

АДАПТАЦІЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ  
КИЇВСЬКОГО РОДОВИЩА

© В.М. Шестопапов<sup>1</sup>, І.В. Сергієнко<sup>2</sup>, В.С. Дейнека<sup>2</sup>,  
Ю.Ф. Руденко<sup>1</sup>, М.В. Білоус<sup>2</sup>, А.Б. Марковська<sup>1</sup>, 2010

<sup>1</sup>Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України, Київ, Україна  
<sup>2</sup>Інститут кібернетики НАН України, Київ, Україна

Fresh groundwater resources take on strategic importance for drinking water supply under ever-worsening surface water quality. Efficient water resources management can be realized only by development of a complex of multi-scale hydrogeological models considering the influence of various technogenic and natural factors on the water-exchange geosystem. Using the Kyiv groundwater field as an example, it is demonstrated the possibility of estimating the groundwater exploitable resources with the implementation of supercomputer. Findings indicated the possibilities for significant increase of a share of fresh groundwater in the structure of centralized water supply for Kyiv. Further improvement of created models can facilitate maximal functional conformation between model and natural-anthropogenic conditions. And as a result, this will enable the most comprehensive estimation of groundwater resources.

**Keywords:** groundwater resources, Kyiv groundwater field, dynamics, information methods, supercomputer, finite elements method.

**Вступ.** Проблема забезпечення питною водою є однією з найактуальніших для України. Враховуючи незадовільну якість води у поверхневих водотоках, істотні затрати на її очищення і неможливість ефективного захисту від техногенних забруднень, стратегічного значення набувають пошук і використання підземних прісних вод для потреб населення.

Україна належить до держав, які мало забезпечені водними ресурсами (менше 1000 м<sup>3</sup>/рік на одного мешканця, тоді як ООН вважає достатнім цей показник на рівні 10–15 тис. м<sup>3</sup>/рік) [1]. Надійно захищені від забруднення підземні води є стратегічним ресурсом, оскільки за деяких надзвичайних ситуацій вони стають єдиним надійним джерелом питного водопостачання населення.

Щоб успішно розв'язати цю проблему, необхідно вивчити закономірності формування ресурсів підземних вод, вплив техногенних і природних чинників на їхні зміни.

Ті самі проблеми, що стосуються України взагалі, є важливими і для організації водопостачання м. Києва. Із затверджених експлуатаційних запасів підземних вод по Київському родовищу в розмірі 724 тис. м<sup>3</sup>/добу використовують лише 47 % і частка їх у водопостачанні населення постійно зменшується. Подачу підземних вод здійснюють не в усі райони міста, а це є неприйнятним з точки зору виникнення гіпотетичних надзвичайних ситуацій.

Ефективне управління водними ресурсами можливе тільки на базі створення регіональних і локальних гідрогеологічних моделей, що можуть враховувати вплив різноманітних техногенних та природних чинників безпосередньо на водообмінну геосистему.

Тому головна мета наших досліджень – підготовка різномасштабних апробованих на персональному комп'ютері моделей експлуатаційних ресурсів підземних вод території Київського родовища і окремих його фрагментів, а також їх вдосконалення за допомогою залучення і адаптації потужних сучасних інформаційних технологій аналізу на суперкомп'ютері серії СКІТ Інституту кібернетики НАН України.

Для досягнення мети досліджень дуже важливим було достеменно встановити міру оцінки ресурсів підземних вод Київської промислово-міської агломерації (КПМА) на раніше створених гідрогеологічних моделях.

Тестове та імітаційне моделювання показало, що схематизація природних умов на геофільтраційних моделях призводить до заниження підібраної інтенсивності інфільтраційного живлення підземних вод. Це пов'язане із суттєвою схематизацією фільтраційних параметрів водоносних горизонтів, а також граничних умов, що спричинює скорочення площ розвантаження підземних вод. Виходячи з цього, оцінка природних ресурсів підземних вод, яку виконували на дрібномасштабній гідрогеологічній

моделі, є заниженою і відображує їх мінімальну частину.

Отже, без створення великомасштабних моделей об'єкта досліджень або детальних моделей окремих його найбільш техногенно навантажених ділянок під час оцінки ресурсів підземної гідросфери виникають суттєві недоліки. По-перше, не враховуються реальні експлуатаційні ресурси підземних вод, а по-друге, і це найголовніше, під час вирішення міграційних завдань занижується кількість забруднювача (за його наявності), що потрапляє у підземні води.

**Результати досліджень.** Територія м. Києва і його околиць лежить на стику трьох орографічних областей: Придніпровської височини, Поліської і Придніпровської низовин. Межа між Поліською низовиною і Придніпровською височиною не завжди чітко орографічно виражена, часто її проводять по північній межі поширення лесів. Придніпровська височина і Придніпровська низина розділені високим (до 100 м) крутим правим берегом р. Дніпро.

Гідрографічна мережа на досліджуваній території досить густа – від 0,28 до 0,45 км/км<sup>2</sup>. Основна водна артерія – р. Дніпро з найбільшими притоками: на лівобережжі – р. Десна, на правобережжі – р. Ірпінь. У межах м. Києва є невеликі притоки – річки Либідь, Сирець, струмок Пляховий.

Територія, що аналізується, з геологічного погляду, лежить у межах південно-західного крила Дніпровсько-Донецької западини. У геологічній будові території беруть участь кристалічні породи і продукти їхньої руйнації, відклади палеозою (породи пермської системи), мезозою (породи тріасової, юрської, крейдяної систем), кайнозою (породи палеогенової і неогенової систем) і четвертинні [2].

Відповідно до геологічної будови, в межах території КПМА виділяють водоносні горизонти і комплекси, приурочені до четвертинних, олігоцен-пліоценових, еоценових, сеноман-келовейських, середньоюрських відкладів [2]. Схематизований гідрогеологічний розріз території досліджень, що був використаний для моделювання, представлений на рис. 1.

Найбільше практичне значення для організації централізованого водопостачання м. Києва мають водоносні горизонти сеноман-келовейських і середньоюрських (байоських) відкладів, що широко експлуатуються. З позиції формування їхнього якісного складу, велику роль відіграють водоносні горизонти, які живлять продуктивні (насамперед, перші від поверхні землі).

Перелічені водоносні горизонти розділені слабопроникними товщами, які представлені глинами, алевритами, мергелями різноманітної потужності (рис. 1).

