

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240101>
УДК 556.048.382(477-25)

Ю.Ф. РУДЕНКО¹, В.М. ШЕСТОПАЛОВ¹, Ю.О. НЕГОДА^{2*}, О.В. ГУРАЛЬ¹

¹ Державна установа «Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України», Київ, Україна
E-mail: rud@hydrosafe.kiev.ua

² Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна
E-mail: negoda@nas.gov.ua

* Автор для кореспонденції

ЩОДО ПИТАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЗАПАСІВ ПИТНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД ДЛЯ ВОДОПОСТАЧАННЯ м. КИЇВ

Вплив техногенного навантаження в межах Київського родовища питних підземних вод призвів до деформації структури та характеру водообміну. Основними антропогенними чинниками, що впливають на водообмін, є водозабори підземних вод, водосховища, промислово-міські агломерації. Нами проведено критичний аналіз попередніх гідрогеологічних моделей досліджуваного родовища, враховано їх недоліки та використано найбільш реалістичні рішення. Створено нову сучасну гідрогеологічну модель території досліджень. Виконано імітаційне моделювання для визначення впливу зміни гідрогеологічних параметрів на положення рівнів підземних вод. Розв'язання епігнозних задач дозволило уточнити значення коефіцієнтів водопровідності обводнених порід, питомої проникності роздільних шарів, інфільтраційного живлення, довести функціональну відповідність створеної моделі природно-антропогенним умовам. Виконано переоцінку експлуатаційних запасів питних підземних вод по м. Київ відповідно до сучасної заявки ПрАТ «АК «Київводоканал» та показано потенціал їх можливого водовідбору. Підраховані методом математичного моделювання запаси були захищені в ДКЗ України.

Ключові слова: Київське родовище питних підземних вод; гідрогеологічна модель; експлуатаційні запаси; гідрогеологічні умови; прогноз.

Вступ

Проблема забезпечення питною водою високої якості є однією з найактуальніших для України в цілому і для Києва зокрема. Враховуючи незадовільну якість води у поверхневих водотоках, істотні затрати на її очищення і

неможливість ефективного захисту від техногенних забруднень, важливого значення набуває використання підземних вод для потреб населення.

Україна належить до держав, які мало забезпечені водними ресурсами (близько 1500 м³/рік на одного мешканця, тоді як ООН вважає

Цитування: Руденко Ю.Ф., Шестопапов В.М., Негода Ю.О., Гураль О.В. Щодо питання раціонального використання експлуатаційних запасів питних підземних вод для водопостачання м. Київ. *Геологічний журнал*. 2021. № 4 (377). С. 29—55. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240101>

Citation: Rudenko, Yu.F., Shestopalov, V.M., Negoda, Iu.O., Gural, O.V. (2021). On the rational use of exploitable drinking groundwater reserves for water supply to the city of Kyiv. *Geologičnij žurnal*, 4 (377), 29-55. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240101>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2021. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2021. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

достатнім цей показник на рівні 10—15 тис. м³/рік). Захищені від забруднення підземні води є стратегічним ресурсом, оскільки за деяких надзвичайних ситуацій вони стають єдиним надійним джерелом питного водопостачання населення.

Щоб успішно вирішити цю проблему, необхідно вивчити закономірності формування ресурсів підземних вод, вплив техногенних і природних чинників на їхні зміни. Ефективне управління водними ресурсами можливе тільки на базі створення регіональних та локальних гідрогеологічних моделей, що враховують вплив різноманітних техногенних та природних чинників безпосередньо на водообмінну геосистему.

Київська промислово-міська агломерація (КПМА) має складну геологічну і гідрогеологічну будову з певними особливостями розподілу фільтраційних параметрів водоносних горизонтів, складними взаємозв'язками суміжних горизонтів, неоднорідним хімічним складом підземних вод, порушенням їх рівневим і гідрохімічним режимами. Переоцінку експлуатаційних запасів підземних вод КПМА з урахуванням численних гідравлічно взаємопов'язаних між собою водоносних горизонтів (комплексів) і впливу техногенних факторів доцільно виконувати з використанням методу математичного моделювання. Сучасні програмні засоби для моделювання дозволяють більш детально враховувати джерела формування експлуатаційних ресурсів підземних вод і підвищувати вірогідність їх визначення.

