

УДК 504.75 + 626/627

Д.В. СТЕФАНИШИН, А.В. ДЕМ'ЯНЮК

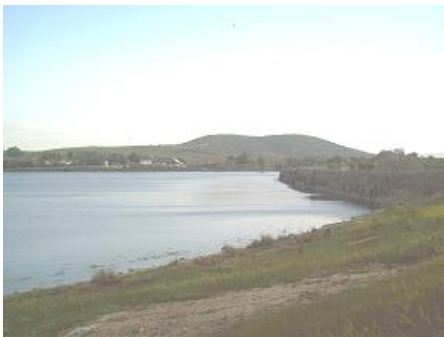
## ОБҐРУНТУВАННЯ БАЗОВОЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ Й ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ В ТІЛІ ЗЕМЛЯНОЇ ГРЕБЛІ ЗА ДАНИМИ РЕГУЛЯРНИХ П'ЄЗОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

*Анотація.* Розглянуто задачу вибору базової діагностичної моделі для контролю й прогнозування фільтрації в тілі земляної греблі за даними регулярних п'єзометричних спостережень.

*Ключові слова:* діагностична модель, земляна гребля, контроль, кореляція, п'єзометричні спостереження, прогнозування, регресія, фільтрація.

### Вступ

Земляні греблі є найбільш поширеним типом водопідпірних споруд у світі, зокрема і в Україні, де їх доля сягає майже 90% від загальної кількості гребель різного типу та призначення. Земляним греблям надають перевагу завдяки їх достатній надійності, перевіреній практикою протягом тисячолітньої історії гідротехнічного будівництва (рис. 1), та через порівняно невисоку вартість зведення. Однак, наявність в тілі земляних гребель фільтраційного потоку, який в деяких випадках може суттєво впливати на їх роботу та робити вразливими до різного роду фільтраційних деформацій, все ще розглядається одним з їх недоліків [1]. Для земляних гребель фільтрація води разом із ущільненням ґрунтових мас є домінуючими процесами, що визначають їх стан. При цьому з фільтрацією, за статистикою, пов'язують до 60% всіх аварійних ситуацій, що сталися на земляних греблях [2]. Зважаючи на це, контролю фільтрації на земляних греблях приділяється значна увага, в тому числі і за допомогою спеціалізованих інструментальних спостережень [2–5].



а)



б)

Рис. 1 – Греблі Прозерпіна (а) (висота 21 м) та Корнальво (б) (висота 24 м), що успішно експлуатуються в Іспанії з часів Римської Імперії (були побудовані на межі I–II століть нашої ери) [5]

Серед видів інструментального контролю фільтрації на земляних греблях особливе значення мають п'езометричні спостереження [2, 3, 5]. Вважається, що поверхня депресії, побудована за результатами натурних вимірювань рівня води в п'езометрах, встановлених в кількох вимірювальних (п'езометричних) створах, найбільш наглядно може характеризувати фільтраційний потік в тілі земляної греблі та вказувати на можливі фільтраційні порушення й аномалії. Від положення поверхні депресії в тілі земляної греблі залежить стійкість її низового укосу. За допомогою п'езометрів може контролюватися працездатність протифільтраційних елементів і дренажних пристроїв, здійснюватися перевірка загальної і місцевої (локальної) фільтраційної міцності тіла греблі та її основи, встановлюватися достатність заглиблення поверхні депресії під поверхню низового укосу для недопущення її сезонного промерзання. Все це обумовлює актуальність досліджень, пов'язаних з контролем й прогнозуванням фільтрації в тілі земляних гребель за даними п'езометричних спостережень, зокрема і проблеми розробки ефективних діагностичних моделей, за допомогою яких можна забезпечити завчасне виявлення різного роду фільтраційних порушень.

