 р.

Продовж. дод. Б

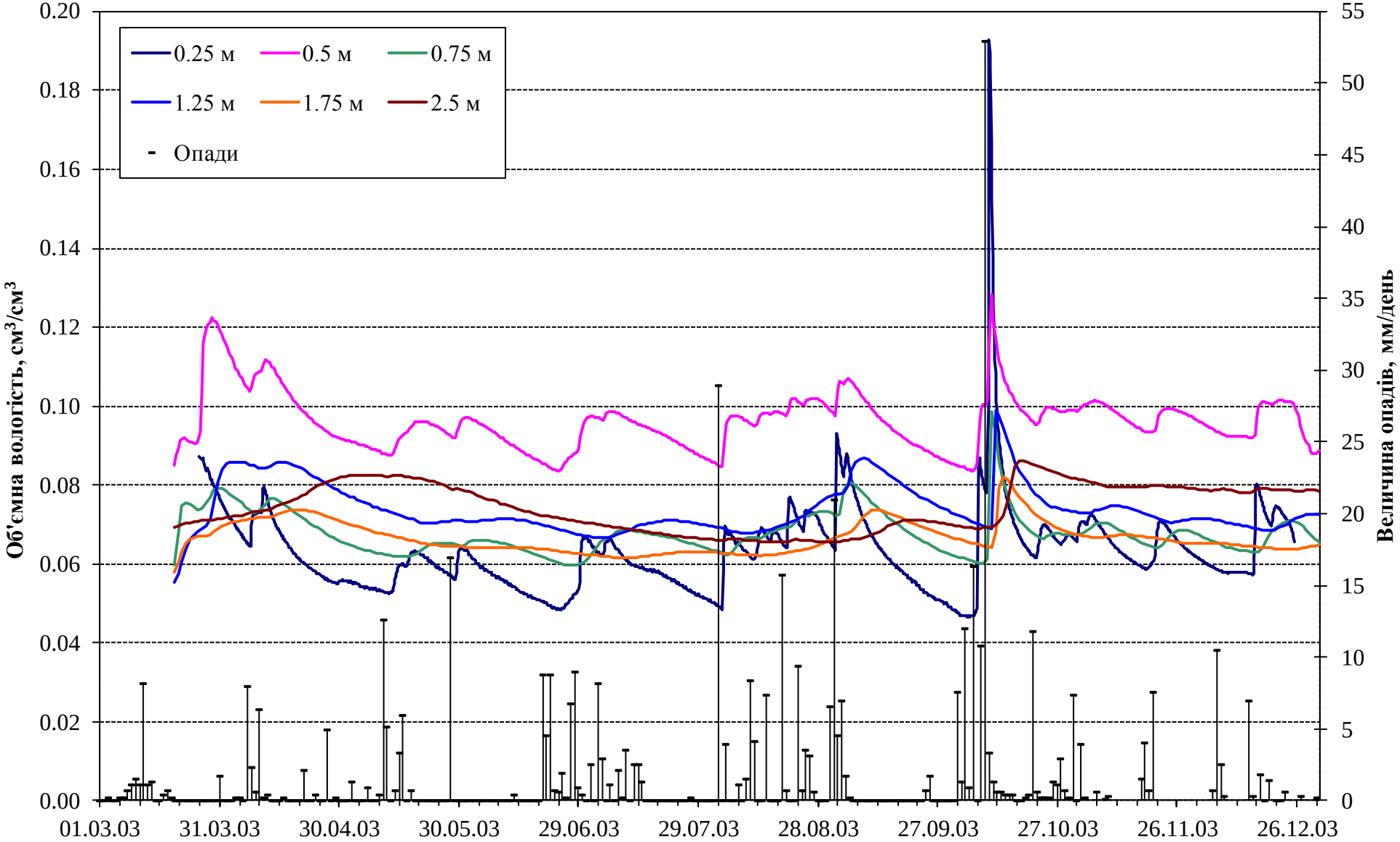


Рис. Б.2. Режим об'ємної вологості ґрунтів зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,25-2,5 м в 2003 р.