Геологічна будова і гідрогеологічні умови Київського родовища підземних вод

Територія м. Київ та його околиць розташована на стику трьох орографічних областей: Придніпровської височини, Поліської і Придніпровської низовин. Межа між Поліською низовиною і Придніпровською височиною не завжди чітко орографічно виражена і часто проводиться по північній границі поширення лесів. Придніпровська височина і Придніпровська низовина розділяються високим (до 100 м) крутим правим берегом р. Дніпро.

Центральна і південно-західна частини міста знаходяться в межах Придніпровської висо-

чини (170—197 м), плавно нахиленої на захід, на поверхні складеної породами лесової формації. Найбільш підняті її місця приурочені до позначок від 170—175 м (м. Вишгород, Лук'янівка у Києві) до 190—198 м (Батієва гора, Печерськ, Звіринець). Вони відрізняються глибоким і густим ерозійним розчленуванням з глибиною врізу ерозійних форм понад 80 м.

Північна і північно-західна частини міста розташовані в межах Поліської низовини та являють собою слабо горбисту моренно-зандрову рівнину. Поверхня її характеризується позначками 140—190 м, невеликим горизонтальним і вертикальним розчленуванням.

Східна (лівобережна) частина знаходиться в межах Придніпровської низовини, що являє собою акумулятивну алювіальну рівнину, ускладнену серією різновікових накладених або притулених алювіальних терас. Яружно-балкова мережа розвинена слабо. Абсолютні позначки коливаються від 100 до 140 м.

Гідрографічна мережа на досліджуваній території досить густа — від 0,28 до 0,45 км/км². Основна водна артерія — р. Дніпро з найбільшими притоками: на лівобережжі — р. Десна і на правобережжі — р. Ірпінь. У межах Києва є більш малі притоки — річки Либідь, Сирець, струмок Пляховий. Ухили водної поверхні річок невеликі — від 0,001—0,0015 на р. Дніпро до 0,0055—0,012 на малих річках. Швидкість течії в межах становить 0,1—0,7 м/с, середньорічні модулі стоку — 2,5—3,5 дм³/с · км². Річки рівнинні, із живленням за рахунок атмосферних опадів при участі підземних вод. Період повені зазвичай займає березень—квітень. Літня межень встановлюється в серпні—вересні, зимова — у грудні—січні.

Територія Київського родовища підземних вод знаходиться в зоні зчленування Українського щита (УЩ) і Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) (Ковальов та ін., 2001). Її західна частина характеризується відносно неглибоким заляганням кристалічних порід докембрію, а в східній спостерігається досить потужна товща осадових утворень мезозою і кайнозою. Осадові утворення повторюють поверхню кристалічного фундаменту та мають тенденцію до заглиблення на північний схід і збільшення потужності і глибини залягання покрівлі стратиграфічних горизонтів, які задіяні в геологічній будові території, що розглядається.

Відповідно до чинного гідрогеологічного районування територія Київського родовища підземних вод розташована в північно-західній частині Дніпровського артезіанського басейну (ДАБ).

Згідно з геологічною будовою і гідрогеологічними умовами на території Київського родовища виділяються водоносні горизонти і комплекси, приурочені до четвертинних, неогенових, палеогенових, крейдових, юрських, тріасових та докембрійських відкладів. Всього виділено 12 водоносних горизонтів та комплексів (Расовський, 2005). Розділяють їх між собою водотривкі товщі, що відносяться до елювіальних та еолово-делювіальних відкладів еоплейстоцену—нижнього неоплейстоцену; строкатих і червоно-бурих глин міоцену—пліоцену; мергелів та глин київської та обухівської світ еоцену; глин нижньої частини канівської серії еоцену і щільної крейди та мергелів верхньої крейди; глин і алевритів підлужної, ніжинської та ічнянської світ середньої юри, а також сребрянської світи нижнього тріасу. Основні водоносні горизонти (комплекси), які використовуються для господарсько-питного водозабезпечення населення м. Київ та відомчих підприємств, приурочені до крейдових та юрських відкладів.