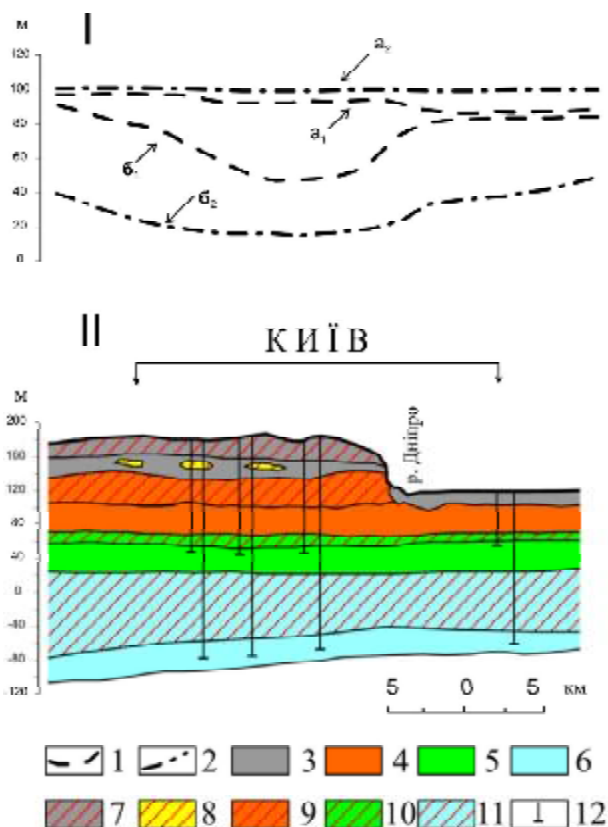


Рис. 1. Гідрогеологічний розріз території Київської промислово-міської агломерації: I – графіки п'єзометричних рівнів: 1 – сеноман-келовейського водоносного комплексу; а<sub>1</sub> – до початку експлуатації; б<sub>1</sub> – нинішній стан; 2 – середньоюрського водоносного горизонту: а<sub>2</sub> – до початку експлуатації; б<sub>2</sub> – нинішній стан; II – гідрогеологічний розріз; водоносні горизонти (комплекси): 3 – олігоцен-четвертинні відклади (піски, супісі), 4 – еоценові відклади (піски), 5 – сеноман-келовейські відклади (вапняки, крейда, пісок, пісковик, гравій), 6 – середньоюрські відклади (вапняки); слабопроникні відклади: 7 – четвертинні суглинки та глини, 8 – червоно-бурі глини неогену, 9 – київські (еоценові) мергелі, 10 – туронські мергелі, 11 – юрські глини та глинисті вапняки; 12 – свердловини Київського водозабору

При створенні регіональної моделі території досліджень так званого "Великого Києва" її просторові межі визначали за розміром депресійної воронки байоського водоносного горизонту і контролювали Остер-Золотоносним валом на сході і північному сході, Українським щитом – на заході, південному заході й півдні, межиріччям Прип'яті і Дніпра – на півночі. Отже, межі моделі були вибрані з урахуванням особливостей геолого-гідрогеологічної та геоморфологічної будови території. Для врахування безпосереднього контакту водоносних горизонтів в плані і розрізі була побудована карта їх гідравлічного взаємозв'язку. У зонах безпосереднього (прямого) гідравлічного взаємозв'язку водопровідність водоносних горизонтів підсумовували.

Під час схематизації досліджуваної території в розрізі враховували 4 водоносні горизонти (олі-

гоцен-пліоцен-четвертинний, еоценовий, сеноман-келовейський, байоський) зони активного та значного водообміну і 3 регіональні роздільні шари (київські мергелі, мергельно-крейдова товща, батські глини) між ними.

Нижче викладено основні висновки за результатами аналізу розв'язків обернених задач у природних і порушених умовах.

1. Природні ресурси території “Великого Києва”, що формуються внаслідок місцевого інфільтраційного живлення атмосферними опадами, одночасно є і ресурсами першого від земної поверхні водоносного горизонту, через який відбувається все інфільтраційне живлення інших нищезалягаючих горизонтів. Отримана на моделі його величина (у середньому близько 30 мм/рік) є балансовою, тобто неповною. Вона характеризує різницю живлення і розвантаження підземних вод у межах кожного блока сітки моделі та залежить від ступеня схематизації гідрогеологічних умов.
2. Регіональний розподіл п'езометричних максимумів і мінімумів напірних водоносних горизонтів, а також спрямованість руху підземних вод у плані значною мірою пов'язані з характером сучасної орогідрографії району. Напрямок регіонального латерального потоку – з боку найбільш піднятих у сучасному рельєфі структур (Український щит, Остер-Золотоноський вал) до регіональних зон розвантаження (р. Дніпро). Міра ідентичності п'езометричних поверхонь водоносних горизонтів і дзеркала ґрунтових вод залежить від глибини їх залягання, наявності і характеру слабкопроникних шарів. Для верхніх водоносних горизонтів міра ідентичності вища, для нижніх – менша.
3. Вертикальне перетікання між горизонтами – провідний чинник водообміну в межах території “Великого Києва”. Спрямованість вертикального водообміну між горизонтами визначається не лише літолого-структурними чинниками, а й орогідрографічними особливостями території. В межах вододільних просторів встановлено переважно низхідний рух підземних вод верхніх водоносних горизонтів у нижні; у долинах річок спостерігається зворотна картина, тобто розвантаження підземних вод нижніх водоносних горизонтів у верхні. Ця закономірність чітко фіксується у верхній гідродинамічній зоні, а в нижній (байоський водоносний горизонт) її встановлено не повсюдно. Відзначимо, що в межах долин річок Прип'ять і Дніпро всі водоносні горизонти розвантажуються у вищезалягаючі.
4. Поширені в межах “Великого Києва” регіональні слабкопроникні шари сприяють зменшенню інтенсивності вертикального водообміну з глибиною – у верхніх водоносних

горизонтах вона значно вища, ніж у нижніх. Один і той самий водоносний горизонт отримує максимум живлення на бортах Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну (межа з Українським щитом) і мінімум – у центральній, найбільш зануреній частині (у зв'язку із збільшенням потужностей і погіршенням фільтраційних властивостей роздільних шарів).

5. Територія “Великого Києва” слугує наочним прикладом гідрогеологічного об'єкта, на який впливає комплекс антропогенних чинників. Поява нових джерел формування водообміну (водозаборів, меліоративних систем, гідротехнічних споруд) визначила зміну структури водообміну, інтенсивності водообміну між водоносними горизонтами, а також між підземними і поверхневими водами. Найбільші зміни витратного режиму спостерігаються в олігоцен-пліоцен-четвертинному водоносному горизонті, а рівневого – у байоському.

У верхньому водоносному горизонті умови водообміну порушені впливом водних меліорацій, гідротехнічного будівництва і промислово-міських агломерацій.

В межах зрошувальних і осушувальних систем спостерігаються локальні максимуми і мінімуми рівневої поверхні ґрунтових вод, зумовлені інтенсивним техногенним живленням і дренажем.

Вплив гідротехнічного будівництва призвів до підпору ґрунтових вод на відстані 10–20 км від каскаду Дніпровських водосховищ і зміни умов їх розвантаження.