Продовж. дод. Б

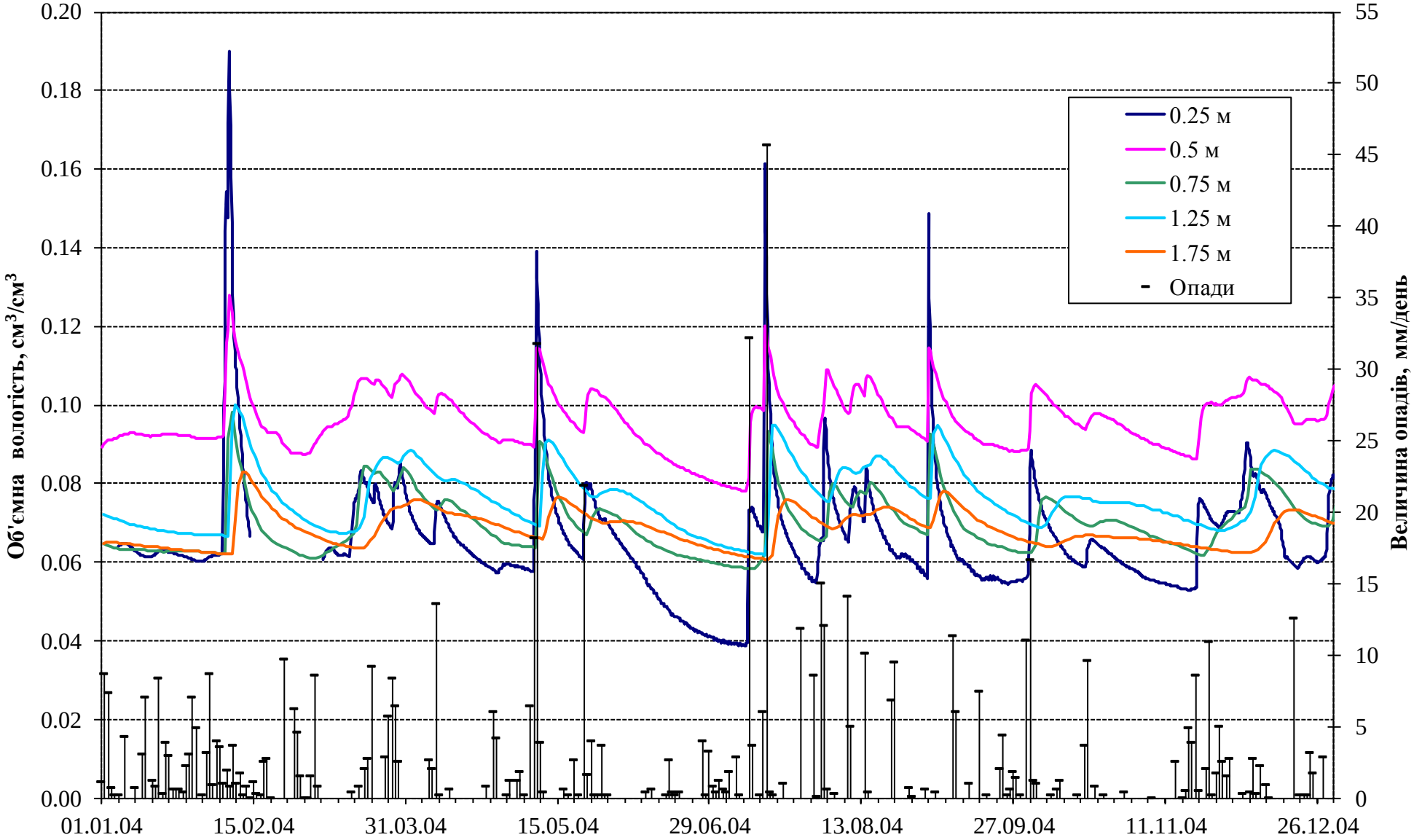


Рис. Б.3. Режим об'ємної вологості ґрунтів зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,25-1,75 м в 2004 р.