Водоносний комплекс у відкладах іваницької світи середньої-верхньої юри і загорівської, журавинської та буримської світ нижньої-верхньої крейди (сеноман-келовейський) широко розповсюджений в межах території, що досліджується. Водовмісні породи складені морськими піщано-глинистими нижньосеноманськими відкладами, зверху представленими тонко- і дрібнозернистими пісками потужністю 15,0 м, а знизу — пісками різнозернистими, місцями гравелистими, із стяжіннями кремнів, лінзами пісковиків, часто окремених потужністю від 1,5 до 5,0 м. Коефіцієнт фільтрації пісків нижньої товщі становить 10—35 м/добу.

В покрівлі комплексу, що характеризується, залягають водотривкі відклади верхньої крейди, потужність яких змінюється від 3,0—5,0 м у західній частині території до 45,0—55,0 м у східній. В південно-західній частині території, в місцях розмивання верхньокрейдого водотриву, сеноманські та еоценові відклади утворюють єдиний водоносний горизонт. Підшо-

вою комплексу є водотривкі відклади готеривсько-баремського ярусу нижньої крейди і глини та алеврити середньої-верхньої юри, потужність яких сягає 80—100 м. Глибина залягання комплексу коливається від 65,0 м (19-й км Житомирського шосе) до 148,5 м (район Національного виставкового центру). Води горизонту напірні. Висота напору в непорушених умовах становить 80,0—90,0 м.

В результаті експлуатації рівні водоносного комплексу знизились на 30,0—50,0 м. Але зараз відбувається їх значне відновлення (на 10—15 м), що пов'язано із суттєвим зменшенням водовідбору.

Свердловини, які експлуатують цей водоносний комплекс, мають дебіти 0,15—24,0 дм³/с при відповідних зниженнях 2,9 і 7,1 м. Питомі дебіти змінюються від 0,03 дм³/с·м (Софіївська Борщагівка) до 5,6 дм³/с·м (Оболонь). Загальна водопровідність порід коливається від 50 м²/добу і менше на південному заході і заході території до 500 м²/добу на північному сході, в середньому 200—300 м²/добу.

Води комплексу за хімічним складом відносяться до гідрокарбонатних кальцієвих, гідрокарбонатних кальцієво-магнієвих і мають мінералізацію 0,2—0,6 г/дм³. За значеннями рН 6,6—7,9 води нейтральні або слаболужні. Забруднюючі компоненти у воді відсутні. В бактеріологічному відношенні води відповідають вимогам ДСанПіНу 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Вміст важких металів у воді не перевищує граничних концентрацій.

Живлення водоносного комплексу на всій площі його поширення здійснюється внаслідок перетікання із еоценових відкладів, які залягають вище по розрізу. В непорушеному стані розвантаження водоносного комплексу відбувалося в долині р. Дніпро. В результаті утворення в межах Києва великих депресійних воронко і створення Київського водосховища відчутно змінилися умови живлення і розвантаження водоносного комплексу. В даний час р. Дніпро із області розвантаження підземних вод перетворилася в область їх живлення, а основне розвантаження водоносного комплексу здійснюється в межах діючих водозаборів. Річка Дніпро в межах Києва перетворилася в штучний вододіл між правобережною і лівобережною групами водозаборів. Через відсут-