Втрати господарсько-питних і технічних вод на території промислово-міських агломерацій призвели до появи джерел техногенного живлення з інтенсивністю від 0,2 л/(с · км<sup>2</sup>) у селищах до 3,5 л/(с · км<sup>2</sup>) у м. Києві.

У водоносних горизонтах, що залягають нижче, зміни умов водообміну спричинені водовідбором підземних вод з господарсько-питною метою і, значно меншою мірою, наявністю гідротехнічних споруд (у зонах гідравлічних вікон). Водовідбір підземних вод призвів до розвитку регіональної депресійної воронки в байоському водоносному горизонті і локальних (практично дорівнюють міській території Києва) – у сеноман-келовейському і еоценовому. Сталась інтенсифікація (інколи на порядок і більше) перетікання між водоносними горизонтами.

6. Експлуатаційні ресурси підземних вод, які відбирають у межах території “Великого Києва”, становлять 634 тис. м<sup>3</sup>/добу. Вони формуються за рахунок природних, залучених, штучних ресурсів і ємнісних запасів.

У першому від земної поверхні водоносному горизонті внаслідок природної інфільтрації ат-

мосферних вод формується основна частина природних ресурсів, а в результаті перетоку поверхневих вод – залучених ресурсів. Тут же під впливом промислово-міських агломерацій, водних меліорацій формуються штучні (антропогенні) ресурси. У структурі водообміну беруть участь і ємнісні запаси, проте частина їх незначна.

У водоносних горизонтах, що залягають нижче, вертикальне перетікання через роздільні шари є основним чинником, що впливає на формування природних, залучених і експлуатаційних ресурсів підземних вод.

Для уточнення гідрогеологічних умов м. Києва була створена модель-врізка локального рівня, що практично збігалась із межами міста. На відміну від регіональної моделі (масштаб 1 : 500 000), масштаб моделювання був у 10 разів більшим і значно вищим був ступінь деталізації гідрогеологічних умов.

На границях площі, що моделювали (40×40 км), була задана гранична умова 1-го роду  $H = \text{const}$ , значення якої знімали з регіональної моделі КПМА.

Під час схематизації природних умов досліджуваної території було враховано 5 водоносних горизонтів зони інтенсивного та значного водообміну та 4 роздільні шари між ними.

Корегування розрахункових гідрогеологічних параметрів дало змогу отримати прийнятний збіг модельних і натурних рівнів підземних вод в усіх водоносних горизонтах. Інфільтраційне живлення в межах території, що досліджується, в середньому становило 107 мм/рік.

Створена гідрогеологічна модель локального рівня (масштаб 1 : 50 000) детальніше відображає природно-антропогенні умови Київського родовища підземних вод, а одержані на ній значення природних ресурсів можна оцінювати як наближені до можливих. Поза сумнівом, це дуже важливо з огляду на подальший розвиток водопостачання міста за рахунок підземних вод, а також прогнозування можливого забруднення водоносних горизонтів.

Виходячи з цього, на локальній моделі Київського родовища підземних вод було розглянуто можливість збільшення водопостачання міста за рахунок підземних вод. Можливі додаткові навантаження на “великі колодязі” і зумовлене цією обставиною зниження рівнів підземних вод сеноман-келовейського й байоського водоносних горизонтів відображено на рис. 2, 3. Додаткові зниження, що виникають, нижчі за гранично допустимі, за винятком ділянки Бортничі I–II, де ці значення збігаються.

Таким чином, додаткове водопостачання міста за рахунок захищених підземних вод є

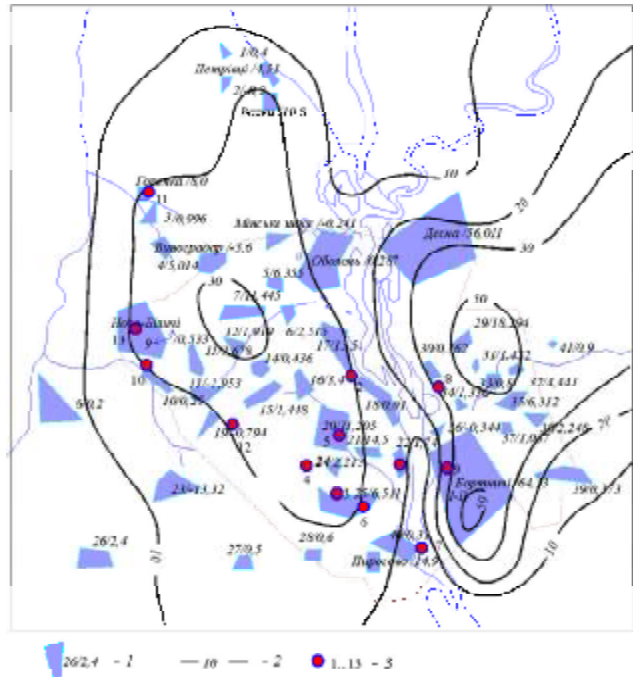


Рис. 2. Рекомендації щодо додаткового водовідбору по великих колодязях м. Києва у сеноман-келовейському водоносному горизонті: 1 – великий колодязь: перед коосою – його номер, за коосою – потенційно можливий додатковий водовідбір, тис. м<sup>3</sup>/добу; 2 – зниження, спричинене потенційно можливим додатковим водовідбором, м; 3 – насосні станції: 1 – буслівська; 2 – саперно-слобідська; 3 – голосіївська; 4 – горіхуватська; 5 – крутогірна; 6 – корчуватська; 7 – пирогово-чапайська; 8 – північний водопарк; 9 – південний водопарк; 10 – святошинська; 11 – пушводицька; 12 – микільсько-боршагівська; 13 – білицька

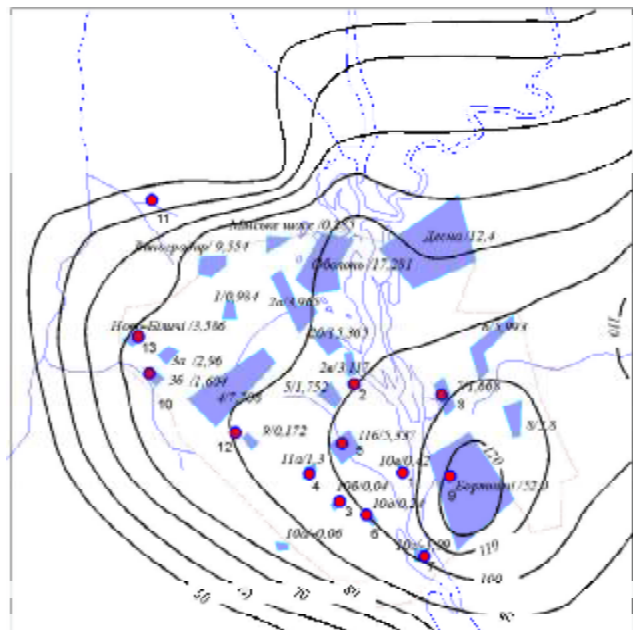


Рис. 3. Рекомендації щодо додаткового водовідбору по великих колодязях м. Києва у байоському водоносному горизонті. Умовні позначення див. на рис. 2

можливим. Їх резерв тільки для м. Києва на цей час становить близько 400 тис. м<sup>3</sup>/добу.