Додаток В

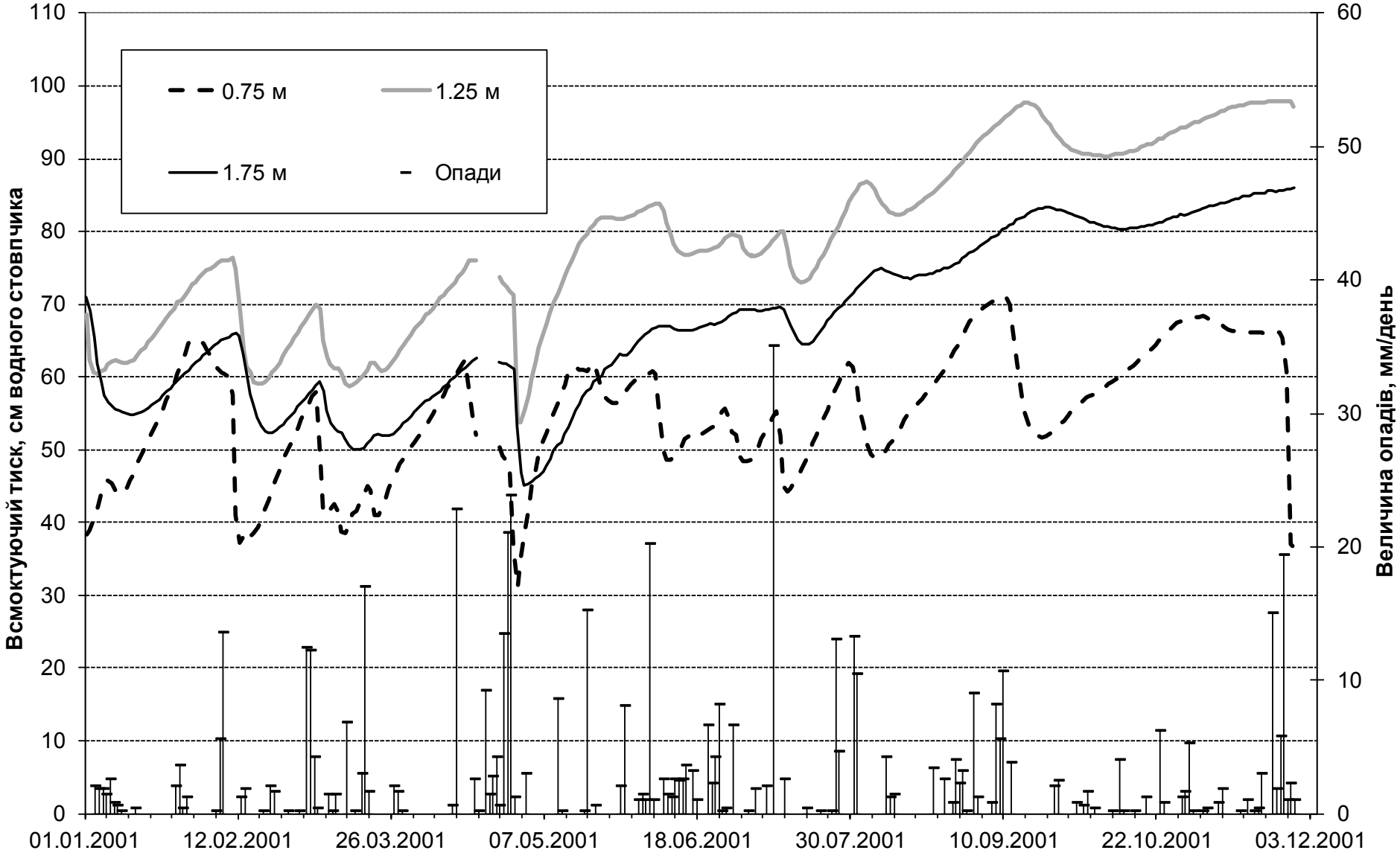


Рис. В.1. Режим всмоктуючого тиску в ґрунтах зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,75-1,75 м в 2001 р.