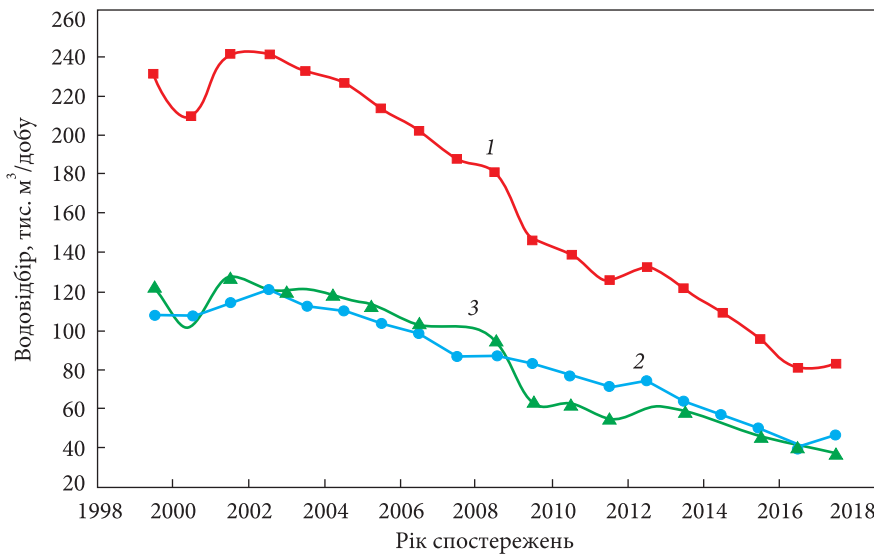


Рис. 1. Графік зміни водовідбору із свердловин Київського родовища підземних вод за 1999—2017 рр.: 1 — загальний водовідбір по родовищу; 2 — водовідбір з водоносного горизонту середньюрських відкладів; 3 — водовідбір з водоносного комплексу сеноман-келовейських відкладів

Fig. 1. Graph showing changes in groundwater withdrawal from wells in the Kyiv groundwater field for 1999-2017: 1 — general water withdrawal on the field; 2 — water withdrawal from the aquifer of Middle Jurassic sediments; 3 — water withdrawal from the aquifer complex of Cenomanian-Callovian sediments

ність в долині р. Дніпро водотривких відкладів еоцену і створення підпору від Київського водосховища останнє стало додатковим джерелом живлення водоносного комплексу, що розглядається.

Водоносний горизонт у відкладах орельської світи середньої юри (байоський) має широке розповсюдження. Він відсутній тільки в західній, південно-західній і північній частинах території м. Київ, а також частково у центральній частині, в місцях розвитку ерозійно-тектонічних останців, складених строкатими відкладами тріасових порід. Водовмісні породи представлені континентальними алювіальними утвореннями, для яких характерне ритмічне чергування піщаних і глинистих відкладів.

Найбільш грубозернисті і гравійні різновиди пісків, місцями з підпорядкованими їм гравійними і гальковими шарами, приурочені до основи алювіальної товщі і відповідають базальному горизонту. Вище по розрізу вони змінюються дрібно- і середньозернистими пісками (фація руслового алювію), найбільш поширеними як по площі, так і в розрізі. Верхні шари алювіальних осадів (заплавні і старичні фації) представлені глинистими, алевритовими і вуглестими дрібно- і тонкозернистими пісками. Свердловинами розкривається від двох до п'яти водоносних горизонтів, розділених слабопроникними породами потужністю від 0,5—4,5 до 9—12,0 м. Останні не витримані по розрізу і по площі. У вертикальному розрізі водоносної товщі байоських відкладів середньокрупнозернисті і гравелісті піски складають

50 %, дрібно-середньозернисті піски руслової фації — близько 20 % і дрібно-тонкозернисті піски цієї ж фації — майже 30 % від загальної потужності піщаних відкладів, яка збільшується у східному напрямку до 30—43,0 м.

Найбільш високі коефіцієнти фільтрації (до 70 м/добу) характерні для пісків руслової фації, в середньому 20 м/добу. Водопровідність в залежності від потужності водовмісних порід змінюється від 120 до 500 м²/добу, зменшуючись до границь виклинювання горизонту.