Нами розроблено спеціальний тест для визначення впливу детальності відображення граничних умов на моделі на величину підбраного інфільтраційного живлення. Моделювали одношарову однорідну товщу ( $km = 400$  мм<sup>2</sup>/сут). Крок на моделі послідовно дорівнював 250, 500, 1000, 2000 м. Площа моделі 256 км<sup>2</sup>.

За самої дрібної розбивки (64 × 64), варіант 1, були враховані: основна річка, її притоки I та II порядків, 3 болотні масиви (рис. 4). Болота задавали, як граничну умову 1-го роду,  $H = \text{const}$ , а річки – 3-го роду. При цьому питома проникність підруслових відкладів дорівнювала  $10^{-2}$  сут<sup>-1</sup>. Для отримання заданих априорі відносних позначок п'езометричних рівнів знадобилось задати середнє інфільтраційне живлення на рівні 188 мм/рік.

Варіант 2 тестового розв'язання передбачав дворазове збільшення кроку модельної сітки (32 × 32) без внесення будь-яких інших змін. Завдяки загрубленню модельної сітки скоротилась кількість річкових блоків і відбулось деяке їх просторове зміщення. При цьому для збігу розподілення рівнів підземних вод у процесі розв'язання варіантів 1 і 2 середнє інфільтраційне живлення було зменшене до 132 мм/рік.

Під час подальшого розрідження сітки (16 × 16) не задавали притоки II порядку і 2 болотні масиви (у північній частині моделі). Повного збігу рівнів підземних вод у варіантах 3 та 1 досягти не вдалося. Розходження спостерігались у блоках, де раніше були задані річки та болота, але воно не перевищувало 5%. При цьому середнє інфільтраційне живлення знизилось до 78 мм/рік.

У завершальному варіанті 4 (крок сітки 2 км, розбивка 8 × 8) на моделі відтворювали тільки основну річку. Реакція на зміну внутрішніх граничних умов була адекватною попередньому варіанту. Прийнятний збіг рішення з априорним розподілом рівнів був одержаний за величини  $W = 12$  мм/рік.

Таким чином, зміна масштабу моделювання, і як наслідок – зміна детальності відображення граничних умов, найсуттєвіше впливає на величину інфільтраційного живлення  $W$  (рис. 4).

У зв'язку з вищевикладеним подальше вдосконалення існуючих моделей (створення гідрогеологічних моделей детального рівня) сприятиме максимальній функціональній відповідності модельних і природних умов, а як результат – прийняттю виважених управлінських рішень.

Складні геологічні умови території, нерівномірність місць відбору підземних вод на різних глибинах, а також мережі річок є основними чинниками складної просторової динаміки підземних вод. Це потребує проведення комп'ютерного аналізу просторового руху вод у реальних

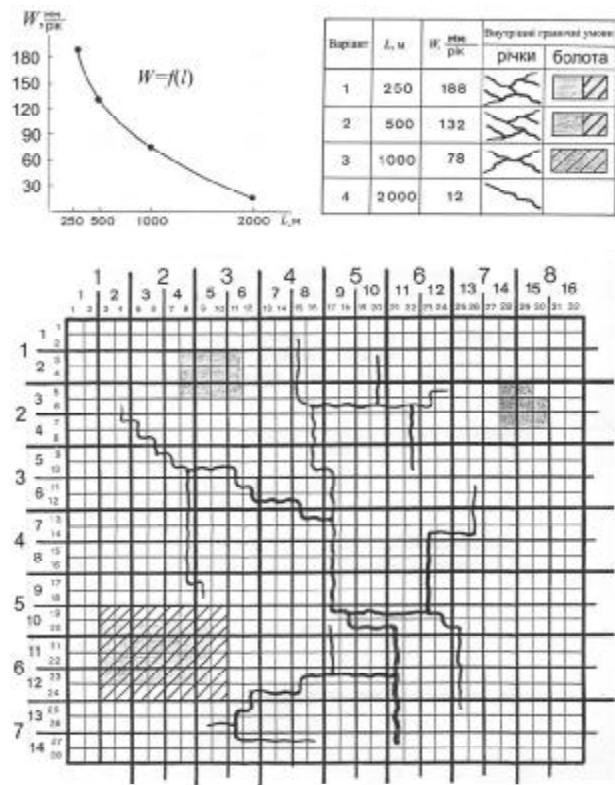


Рис. 4. Схема задання граничних умов і результати розв'язку тестової задачі

тривимірних гідрогеологічних товщах з довільно розміщеними у просторі слабкопроникними шарами.

Згідно з [3, 4], в окремих тривимірних складових  $\Omega_l$ ,  $l = 1, m$ , рух води в декартовій системі координат  $Ox_1, Ox_2, Ox_3$  з вертикальною вгору віссю  $Ox_3$  досить повно можна описати параболічними рівняннями

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + f, \quad (x, t) \in \Omega_{IT}, \quad (1)$$

де  $x = (x_1, x_2, x_3)$ ;  $\Omega_{IT} = \Omega(0, T)$ ,  $T$  – розрахунковий час;  $\mu$  – коефіцієнт водовіддачі;  $k$  – коефіцієнт фільтрації ізотропної складової  $\Omega_p$ ;  $f$  – потужність джерел чи стоків;  $h$  – п'езометричний напір.

Для поверхонь  $S_v$  ідеального контакту окремих складових  $\Omega_p, \Omega_q$  приймаємо, що п'езометричний напір і щільність потоку води є неперервними, а для тонких слабкопроникних шарів  $\bar{\gamma}_l$ , що розділяють деякі складові  $\Omega_p, \Omega_q$ , де товщина (потужність)  $\bar{\gamma}_l$  значно менша за характерні розміри складових  $\Omega_p$ , вважаємо справедливою умову перетоку

$$\begin{aligned} [q] &= 0, \quad (x, t) \in \gamma_{IT}, \\ \left\{ \sum_{i=1}^3 k \frac{\partial h}{\partial x_i} \cos(n, x_i) \right\}^{\pm} &= r[h], \quad (x, t) \in \gamma_{IT}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\gamma_{IT} = \gamma(0, T)$ ,  $n$  – орт нормалі до серединної поверхні  $\gamma_l$  шару  $\bar{\gamma}_l$ ;  $[q]$  – стрибок функції  $q$  на

поверхні  $\gamma_p$ ,  $r = \frac{\bar{k}_i}{d_i}$ ;  $\bar{k}$  – коефіцієнт фільтрації шару  $\bar{\gamma}_i$  товщини  $d_r$ .