Продовж. дод. В

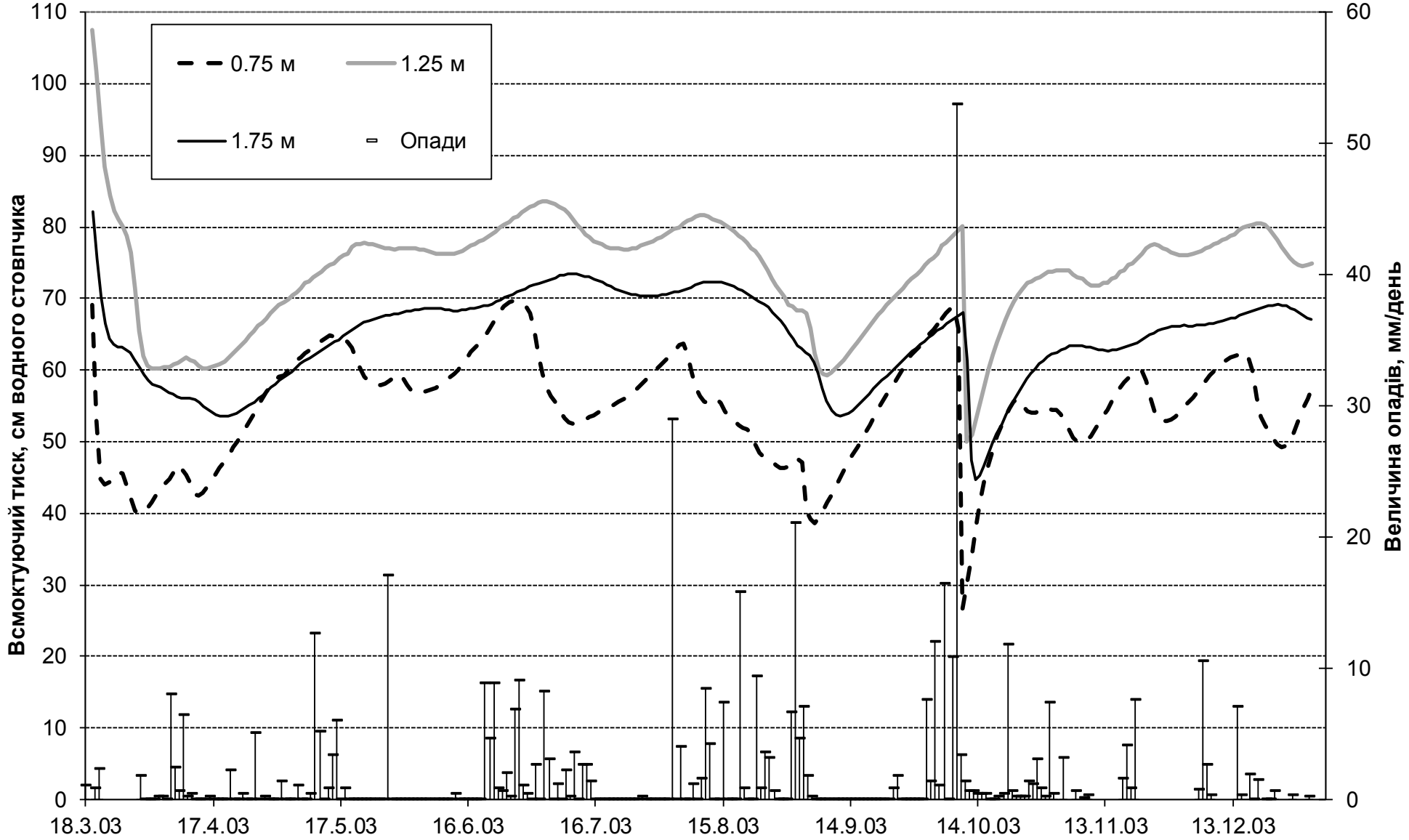


Рис. В.2. Режим всмоктуючого тиску в ґрунтах зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,75-1,75 м в 2003 р.