### **Огляд проблеми й постановка задачі досліджень**

Згідно з традиційним підходом до контролю фільтрації на земляних греблях за даними п'езометричних спостережень в якості діагностичних параметрів прийнято використовувати рівні води в п'езометрах [3–7]. Контроль здійснюється порівнянням заміряних (або прогнозованих) рівнів води в п'езометрах з деякими їх допустимими значеннями. При цьому останні не завжди встановлюються у строгій відповідності з чинними нормами проектування [1], а саме в залежності від критеріїв граничних станів земляних гідроспоруд. Зазвичай в якості допустимих показів п'езометрів використовуються розрахункові значення п'езометричних рівнів кривої депресії (депресійної поверхні), що відповідають прийнятій в проекті розрахунковій схемі фільтрації, і, при яких, відповідно, проводилися проектні розрахунки фільтраційної міцності тіла споруди та стійкості укосів. Однак, на практиці, досить часто, особливо при тривалій експлуатації греблі, допустимі покази п'езометрів приймаються і з врахуванням значень, які в процесі експлуатації споруди виходили за межі проектних, без додаткової перевірки загальної стійкості низового укосу, місцевої та загальної фільтраційної міцності тіла греблі тощо.

Безперечно, що не кожне небажане «відхилення», особливо випадкове й нетривале, натурального положення рівня води в одному п'езометрі від допустимого, узгодженого з проектом, однозначно свідчить про порушення фільтраційного режиму у відповідній області фільтрації з загрозою негативних наслідків для греблі в цілому. Причинами таких відхилень, наприклад, може бути температурний фактор, а також вихід з ладу п'езометрів або їх підтоплення внаслідок випадання дощів, танення снігу тощо. На різних ділянках фільтрації в тілі земляної греблі одночасно можуть відбуватися як суфозійні процеси, так і процеси кольматажу, що також відбивається на показах п'езометрів [5]. При цьому споруда в цілому або окремий її елемент можуть в повній мірі відповідати нормативним вимогам і при різних показах п'езометрів при одних і тих же умовах її роботи та навантаженнях в різні

моменти часу. В той же час саме зміни в часі можуть свідчити про характер розвитку фільтраційного процесу в тілі греблі й про те, в якому стані знаходяться окремі її частини, протифільтраційні та дренажні пристрої. Таким чином, для підвищення ефективності п'єзометричного контролю важливо відслідковувати, коректно інтерпретувати й передбачати ці зміни.

Такий підхід до контролю фільтрації в тілі земляної греблі за даними п'єзометричних спостережень узгоджується з основними принципами діагностики та контролю стану технічних систем та об'єктів, які були сформульовані Р. Коллакотом [8], зокрема:

- 1) послідовність й систематичність (неперервність або регулярність) вимірювань параметрів й ознак, обраних в якості діагностичних;
- 2) виявлення змін в поведінці цих параметрів й ознак в часі;
- 3) прогнозування майбутніх станів об'єкта діагностування з врахуванням цих змін.

Відповідно вирішення проблеми контролю фільтрації в тілі земляної греблі за даними п'єзометричних спостережень залежить від вибору відповідних діагностичних параметрів й побудови ефективних діагностичних моделей, які б дозволяли реалізувати вищевказані принципи на практиці.

Регулярність п'єзометричних спостережень на земляних греблях забезпечує їх автоматизація. Впровадження сучасних автоматизованих систем контролю (АСК) стану гідроспоруд, як показав досвід застосування АСК на лівобережній земляній греблі Київського гідровузла [5], значно розширює можливості традиційного п'єзометричного контролю фільтрації на земляних греблях, оснащених, як правило, досить великою кількістю п'єзометрів. Зокрема, можуть встановлюватися довільні інтервали часу між замірами, які можуть проводитися щодня, щогодини тощо. Заміри на різних п'єзометрах легко узгоджуються в часі, в тому числі і з спостереженнями за іншими важливими параметрами, які можуть включатися в діагностичну модель.

В [9, 10] було запропоновано новий підхід до контролю, моделювання і прогнозування стану складної системи за даними моніторингу, що ґрунтується на побудові ситуаційних і індуктивних діагностичних моделей на основі рядів динаміки. Окремі положення цього підходу щодо контролю й прогнозування стану земляних гребель викладено також в [5]. Згідно з цим підходом ситуаційні моделі, які, зазвичай, представляються у вигляді простих регресій від одного, найбільш значимого параметра впливу, адаптуються до даних окремих часових інтервалів функціонування системи з однорідним прогнозним фоном, які обмежуються монотонними або квазістаціонарними динамічними рядами даних і вважаються адекватними на цих інтервалах. Результати ситуаційного моделювання формують підставу (базу) для побудови індуктивних моделей, де враховуються особливості еволюції параметрів стану системи в часі. Загальна прогнозна модель станів системи при такій постановці задачі являє собою сімейство індуктивних моделей як моделей «рівнів», які можуть представлятися трендами модельних значень, у вигляді регресій модельних значень або комбінаціями трендів та регресій залишків трендів модельних значень, що встановлюються за ситуаційними моделями минулих періодів, в тому числі і від деяких похідних параметрів незалежних змінних. При цьому прогнозування стану системи може здійснюватися як на основі ситуаційних моделей, за допомогою яких відслідковується поведінка параметрів стану системи в межах обмежених