Мережу річок урахуємо за призначенням крайових умов 3-го роду

$$\sum_{i=1}^3 k \frac{\partial h}{\partial x_i} \cos(n, x_i) = -\alpha h + \beta, \quad (x, t) \in \Gamma_{3T}, \quad (3)$$

де параметри  $\alpha$ ,  $\beta$  визначаємо за товщиною мулових відкладів і рівнем води у відповідних річках.

Вважаємо, що нижній розрахунковий водонесний горизонт розміщений на водоупорі, де відсутній перетік води:

$$\sum_{i=1}^3 k \frac{\partial h}{\partial x_i} \cos(n, x_i) = 0, \quad (x, t) \in \Gamma_{2T}^1. \quad (4)$$

На поверхні розрахункової просторової моделі задані опади

$$\sum_{i=1}^3 k \frac{\partial h}{\partial x_i} \cos(n, x_i) = v, \quad (x, t) \in \Gamma_{2T}^2. \quad (5)$$

На боковій вертикальній поверхні моделей за даними НІЩ РПД задані значення п'єзометричного напору на певних глибинах, тобто задані умови Діріхле:

$$h = \varphi, \quad (x, t) \in \Gamma_{1T}. \quad (6)$$

Умову 1-го роду (6) також задаємо у разі врахування заболочених місцевостей. Тут  $\Gamma_{1T} = \Gamma_1(0, T)$ .

Зауважимо, що оскільки аналіз динаміки підземних вод проводили для значного проміжку часу (1942–2002), за який змінювались мережа підземного водозабору, інтенсивність інфільтраційного живлення а також, було створено каскад штучних водосховищ по Дніпру тощо, складові  $\Gamma_i$ ,  $i=1, 3$ ,  $\Gamma_2 = \Gamma_2^1 \cup \Gamma_2^2$  всієї поверхні  $\Gamma$  розрахункового ґрунтового масиву є змінними. Змінними є і параметри  $f$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $v$ ,  $\varphi$ .

Для початкового розподілу п'єзометричного напору  $h = h(x, t)$  взята початкова умова

$$h = h_0, \quad x \in \Omega, \quad t = 0, \quad (7)$$

де  $h_0 = h_0(x)$  визначаємо як розв'язок задачі про усталену фільтрацію у досліджуваному складному просторі  $\Omega$  за умов відсутності інтенсивного використання підземних вод, що було характерним на кінець 1941 р. Для цього випадку усталену фільтрацію води описуємо еліптичним рівнянням

$$-\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = 0, \quad x \in \Omega, \quad (8)$$

крайовими умовами (3)–(5), умовами спряження (2) та умовами ідеального контакту на поверхнях  $S_v$ .

Отже, для аналізу усталеної просторової динаміки підземних вод у складному тривимірному просторі розв'язуємо стаціонарну задачу (8), (2)–

(5), а потім переходимо до комп'ютерного розв'язання початково-крайової задачі (1)–(7), що дає змогу аналізувати просторову динаміку підземних вод на значний проміжок часу.

Згідно з [5], замість крайової задачі (8), (2)–(5) доцільно розв'язувати відповідну слабку задачу, що полягає у знаходженні функції  $h(x) \in H$ , яка  $\forall v(x) \in H_0$  задовольняє рівність

$$a(h, v) = l(v), \quad (9)$$

або пошуку функції  $h(x) \in H$  з умови

$$\Phi(h) = \min_{z \in H} \Phi(z), \quad (10)$$

де

$$H = \{v(x) \in \bar{H} : v|_{\Gamma_1} = \varphi, [v]_s = 0\},$$

$$H_0 = \{v(x) \in \bar{H} : v|_{\Gamma_1} = 0, [v]_s = 0\},$$

$$S = \cup_v S_v,$$

$$\bar{H} = \{v(x) : v|_{\Omega_i} \in W_2^1(\Omega_i), i = \overline{1, m}\},$$

$$a(h, v) = \int_{\Omega} \sum_{i=1}^3 k \frac{\partial h}{\partial x_i} \frac{\partial v}{\partial x_i} dx + \int_{\gamma} r[h][v] d\gamma + \int_{\Gamma_3} \beta v d\Gamma_3,$$

$$l(v) = \int_{\Omega} f v dx + \int_{\Gamma_2^1} v v d\Gamma_2^1 + \int_{\Gamma_2^2} \beta v d\Gamma_3.$$

Згідно з [5], легко показати, що задачі (9), (10) – еквівалентні. Їх розв'язок існує і єдиний в  $H$ .

Наближений розв'язок однієї із задач (9), (10) за допомогою методу скінченних елементів шукаємо у множині  $H_k^N$  у вигляді

$$h_k^N(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi_i(x) + W(x), \quad (11)$$

де  $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^m$  – базис методу скінченних елементів простору  $H_{k_0}^N$  функцій, що на кожному пірамідальному скінченному елементі  $\bar{e}_i$  ( $\Omega = \cup_{i=1}^m \Omega_i$ ,  $\bar{\Omega} = \cup_{i=1}^m \bar{e}_i$ ) розбиття області  $\bar{\Omega}$  є повними поліномами степеня  $k$ . Функцію  $W(x)$  визначаємо за [5], вона залежить від головних крайових умов.

Для наближеного узагальненого розв'язку  $h_k^N(x)$  вигляду (11) крайової задачі (8), (2)–(5) використано оцінку

$$\|h - h_k^N\|_{W_2^1} \leq c d^k, \quad (12)$$

де  $d$  – максимальний діаметр скінченних елементів  $e_i$  розбиття області  $\bar{\Omega}$ .

Розв'язавши чисельно задачу про усталений рух підземних вод, характерний на кінець 1941 р. у КПМА, переходимо до комп'ютерного аналізу неусталеного руху вод у тому самому просторі, тобто до комп'ютерного розв'язування початково-крайової задачі (1)–(7).