Продовж. дод. В

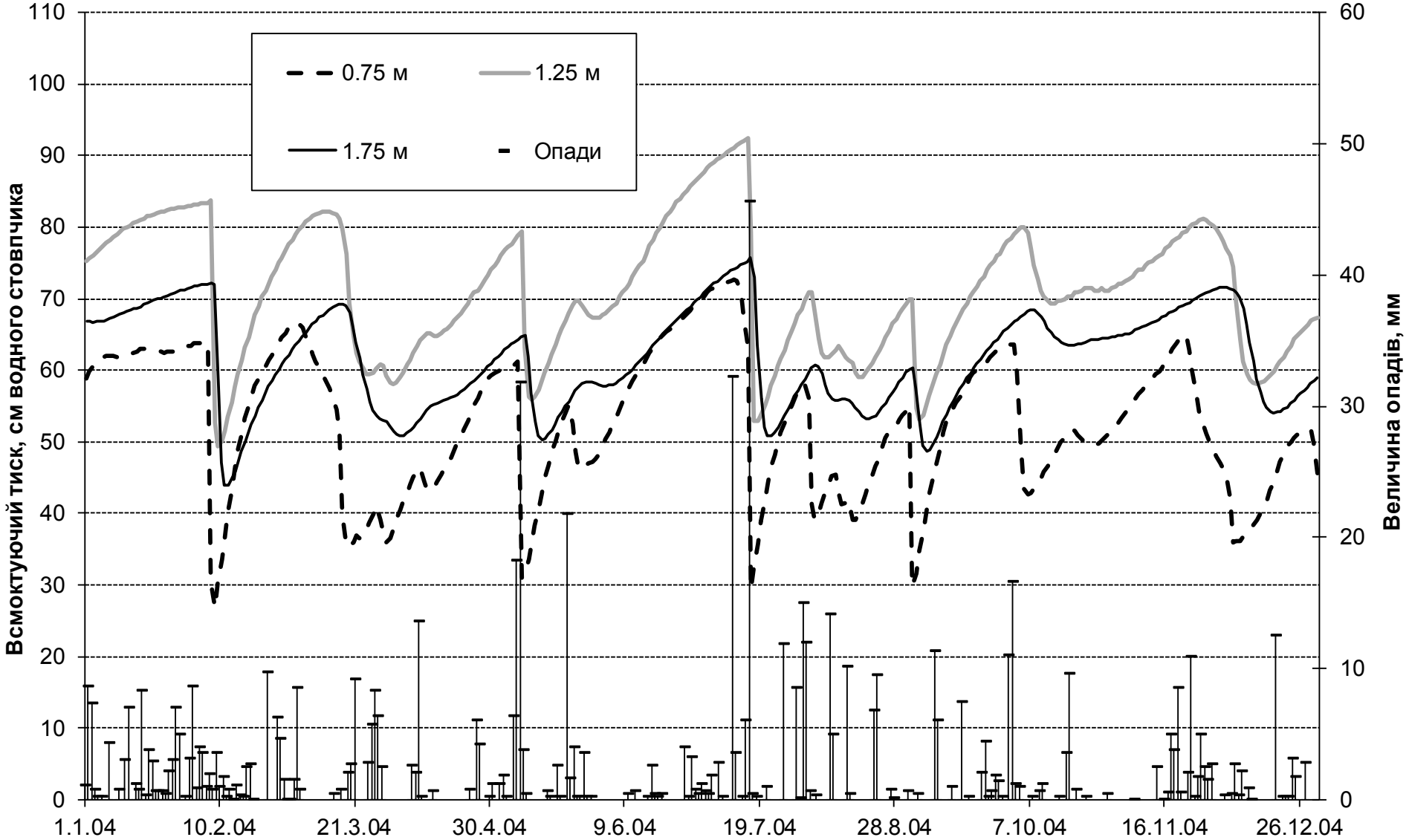


Рис. В.3. Режим всмоктуючого тиску в ґрунтах зони аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,75-1,75 м в 2004 р.