інтервалів часу, на яких ситуаційні моделі є адекватними, так і на основі індуктивних моделей, за допомогою яких відслідковується еволюція ситуаційних моделей як фазових портретів минулих станів системи та відтворюються ситуаційні моделі станів системи майбутніх періодів. В якості рівнянь зв'язку при такому, комбінованому, ситуаційно-індуктивному моделюванні, на окремих його етапах, можуть використовуватися відносно прості залежності (функціональні – кінематичного типу у вигляді трендів і регресійні), що легко адаптуються до нових даних та змін прогнозного фону [9, 10]. Задачею цих досліджень є обґрунтування структури висхідної ситуаційної моделі, яку можна назвати базовою, для здійснення ефективного контролю й коректного прогнозування фільтрації в тілі земляної греблі при ситуаційно-індуктивному моделюванні за даними регулярних п'езометричних спостережень, які забезпечує АСК.

### **Вибір змінних базової ситуаційної моделі**

Основними діагностичними моделями, що наразі використовуються при оцінці стану гідроспоруд на основі даних інструментальних спостережень, в тому числі і за фільтрацією, є регресійні моделі. Зокрема регресійні залежності, інколи й досить складні, які описуються великою кількістю пояснюючих змінних, використовуються при моделюванні фільтраційних витрат [4].

Що стосується моделювання положення поверхні депресії за даними п'езометричних спостережень, то така задача в рамках традиційного підходу, коли за вибірковими даними будуються регресійні залежності, які можуть бути справедливими й для генеральних сукупностей даних й використовуватися при прогнозуванні, може виявитися набагато складнішою, ніж моделювання фільтраційних витрат, на що вказується в [5, 8].

Ситуаційно-індуктивне моделювання [9, 10] дозволяє спростити поставлену задачу. При такому підході вибіркові регресійні моделі вважаються справедливими лише на обмежених інтервалах часу, протягом яких формувалися відповідні вибірки даних спостережень. Тому кожен ситуаційну регресійну модель, побудовану за даними п'езометричних спостережень, слід розглядати, насамперед, як інтерпретаційну модель.

Аналіз рядів даних регулярних п'езометричних спостережень на лівобережній земляній греблі Київського гідровузла [5] показує, що за допомогою АСК можна накопичувати необхідні дані в достатніх обсягах, щоб формувати репрезентативні (представницькі) вибірки для будь-якої ситуації, яка розвивається в часі і може розглядатися з точки зору контролю фільтрації в тілі земляної греблі. При цьому на короткому інтервалі часу при оперуванні рядами динаміки легше забезпечити належність вибіркових даних до кластерів, на базі яких при побудові ситуаційної регресійної моделі можна обмежитись лише однією незалежною (пояснюючою, екзогенною) змінною, щоб в якості ситуаційної моделі використати просту (парну) регресію.

Зокрема, в [5] в якості таких ситуаційних моделей, які можуть бути адекватними на обмежених інтервалах часу, було запропоновано використовувати прості лінійні регресійні залежності падіння напору на контрольованій ділянці фільтрації (від урізу води у верхньому б'єфі до п'езометра або між п'езометрами тощо) від рівня води у верхньому б'єфі, де падіння напору:

$$h = x - z, \quad (1)$$

де  $x$  – рівень води у РВБ – незалежна (пояснююча, екзогенна змінна моделі);  
 $z$  – рівень води у п'єзометрі.

Відповідно модельне значення рівня води в п'єзометрі за результатами ситуаційного моделювання падіння напору на деякому  $j$ -му інтервалі часу у вигляді простої лінійної регресії виду  $h_{r,j} = b_{0,j} + b_{1,j} \cdot x_j + e_j$ , де  $b_{0,j}$ ,  $b_{1,j}$  – невідомі параметри (коефіцієнти  $j$ -ї ситуаційної моделі), що потребують визначення,  $e_j$  – випадкові відхилення від моделі, при цьому буде:

$$z_{r,j} = x_j - h_{r,j}. \quad (2)$$

В цьому випадку необхідність врахування нелінійності між змінними моделі може свідчити про зміну ситуації і вказувати на необхідність побудови нової ситуаційної моделі.