Для цього задачу (1)–(7) запишемо у слабкій формі, тобто шукаємо функцію  $h(x, t) \in W(0, T)$  таку, що  $\forall v(x) \in H_0$  задовольняє рівності

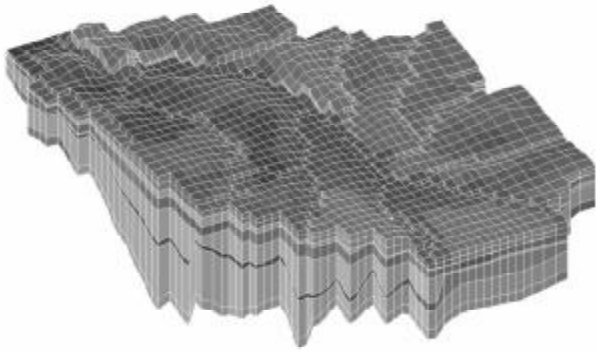


Рис. 5. Модельна структура розрахункової області (стиснена у площині  $XU$  в 100 разів)

$$\left( \eta \frac{\partial h}{\partial t}, v \right) + a(h, v) = l(v), \quad t \in (0, T), \quad (13)$$

$$(h, v)(0) = (h_0, v), \quad (14)$$

де форми  $a(\cdot, \cdot)$ ,  $l(\cdot)$  визначені вище;

$$W(0, T) = L^2(0, T; V),$$

$$V = \{v(x, t) \in \bar{V} : v|_{\Gamma_{lr}} = \varphi, [v]|_{s_r} = 0\},$$

$$\bar{V} = \{v(x, t) : v|_{\Omega_l} \in W_2^1(\Omega_l), l = \overline{1, m}, t \in (0, T)\}.$$

Згідно з [6], легко довести існування та єдиність розв'язку  $h(x, t)$  задачі (13), (14).

Наближений розв'язок  $h_k^N(x, t)$  задачі (13), (14) шукаємо за допомогою методу скінченних елементів у вигляді (11), де  $\alpha_i = \alpha_i(t)$ ,  $W = W(x, t)$ . Проміжну задачу Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку розв'язуємо чисельно за допомогою різницевої схеми Кранка–Ніколсона. Для наближеного розв'язку  $h_k^N(x, t)$  за умови достатньої гладкості розв'язку  $h(x, t)$  задачі (13), (14) на підобластях  $\Omega_{IT} = \Omega(0, T)$  є оцінка

$$\|h - h_k^N\|_{W_2^1 \times L_2} \leq c d^k.$$

Зазначені алгоритми методу скінченних елементів з використанням класів розривних за просторовими змінними кусково-поліноміальних функцій складають основу створеної експериментальної інформаційної технології FILTR3D аналізу за допомогою суперкомп'ютерів СКІТ усталеного та неусталеного просторового руху вод у складній просторовій гідрогеологічній структурі великих розмірів.

Розрахункова гідрогеологічна модель КПМА схематично зображена на рис. 5. Розміри моделі в площині  $XU$  – 188 000 × 248 000 м, максимальний перепад висоти вздовж осі  $Z$  – 775 м. Варіант використання у розрахунках головних річок у межах м. Києва та їхніх приток I та II порядку зображено на рис. 6 (прямокутниками позначені фрагменти відповідної планово-просторової математичної моделі з усередненими потужностями відповідних складових досліджуваної гідрогеологічної структури, що побудовані авторами від НІЦ РПД

НАН України). За допомогою вказаних фрагментально потужностей складових відтворена просторова шаруватість масиву КПМА, яка використана в розрахунках.

Інформаційна технологія, що розглядається, функціонує на двомашинному комплексі PENTIUM – суперкомп'ютер СКІТ.

Реалізація скінченно-елементних алгоритмів для аналізу усталеного та неусталеного просторового руху вод у складному тривимірному багатокомпонентному гідрогеологічному середовищі у відповідності до запропонованих обчислювальних алгоритмів, що є проблемною основою створеного експериментального комплексу FILTR3D, передбачає виконання таких кроків:

- створення багатокомпонентних (відповідно до кількості складових тіла) геометричних моделей з розрізами;
- задання параметрів і генерування скінченно-елементного розбиття складної просторової області;
- виконання процедури перенумерації вузлів отриманої сіткової скінченно-елементної моделі складного просторового багатокомпонентного об'єкта з розрізами;
- задання типу розв'язуваної математичної задачі, що є математичною моделлю усталеного чи неусталеного руху вод у складному просторовому гідрогеологічному середовищі;
- виконання процедури задання фізичних характеристик (коефіцієнтів фільтрації, коефіцієнтів

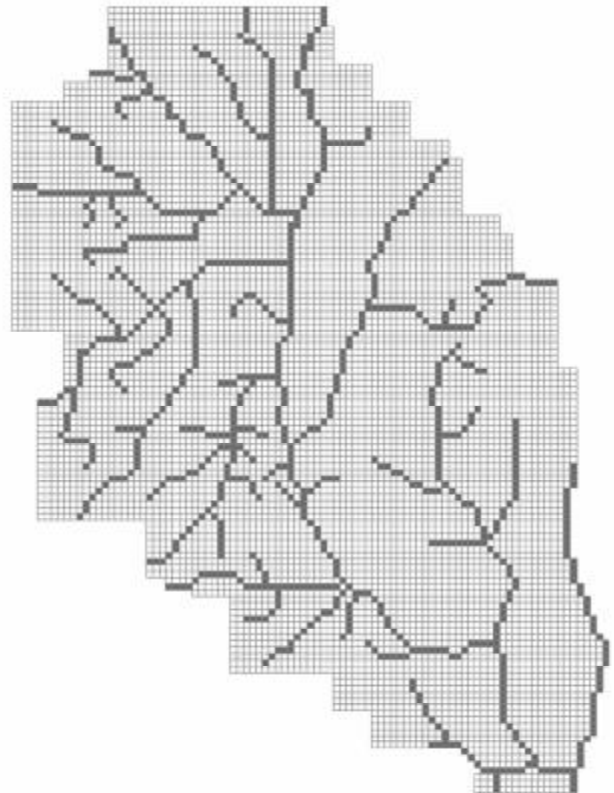


Рис. 6. Мережа головних річок та їх приток. Київський регіон

- вологоємності, потужностей стоків – потужностей свердловин) за всіма складовими просторового багатокомпонентного середовища;
- задання параметрів шарів;
- задання типів крайових умов за складовими поверхні просторового середовища;
- відпрацювання алгоритмів побудови системи лінійних алгебричних рівнянь методу скінченних елементів;
- відпрацювання алгоритмів урахування крайових умов;
- відпрацювання алгоритмів урахування умов спряження;
- відпрацювання алгоритмів урахування водовідбору з водоносних горизонтів досліджуваного середовища;
- комп'ютерне розв'язання систем лінійних алгебричних рівнянь великих розмірів;
- відпрацювання алгоритмів обробки результатів розрахунку та генерування звітів.

Вище зазначено, що усталений та неусталений рух вод у реальному просторовому багатокомпонентному гідрогеологічному середовищі повністю залежить від проникності складових самого середовища, внутрішнього та зовнішніх впливів і це є характерним для гідрогеологічних умов різних регіонів України. Необхідність урахувати реальну багатокомпонентність і просторовість для різних умов потребує створення потужного програмно-алгоритмічного забезпечення опису складних просторових об'єктів, створення спеціалізованого інструментарію зручного задання фізичних характеристик окремих складових просторових середовищ. У разі використання методу скінченних елементів (МСЕ) необхідним також є створення інструментарію генерації сітки скінченних елементів на основі опису багатокомпонентного об'єкта та аналізу її якості, реалізація алгоритмів побудови та розв'язання систем лінійних алгебричних рівнянь МСЕ.