Додаток Г

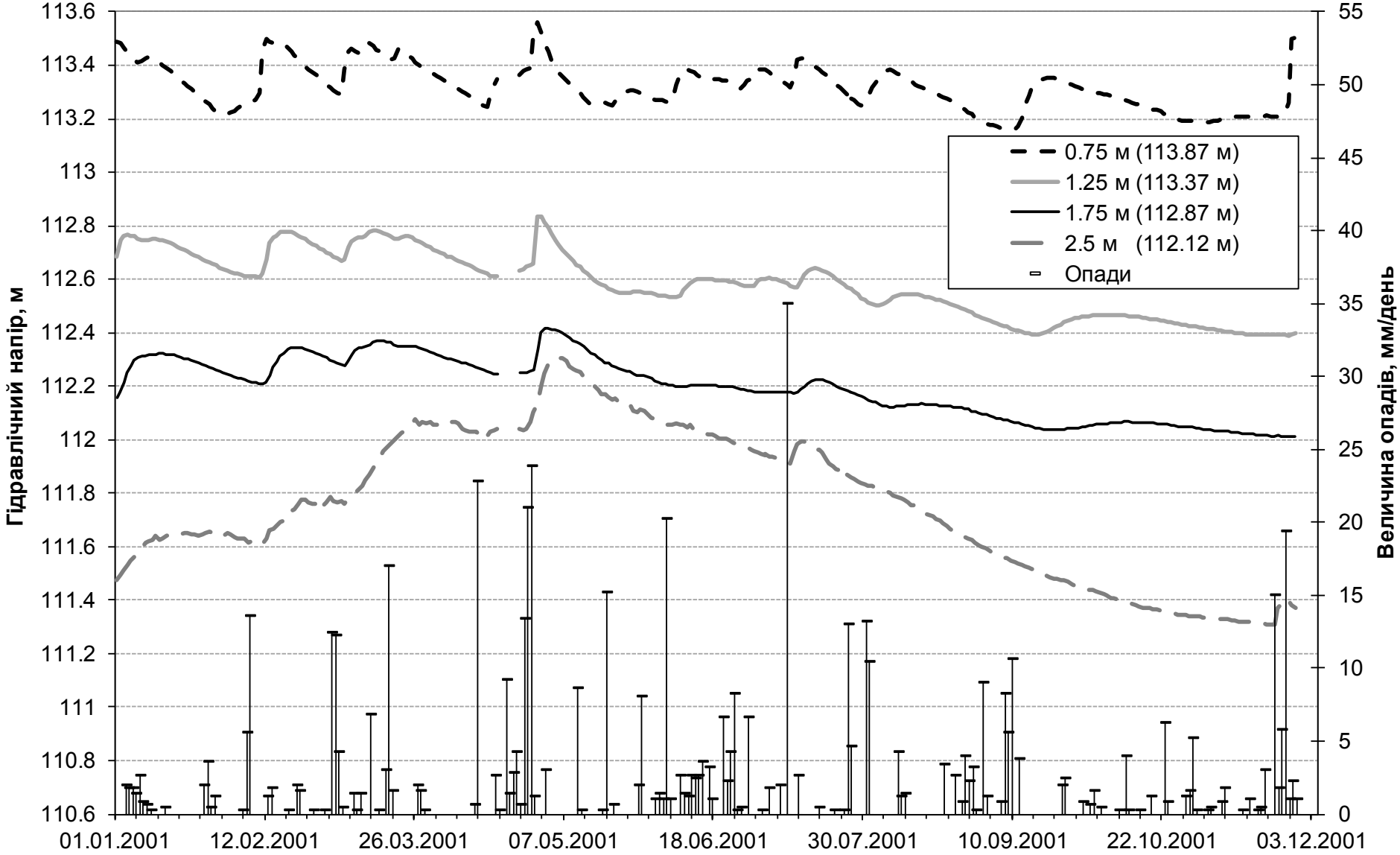


Рис. Г.1. Режим гідравлічного напору в зоні аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 0,75-2,5 м в 2001 р.