Проведені нами вибіркові дослідження щільності кореляційних зв'язків між різними змінними в альтернативних ситуаційних моделях, з яких прямо чи опосередковано можуть визначатися рівні води в п'єзометрах, показали, що у всіх можливих ситуаціях щільність кореляційних зв'язків між падіннями напору та рівнями води у верхньому б'єфі є найбільшою в порівнянні з іншими випадками ситуаційного моделювання. В якості незалежних змінних при пошуковому моделюванні нами розглядалися рівень води у верхньому б'єфі (змінна  $x$ ), рівень води в нижньому б'єфі (змінна  $y$ ), напір (змінна  $H$ ) (різниця між рівнями води в б'єфах,  $H = x - y$ ); в якості залежних змінних – рівні води в п'єзометрах  $z$ , падіння напору на ділянці фільтрації  $h$  та такі відносні величини як  $z/x$ ,  $h/x$ ,  $z/H$ ,  $h/H$ . Температура води в б'єфах, температура повітря, температура води в п'єзометрі та інші можливі показники при цьому відносилися до прогностного фону [9, 10].

### Перевірка адекватності базової ситуаційної моделі

Для перевірки адекватності використання простої лінійної регресії між падінням напору  $h$  на контрольованій ділянці фільтрації до п'єзометра та рівнем води у верхньому б'єфі  $x$  для прогнозування рівня води в п'єзометрі на основі ситуативно-індуктивного моделювання за даними регулярних п'єзометричних спостережень було виконано контрольне прогнозування положення рівня води в п'єзометрі П-65Б, встановленому в тілі лівобережної земляної греблі Київського гідровузла в області дренажу, для першої декади грудня за даними щоденних замірів рівнів води в п'єзометрі та рівнів води у верхньому б'єфі, які проводилися в 2002–2009 рр. Перспективне прогнозування здійснювалося на грудень 2010, 2011, 2012 рр.

Результати ситуаційного моделювання у формі простих лінійних регресій між падіннями напору (залежна змінна  $h$ ) на ділянці фільтрації до п'єзометра П-65Б та рівнями води у верхньому б'єфі (РВБ, пояснююча змінна  $x$ ) представлено на рис. 2. Індуктивне моделювання здійснювалося при трьох очікуваних значеннях РВБ, що повторюються протягом служби греблі

(102,2 м, 102,6 м та 103,0 м). Для цього формувалися ряди динаміки модельних значень падінь напору в часі (рис. 3), визначених за допомогою ситуаційних моделей (рис. 2) при одних і тих же значеннях РВБ, щоб відобразити еволюційні зміни в показках п'єзометра в часі.