Водоносні байоські піски в крайній південно-західній частині території Києва залягають на кристалічних породах фундаменту. В напрямку на схід і північний схід в основі водоносного горизонту лежить піщана товща тріасових відкладів. На цих ділянках утворюється єдиний в гідравлічному розумінні водоносний горизонт байоських і трасових відкладів. В центральній і східній частинах м. Київ піщані байоські і тріасові відклади розділяються глинистою товщею тріасу потужністю від декількох метрів до 82,0 м. У покрівлі байоського водоносного горизонту повсюдно залягає літологічно однорідна, водотривка товща батських глин потужністю 52—54,0 м і глинисто-алевритові келовейські відклади потужністю 40—60,0 м. Проникність батських глин дуже низька. Разом з тим у тектонічних зонах їхня екрануюча властивість частково порушена. Результати експлуатації байоського горизонту показують, що бат-келовейська товща є проникною і фільтрація води в процесі інтенсивної експлуатації направлена зверху вниз.

Глибина залягання покрівлі водоносного горизонту змінюється від 170,0 м на заході до 315,0 м на сході території. Абсолютні відмітки її збільшуються з південного заходу на північний схід від $-40,0$ до $-200,0$ м. Напори в непо-рушених умовах становлять в середньому $200-250,0$ м. П'єзометричні рівні встановлено на абсолютних відмітках $+92 \dots +110,0$ м. Абсолютні відмітки рівнів станом на кінець 80-х років минулого століття при максимальному водовідборі сягали від -14 до $+(50-60)$ м. Найбільше зниження рівня відбулося в західній (Біличі) і північно-східній (Оболонь) частинах Києва. В центрі міста динамічний рівень горизонту знаходиться на абсолютних відмітках $+(5-10)$ м.

Водоносний горизонт характеризується великою водозбагаченістю. Дебіти свердловин, обладнаних на товщу руслових пісків, становлять $5,5-30,0$ $\text{дм}^3/\text{с}$ при питомих дебітах $0,9-3,0$ $\text{дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}$, місцями досягають $44,5$ $\text{дм}^3/\text{с}$ при питомому дебіті $5,3$ $\text{дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}$. У свердловинах, які обладнані на піски заплавних фацій, дебіти сягають до $3,3$ $\text{дм}^3/\text{с}$ при питомих дебітах $0,02-0,13$ $\text{дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}$. Води доброї якості, прозорі, без кольору, без запаху, з температурою $12-16$ $^{\circ}\text{C}$, гідрокарбонатні, змішані за катіонним складом, причому відмічається переважання іонів кальцію і натрію. Мінералізація, яка постійна в часі і по території, становить $0,2-0,7$ $\text{г}/\text{дм}^3$. Води м'які та помірно жорсткі, величина загальної жорсткості $2,2-7,6$ $\text{ммоль}/\text{дм}^3$.

Нітрати і нітрити в воді відсутні або встановлені в незначних кількостях, вміст аміаку не перевищує $0,3$ $\text{мг}/\text{дм}^3$. Окиснюваність вод сягає $1,16,2$ $\text{мг}/\text{дм}^3$ O_2 . У водах горизонту встановлено ($\text{мг}/\text{дм}^3$): йод — до $0,44$; бром — $0,53-5,5$; метаборна кислота — до 10 . Спектральними аналізами визначено вміст 22 елементів, концентрації яких не перевищують граничних значень. У бактеріологічному відношенні води здорові.

В результаті експлуатації водоносного горизонту утворилася велика регіональна депресійна воронка, радіус якої перевищує 60 км, а загальне зниження п'єзометричної поверхні в центральних її частинах сягає $80-100$ м. Найбільше зниження рівнів ($100-120$ м) відмічається в межах водозабору Ново-Біличі, що, очевидно, пов'язано з близьким розташуванням цього району до межі виклинювання го-

ризонту. На Куренівці і Відрадному зниження рівня становило $80-100$ м, на лівому березі Дніпра — $60-70$ м.

Варто зазначити, що починаючи з кінця 90-х років минулого століття водовідбір по м. Київ почав різко зменшуватися (рис. 1). Наразі відновлення рівнів підземних вод у байоському водоносному горизонті сягнуло $20-40$ м. Щодо розмірів депресійної воронки, то визначити їх достовірно станом на сьогодні неможливо, що пов'язано з відсутністю режимних спостережень у необхідному обсязі.