Продовж. дод. Г

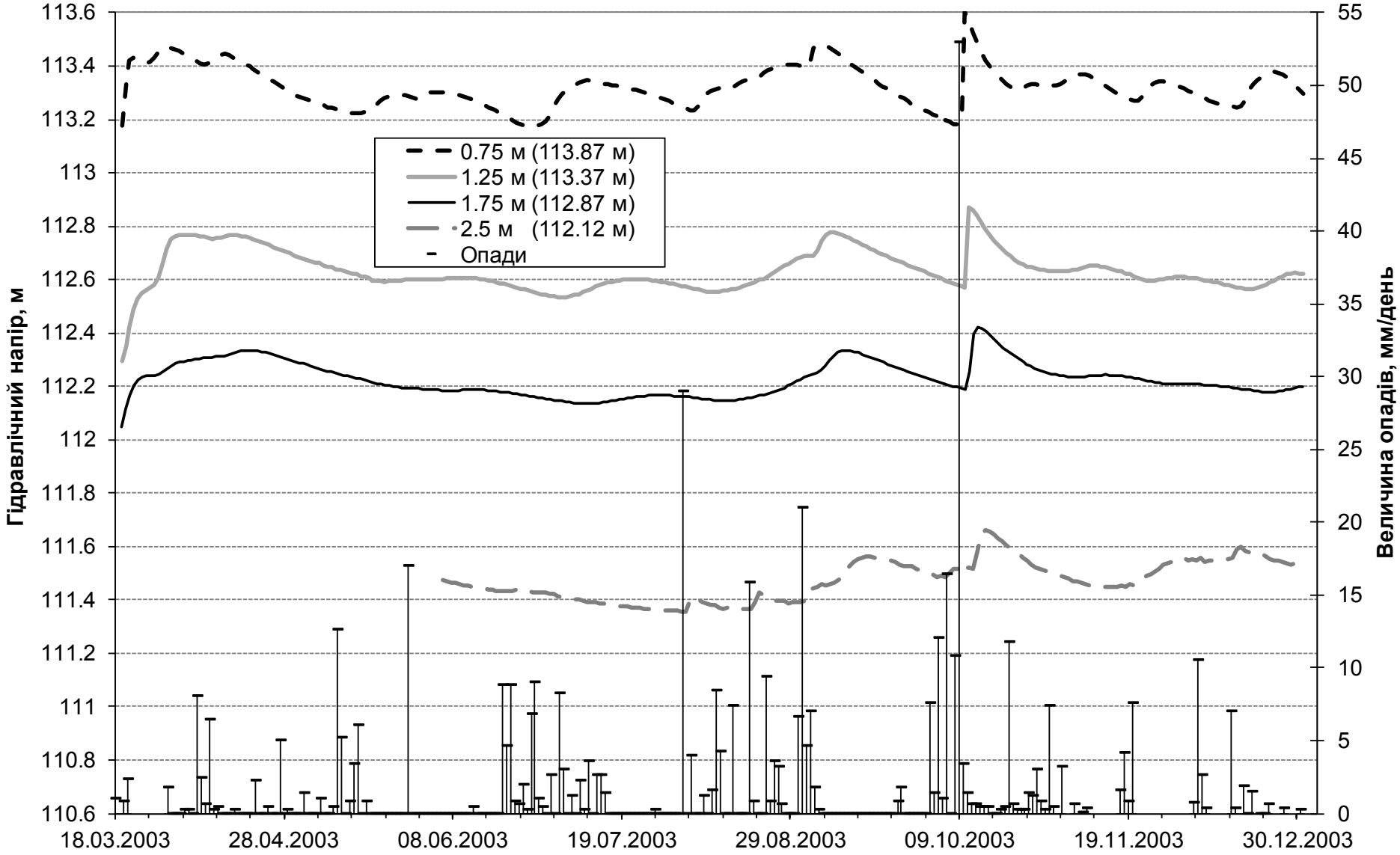


Рис. Г.2. Режим гідравлічного напору в зоні аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 1,25 і 1,75 м в 2003 р.

Продовж. дод. Г

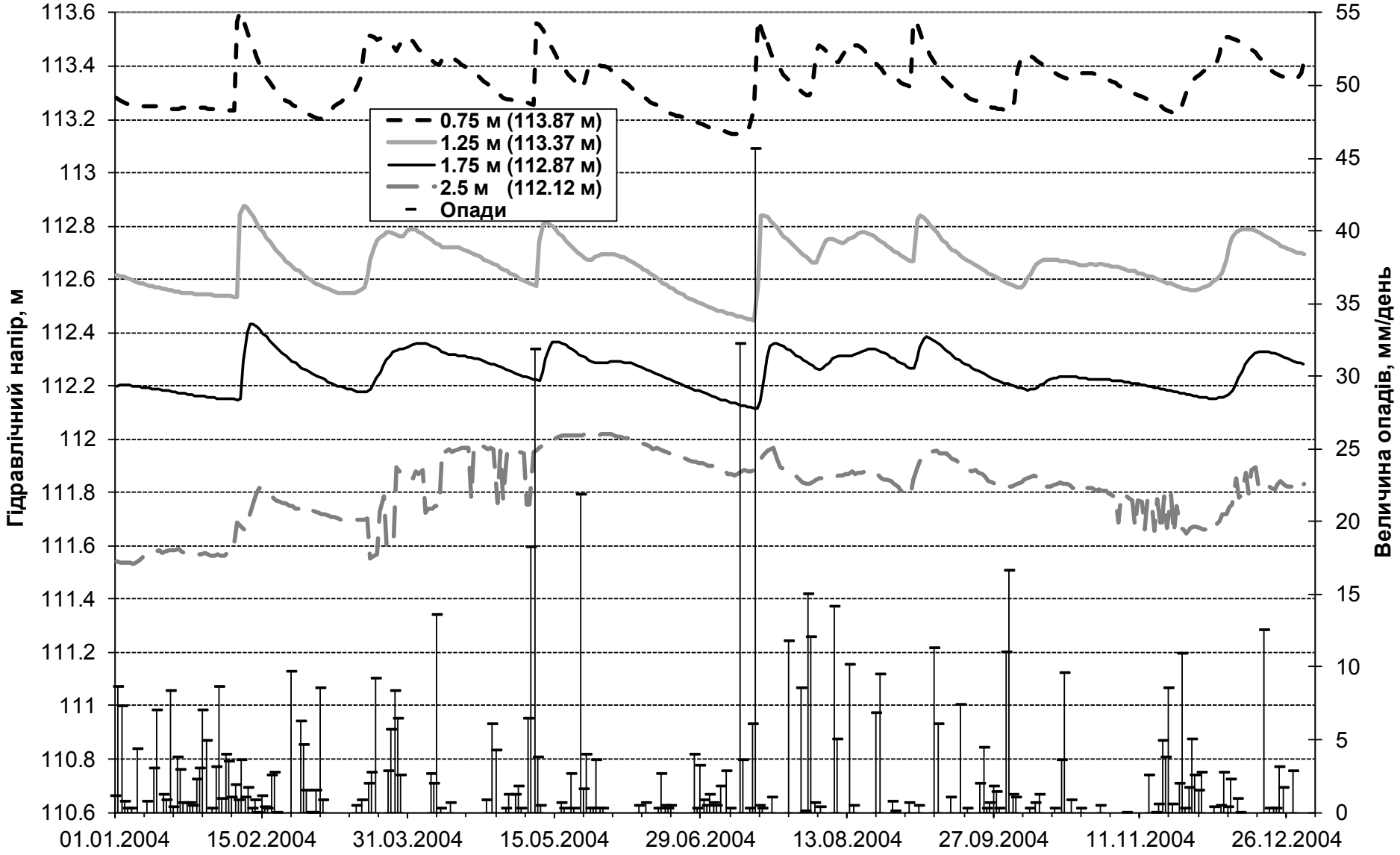


Рис. Г.3. Режим гідравлічного напору в зоні аерації ПТЛРВ «Рудий ліс» на глибинах 1,25 і 1,75 м в 2004 р.