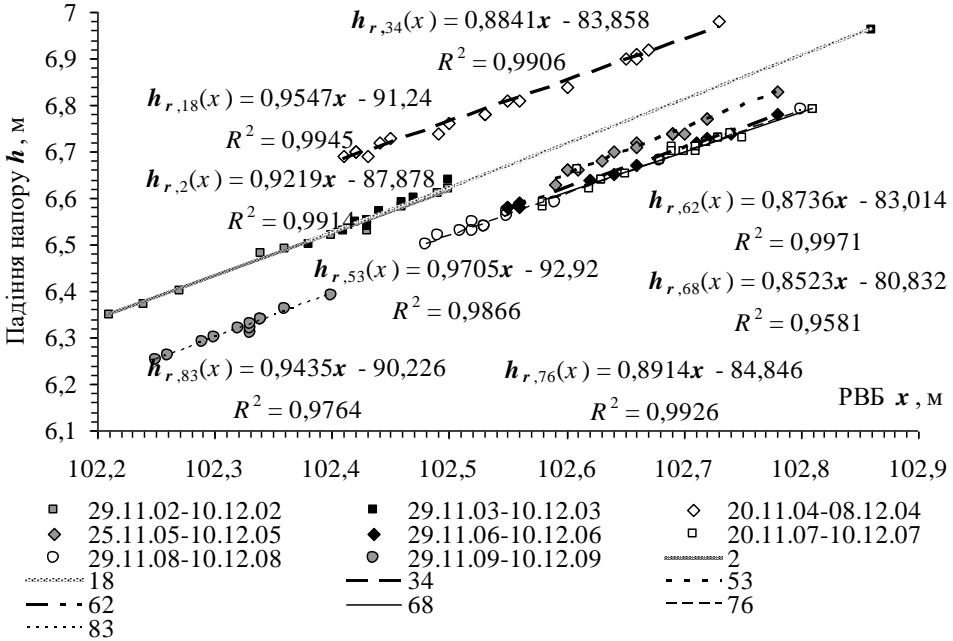


Рис. 2 – Ситуаційні регресійні моделі падіння напору  $h_{r,j}(x)$  на ділянці фільтрації між верхнім б'єфом та п'єзометром П-65Б для першої декади грудня, де  $j$  – порядковий номер ситуаційної моделі

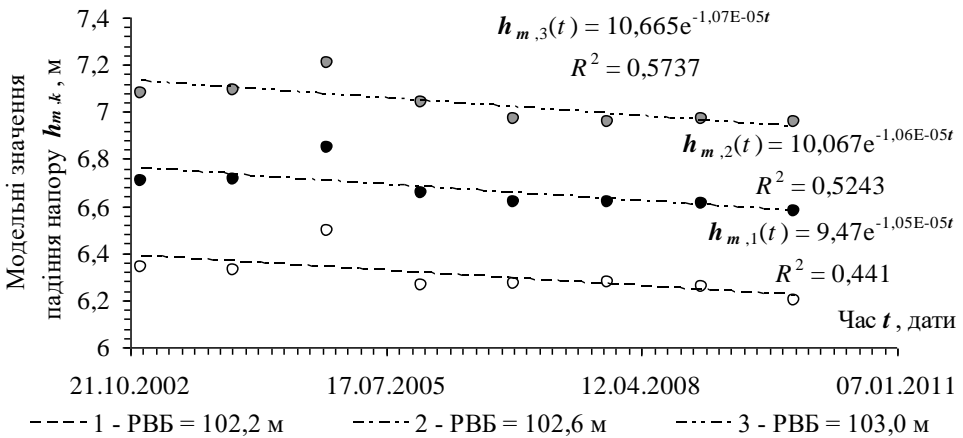


Рис. 3 – Виділення кінематичних складових (у вигляді трендів  $h_{m,k}(t)$ ,  $k = 1, 2, 3$ ) в рядах модельних значень падінь напору на ділянці фільтрації до п'єзометра П-65Б для першої декади грудня

Індуктивні (прогнозні) моделі падінь напору  $k$ -х «рівнів» ( $x_k$ ,  $k = 1, 2, 3$ ;  $x_1 = 102,2$  м;  $x_2 = 102,6$  м;  $x_3 = 103,0$  м) представлялися у вигляді композицій двох складових: регулярної (тренду) та регресії відповідних випадкових відхилень  $\Delta h_{jk}$  («залишків») вилучення  $k$ -го тренду в ряді модельних значень  $h_{r,j}(x_k)$  від нової пояснюючої змінної  $x_L$ :

$$h_{p,k}(t, x_L) = h_{m,k}(t) + \Delta h_{r,k}(x_L), \quad k = 1, 2, 3, \quad (3)$$

де  $\Delta h_{jk} = h_{r,j}(x_k) - h_{m,k}(t)$ ,  $x_L$  – змінна (див. значення в табл. 1), яку, зі зміщенням (лагом) в ретроспективу на один часовий період (на одну ситуаційну модель), було вибрано на основі аналізу кореляції з рядами «залишків»  $\Delta h_{jk}$ :

$$x_L = (x_{1,j-1} + x_{n,j-1})/2, \quad (4)$$

де  $x_{1,j-1}$ ,  $x_{n,j-1}$  – значення першого і останнього членів ряду динаміки РВБ попереднього ( $j-1$ ) періоду.

Таблиця 1 – Значення змінної  $x_L$  для попередніх ( $j-1$ ) періодів

Рік	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
$x_L$	102,47	102,93	102,68	102,62	103,07	102,96	102,84	102,59

Регресійні моделі для випадкової складової  $\Delta h_{r,k}(x_L)$  ( $x_k$ ,  $k = 1, 2, 3$ ;  $x_1 = 102,2$  м;  $x_2 = 102,6$  м;  $x_3 = 103,0$  м) представлено на рис. 4.