Створене експериментальне програмно-алгоритмічне забезпечення FILTR3D функціонує як об'єднання деяких підсистем, що оперують великими обсягами даних різного характеру та реалізують такі функції:

- створення геометричної моделі, що є описом просторового багатокомпонентного досліджуваного об'єкта;
- задання фізичних характеристик складових досліджуваного середовища;
- виконання скінченно-елементного зображення багатокомпонентного об'єкта;
- виконання процедури оснащення скінченно-елементної моделі багатокомпонентного об'єкта його фізичними характеристиками;
- виконання процедури оснащення скінченно-елементної моделі досліджуваного середовища даними зовнішніх і внутрішніх впливів;

- формування та розв'язання систем алгебричних рівнянь МСЕ;
- обробка результатів розрахунку.

Функціонування окремих підсистем програмно-алгоритмічного комплексу FILTR3D слід розглядати як функціонування послідовності етапів у процесі аналізу за допомогою методу скінченних елементів динаміки підземних вод у складному багатокомпонентному об'єкті.

Програмна реалізація зазначених підсистем як самостійних дає змогу модернізувати таке програмно-алгоритмічне забезпечення з метою розширення можливостей комплексу у напрямі як ускладнення досліджуваних середовищ, так і розширення класів фізичних задач (досліджуваних процесів) і підвищення точності розрахункових алгоритмів.

Якщо обчислювальних потужностей ПЕОМ класу Pentium недостатньо для породження та розв'язання системи (систем) алгебричних рівнянь МСЕ, а це, як правило, трапляється під час комп'ютерного розв'язання просторових задач, для реалізації цієї функції використовують суперкомп'ютер серії СКІТ Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.

Гідрогеологічну модель КПМА на суперкомп'ютері серії СКІТ відтворювали у декілька етапів.

Спочатку була реалізована тривимірна регіональна модель КПМА із застосуванням методу скінченних елементів з кроком розбиття близько 5 км.

Після цього центральну частину моделі, яка вивчена досконаліше з гідрогеологічної позиції, було детальніше розбито на розрахункові елементи, що дало змогу скоригувати гідрогеологічні параметри і граничні умови у плані і розрізі. Задачу розв'язували у стаціонарних і нестаціонарних умовах. Отримані на ПК і суперкомп'ютері СКІТ дані щодо рівнів підземних вод поверхневої системи водоносних горизонтів порівнювали з існуючими режимними спостереженнями.

На рис. 7 показано розподіл п'єзометричних напорів у байоському водоносному горизонті на початок 1942 р. і на кінець 2002 р.

Було отримано прийнятний збіг природних і модельних рівнів, з точки зору завдань, що вирішували на цьому етапі досліджень.

І, нарешті, остання розробка була пов'язана з питанням повноти оцінки ресурсів підземних вод. Річ у тім, що програмне забезпечення PM WIN, яке використовують у НІЦ РПД, має обмеження щодо кількості розрахункових блоків моделі. Тому реалізація розбиття території КПМА на блоки розміром, наприклад,  $1 \times 1$  км практично неможлива. Звідси випливає неможливість відображення граничних умов і гідрогеологічних параметрів з такою детальністю, яка необхідна для повноти врахування експлуатаційних ресурсів підземних вод.



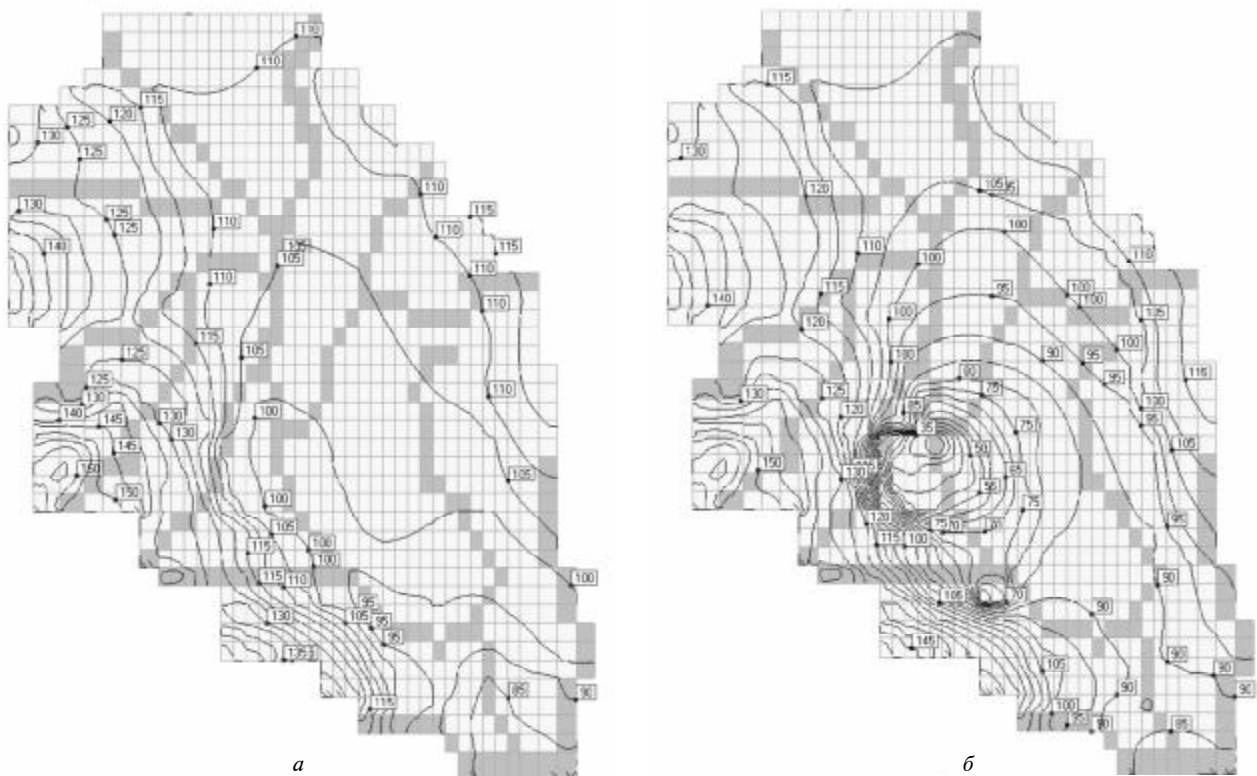


Рис. 7. Розподіл п'єзометричних напорів у байоському водоносному горизонті на початок 1942 р. (а) і на кінець 2002 р. (б). Київський регіон

Для вирішення цього питання у тестовому режимі на суперкомп'ютері СКІТ було послідовно відтворено декілька варіантів відображення граничних умов та фільтраційного живлення на території досліджень з різною деталістністю.