Додаток Д

Список публікацій здобувача

1. Саприкін В., Бугай Д., Скальський О., Ван Меєр Н. Визначення коефіцієнту вологопереносу пісків in-situ на основі аналізу динаміки вмісту вологи в ґрунтовому профілі після дощів. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Серія: Геологія*. 2010. № 49. С. 42-46 (Особистий внесок – виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

2. 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". *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України.* 2011. Вип. 4. С. 141-151 (Особистий внесок – виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

3. Саприкін В. Моделювання процесів руху вологи в ґрунтах зони аерації ділянки чорнобильського "Рудого лісу". *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Серія: Геологія.* 2012. № 59. С. 44-48.

4. Саприкін В.Ю., Бугай Д.О., Скальський О.С., Кубко Ю.І. Методика розрахунку інфільтраційного живлення ґрунтових вод і оцінки коефіцієнта водовіддачі піщаних ґрунтів на основі аналізу коливань рівня ґрунтових вод. *Геологічний журнал*. 2015. № 1 (350). С. 89-98 (Особистий внесок – брав участь в експериментальних роботах, виконував розрахунки, брав участь в підготовці статті).

5. Бугай Д.О., Джепо С.П., Скальський О.С., Кубко Ю.І., Саприкін В.Ю. Гідрогеологічний моніторинг і математичне моделювання радіоактивного забруднення підземних вод у Чорнобильській зоні відчуження і на уранових об'єктах колишнього Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Геологічний журнал*. 2018. № 4 (365). С. 47-57 (Особистий внесок – приймав участь у моніторингових роботах, виконував частину розрахунків і моделювання, брав участь в підготовці статті).

6. Бугай Д.О., Скальський О.С., Саприкін В.Ю., Natalie Van Meir. Оцінка коефіцієнту вологопереносу піщаного ґрунту *in-situ* на основі автоматизованих

спостережень за режимом зони аерації. *Моніторинг геологічних процесів*: матеріали IX Міжнародної наукової конференції, 14-17 жовтня 2009 р. Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2009. С. 256-257.

7. 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». *Сучасні напрями геологічних досліджень в Україні*: збірник матеріалів молодіжної наукової конференції, 9-10 листопада 2011 р. Київ, Інститут геологічних наук НАН України, 2011. С. 54-56.

8. Volodymyr Saprykin. The Regime of an Infiltration Flux in Unsaturated Zone to Groundwater at Chernobyl “Red Forest” Radioactive Waste Site. *3rd Students International Geological Conference*. Abstracts. April 27-30, 2012. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2012. 34-35 pp.

9. Саприкін В.Ю. Одномірна математична модель вологоперенесення в зоні аерації ділянки чорнобильського “Рудого лісу”. *Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища*: матеріали X Міжнародної наукової конференції, 17-20 жовтня 2012 р. Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2012. С. 211-213.

10. Саприкін В.Ю., Бугай Д.О. Порівняльний аналіз методів визначення інфільтраційного живлення підземних вод: досвід досліджень на експериментальному полігоні в чорнобильському «Рудому лісі». *Ідеї та новації в системі наук про землю*: матеріали VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції, 10-12 квітня 2019 р. Київ, Інститут геологічних наук НАН України, 2019. С. 92-93.

Продовж. дод. Д

Апробація результатів дисертації

1. IX Міжнародна наукова конференція «Моніторинг геологічних процесів» (Київ, 14-17 жовтня 2009 р., форма участі – публікація тез).

2. Молодіжна наукова конференція «Сучасні напрями геологічних досліджень в Україні» (Київ, 9-10 листопада 2011 р., форма участі – публікація тез).

3. 3rd Students International Geological Conference, Lviv, April 27-30, 2012; (форма участі – публікація тез).

4. X Міжнародна наукова конференція «Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища» (Київ, 17-20 жовтня 2012 р., форма участі – публікація тез).

5. VIII Всеукраїнська молодіжна наукова конференція (Київ, 10-12 квітня 2019 р., форма участі – публікація тез).