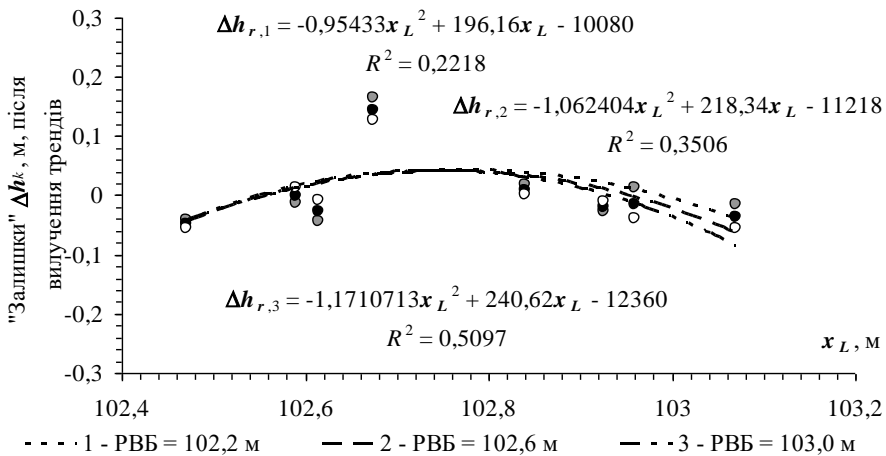


Рис. 4 – Регресійні моделі  $\Delta h_{r,k}(x_L)$

На рис. 5 наведено результати прогнозування значень падіння напору на ділянці фільтрації до п'езометра П-65Б у вигляді ситуаційних моделей-прогнозів з врахуванням спостережених значень змінної  $x_L$ , які порівнюються із ситуаційними моделями, побудованими за натурними даними.