Передусім була реалізована дрібномасштабна модель Київського родовища підземних вод (крок розбиття близько 5 км) з "базовим" інфільтраційним живленням (30 мм/рік). Другий крок досліджень був пов'язаний з деталізацією розбиття області фільтрації (2 × 2 км) і, як наслідок, з детальнішим відображенням граничних умов. Інфільтраційне живлення не змінювали порівняно з варіантом 1 тестового моделювання. У подальшому (3 і 4 варіанти тестів) за збереження розбиття області фільтрації 2 × 2 км вивчали вплив інфільтраційного живлення, що підвищували у 2 і 4 рази відповідно до "базового", на зміну гідрогеологічних умов.

Порівняння отриманих результатів з контрольними даними показало, що за детального моделювання можна збільшити інфільтраційне живлення на моделі, наблизивши його до реальних значень у природі. Це приведе до збільшення експлуатаційних ресурсів підземних вод продуктивних водоносних горизонтів. Оцінені потенційні додаткові ресурси підземних вод становлять 800 тис. м<sup>3</sup>/добу, що дуже важливо для перспектив водопостачання КПМА захищеними підземними водами.

**Висновки.** За результатами проведених досліджень можна зробити такі основні висновки.

1. Розроблені раніше в НІЦ РПД НАН України гідрогеологічні моделі регіонального (масштаб 1 : 500 000) і локального (масштаб 1 : 50 000)

рівнів території КПМА відповідали певним цільовим завданням, але не повністю віддзеркалювали природні умови об'єкта і в першу чергу інфільтраційне живлення. Адаптація наявних і додатково залучених гідрогеологічних даних і реалізація моделей на суперкомп'ютері серії СКІТ дали змогу уникнути двох традиційних недоліків, що виникають за дрібно- і середньомасштабного моделювання. Це заниження реальних експлуатаційних ресурсів підземних вод і недооцінка можливого забруднення останніх.

- Ефективне управління водними ресурсами можливе тільки на базі створення комплексу гідрогеологічних моделей різного рівня деталістності, що можуть урахувувати вплив різноманітних техногенних і природних чинників безпосередньо на водообмінну геосистему.
- Згідно з тестовим і імітаційним моделюванням, загрублення природних умов на геофільтраційних моделях призводить до заниження інфільтраційного живлення підземних вод, що підбирається. Це пов'язане із суттєвою схематизацією граничних умов і фільтраційних параметрів водоносних горизонтів. Виходячи з цього, оцінка природних ресурсів підземних вод, виконана на дрібномасштабній гідрогеологічній моделі, є заниженою і її можна розглядати як мінімальну їх частину.
- Сформований нині водовідбір і рівневий режим у системі поверхнево залягаючих водоносних горизонтів території м. Києва дає змогу розглянути питання щодо збільшення експлуатації підземних вод з метою централі-

зованого водопостачання населення столиці України до 724 тис. м<sup>3</sup>/добу, що були затверджені за промисловими категоріями.

Розвивати додаткове водопостачання міста Києва за рахунок підземних вод можна, якщо розмішувати проектні водозабори на схід і північний схід від міста. Виявлений там мінімальний їх резерв становить 800 тис. м<sup>3</sup>/добу.

Подальше вдосконалення існуючих моделей (створення гідрогеологічних моделей детального рівня сумісно з фахівцями Інституту кібернетики НАН України на суперкомп'ютері СКІТ) сприятиме максимальній функціональній відповідності модельних і природних умов і як результат – найповнішій оцінці ресурсів підземних вод.

*Дослідження виконано за фінансової підтримки Національної академії наук України (інноваційний проект № 7.1).*

1. Шестопалов В., Лялько В., Гудзенко В. та ін. Підземні води як стратегічний ресурс // Вісн. НАН України. – 2005. – № 5. – С. 32–39.
2. *Формирование* эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины / А.Е. Бабинец, Б.В. Боровский, В.М. Шестопалов и др. – Киев: Наук. думка, 1979. – 216 с.
3. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1971. – 451 с.
4. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 980 с.
5. Дейнека В.С., Сергиенко И.В. Модели и методы решения задач в неоднородных средах. – Киев: Наук. думка, 2001. – 606 с.
6. Дейнека В.С., Сергиенко И.В. Анализ многокомпонентных распределенных систем и оптимальное управление. – Киев: Наук. думка, 2007. – 703 с.

*Надійшла до редакції 18.05.2010 р.*

*В.М. Шестопалов, І.В. Сергієнко, В.С. Дейнека, Ю.Ф. Руденко, М.В. Білоус, А.Б. Марковська*

#### **АДАПТАЦІЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ КИЇВСЬКОГО РОДОВИЩА**

Ресурси прісних підземних вод набувають стратегічного значення для питного водопостачання населення в умовах погіршення якості поверхневих вод. Ефективне управління водними ресурсами можливо тільки на основі створення комплексу різномасштабних гідрогеологічних моделей, що враховують вплив різноманітних техногенних і природних чинників на водообмінну геосистему. На прикладі Київського родовища підземних вод показано можливість оцінки експлуатаційних ресурсів підземних вод із застосуванням суперкомп'ютера. Виконані дослідження показали можливість значного збільшення частки прісних підземних вод в організації централізованого водопостачання м. Києва. Подальше вдосконалення створених моделей сприятиме досягненню максимальної функціональної відповідності модельних і природно-антропогенних умов, а як результат – найповнішій оцінці ресурсів підземних вод.

**Ключові слова:** ресурси підземних вод, Київське родовище, динаміка, інформаційні технології, суперкомп'ютер, метод скінченних елементів.

*В.М. Шестопалов, И.В. Сергиенко, В.С. Дейнека, Ю.Ф. Руденко, М.В. Белоус, А.Б. Марковская*

#### **АДАПТАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ КИЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Ресурсы пресных подземных вод приобретают стратегическое значение для питьевого водоснабжения населения в условиях все ухудшающегося качества поверхностных вод. Эффективное управление водными ресурсами возможно только на базе создания комплекса разномасштабных гидрогеологических моделей, учитывающих влияние разнообразных техногенных и природных факторов на водообменную геосистему. На примере Киевского месторождения подземных вод показана возможность оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод с применением суперкомпьютера. Выполненные проработки показали возможность значительного увеличения доли пресных подземных вод в организации централизованного водоснабжения г. Киева. Дальнейшее совершенствование созданных моделей будет содействовать достижению максимального функционального соответствия модельных и природно-антропогенных условий, а как результат – наиболее полной оценке ресурсов подземных вод.

**Ключевые слова:** ресурсы подземных вод, Киевское месторождение, динамика, информационные технологии, суперкомпьютер, метод конечных элементов.