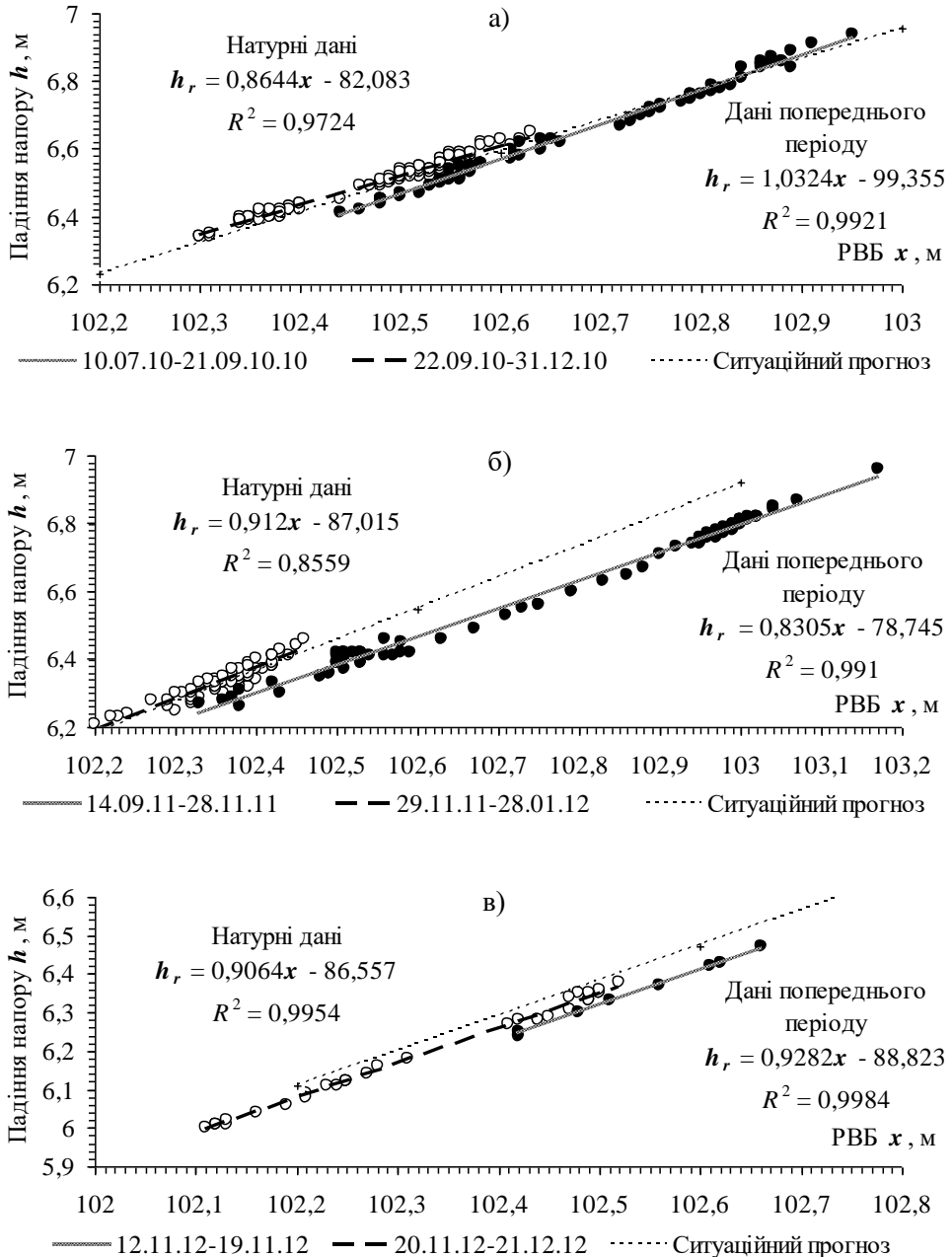


Рис. 5 – Співставлення результатів прогнозування падіння напору на ділянці фільтрації до п'езометра П-65Б з даними спостережень в 2010 р. (а), 2011 р. (б) і 2012 р. (в)



Результати перспективного прогнозування рівнів води в п'єзометрі П-65Б в першій декаді грудня 2010, 2011, 2012 рр., які порівнюються зі спостереженими даними, наведено на рис. 6. Можна зауважити, що, в цілому, результати прогнозування рівнів води в п'єзометрі відповідають натурним даним. Відхилення прогнозних значень відмітки рівня води в п'єзометрі від даних натурних спостережень не перевищує кількох сантиметрів.

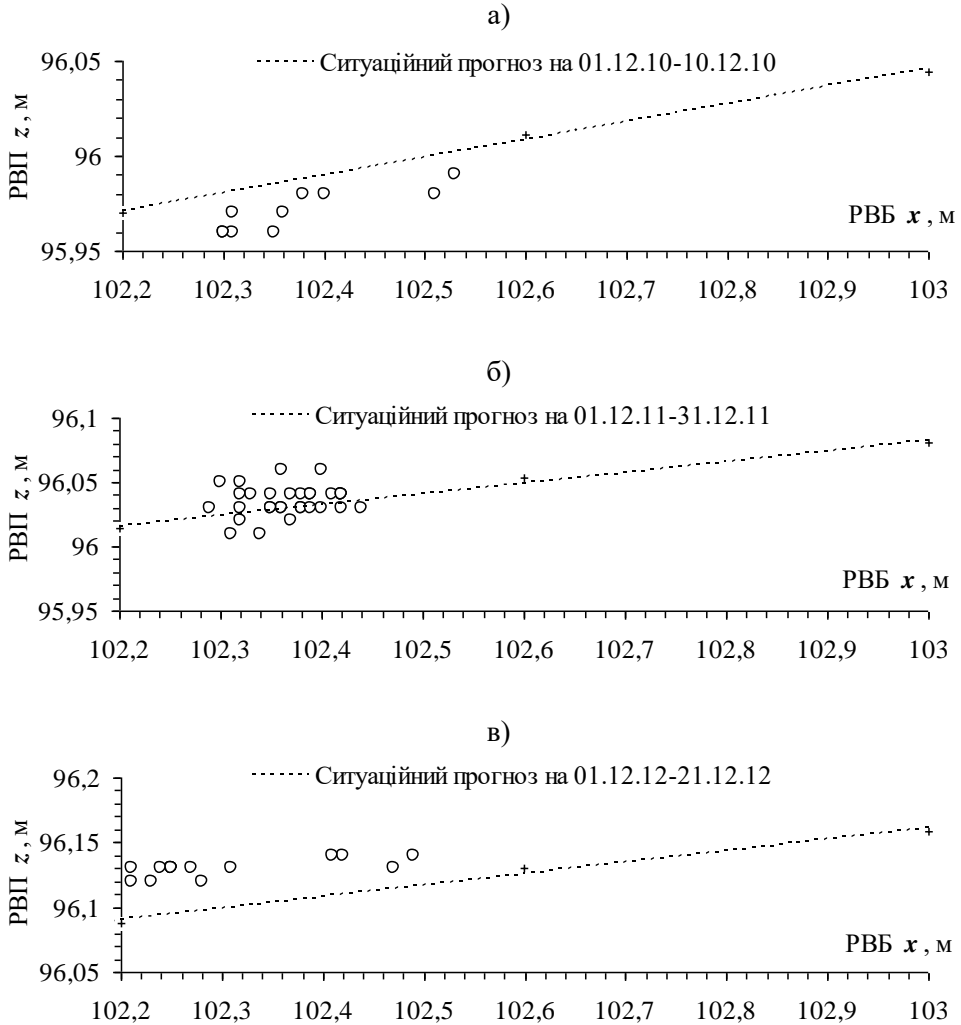


Рис. 6 – Співставлення результатів прогнозування відмітки рівня води ( $z$ ) в п'єзометрі (РВП) П-65Б з даними спостережень в 2010 р. (а), 2011 р. (б) та 2012 р. (в)

## Висновки

1. Обґрунтовано структуру базової ситуаційної моделі для контролю й прогнозування фільтрації в тілі земляної греблі при ситуаційно-індуктивному моделюванні за даними регулярних п'єзометричних

спостережень, які забезпечує АСК, у вигляді простої лінійної регресії падіння напору на ділянці фільтрації до п'єзометра від рівня води у верхньому б'єфі.

2. Здійснено перевірку адекватності використання в якості базової ситуаційної моделі простої лінійної регресії між падінням напору на ділянці фільтрації до п'єзометра та рівнем води у верхньому б'єфі для прогнозування рівня води в п'єзометрі на основі ситуативно-індуктивного моделювання за даними регулярних п'єзометричних спостережень на прикладі ситуаційного прогнозування положення рівня води в п'єзометрі П-65Б, встановленому в тілі лівобережної земляної греблі Київського гідровузла в області дренажу, за даними щоденних замірів рівнів води в п'єзометрі та рівнів води у верхньому б'єфі, які проводилися в 2002–2009 рр. Прогнозування здійснювалося на першу декаду грудня 2010, 2011, 2012 рр.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.4-20:2014. Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення / ДБН В.2.4-20:2014. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2015. – 37 с. – (Національний стандарт України).
2. Аравин В. И. Натурные исследования фильтрации / В. И. Аравин, О. Н. Носова. – Л.: Энергия, 1969. – 256 с.
3. Кавешников Н. Т. Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений / Н. Т. Кавешников. – М.: Агропромиздат, 1989. – 272 с.
4. Малаханов В. В. Техническая диагностика грунтовых плотин / В. В. Малаханов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 121 с.
5. Стефанишин Д. В. Про один підхід до оцінки стану земляної греблі, що перебуває в постійній експлуатації, за даними регулярних п'єзометричних спостережень / Д. В. Стефанишин // Гідроенергетика України. – № 3. – 2012. – С. 27–32.
6. Рекомендации по диагностическому контролю фильтрационного режима грунтовых плотин / П 71–2000. – СПб.: Издательство ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2000. – 30 с.
7. Jung In-Soo. Interpreting the Dynamics of Embankment Dams through a Time-Series Analysis of Piezometer Data Using a Non-Parametric Spectral Estimation Method / In-Soo Jung, M. Berges, J. H. Garrett Jr, Ch. J. Kelly // Computing in Civil Engineering, 2013. – P.P. 25–32.
8. Collacott R. A. Structural Integrity Monitoring / R. A. Collacott. London – New York. Chapman and Hall, 1985. – 455 p.
9. Stefanyshyn D. V. A Method of Forecasting of Indexes of Dynamic System that evolves slowly, based on Time Series Analysis / D. V. Stefanyshyn // ICIM 2013. Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Inductive Modelling. Kyiv, Ukraine, September 16-20, 2013. – P.P. 221–224.
10. Стефанишин Д. В. Метод прогнозного моделювання показників стану гідропоруд за даними моніторингу / Д. В. Стефанишин // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації. Тези доповідей VI Міжнародної наукової конференції. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет. 2014. – С. 157–158.

*Стаття надійшла до редакції 05.07.2017*