Водоносний горизонт байоських відкладів, зважаючи на досить високу водозбагаченість, широке площинне поширення, добру якість води і значні залишкові напори ($150-180$ м), є перспективним для подальшого розширення водозабезпечення Києва.

Загальні відомості про раніше створені моделі Київського родовища підземних вод

Варто зазначити, що по досліджуваній території раніше декілька разів було проведено оцінку запасів підземних вод методом математичного моделювання із застосуванням аналогової техніки (Литвак и др., 1972; Новиков и др., 1978, 1984).

Вперше оцінку запасів підземних вод м. Київ було виконано в 1972 р. Правобережною геологічною експедицією разом з інститутом ВСЕГІНГЕО. Ця робота є найбільш ґрунтовною з усіх, що були проведені на той час на території так званого «Великого Києва» (територія радіусом $50-60$ км навколо столиці України). В ній на основі даних геологорозвідувальних робіт, детального аналізу природних умов та результатів розв'язання зворотних задач, що враховували 50-річний досвід експлуатації водозаборів, була складена та обґрунтована фільтраційна схема, яка відображає умови формування експлуатаційних запасів підземних вод сеноманкеловейського водоносного комплексу та байоського водоносного горизонту в північно-західній частині ДДЗ. Серед джерел формування експлуатаційних запасів, згідно з цією схемою, переважає вертикальна фільтрація підземних вод вищезалягаючих водоносних горизонтів та поверхневих вод. Прогнозна регіональна модель 1972 р. охоплювала площу близько 30 тис. км^2 .

Для всього району, що розглядається, зворотні та прогнозні задачі розв'язували на регіональній моделі, а для території Києва отримані результати після того уточнювали на моделі-врізці. Модель-врізка охоплювала приблизно площу чотирьох планшетів масштабу 1:50 000 (1600 км²).

Розв'язання зворотних та прогнозних задач відбувалось в квазістаціонарній постановці, що було обґрунтовано даними режиму підземних вод. Крім того, четвертинний та еоценовий водоносні горизонти не відтворювалися, а живлення сеноман-келовейського водоносного комплексу задавали як перетікання із еоценового водоносного горизонту через мергельно-крейдову товщу за допомогою граничних умов III роду (ГУ III). При цьому на верхній межі вертикальних опорів, які моделювали мергельно-крейдову товщу, задавали постійні потенціали, що відповідають розподілу рівнів в еоценовому водоносному горизонті.

На підставі виконаних робіт були отримані такі параметри фільтрації роздільних шарів: київські мергелі — $K_0 = 10^{-4}$ м/добу; мергельно-крейдова товща — $K_0 = 10^{-3} - 10^{-4}$ м/добу; бат-келовейська товща в межах Дніпровської тектонічної зони (територія Києва) — $K_0 = 2 \cdot (10^{-4} - 10^{-5})$ м/добу та $K_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ м/добу — на решті площі моделі. За результатами цієї роботи загальна кількість затверджених запасів підземних вод по водоносних сеноман-келовейському комплексу та середньоруському горизонту становила майже 700 тис. м³/добу.

Після цієї роботи в 1978 р. були підраховані експлуатаційні запаси підземних вод по сеноман-келовейському водоносному комплексу та байоському водоносному горизонту на ділянках «Виноградар» та «Десна». Була застосована модель, що описана вище. В результаті по цих ділянках були затверджені експлуатаційні запаси підземних вод у кількості 115,0 тис. м³/добу.

У 1984 р. Правобережною експедицією була виконана детальна розвідка підземних вод для господарсько-питного водопостачання м. Київ на ділянках «Бортничі I-II» (Новиков и др., 1984).

В порівнянні з моделлю 1972 р. у 1984 р. за результатами детальних розвідок на водозаборах «Десна» та «Бортничі» були внесені такі зміни:

1. На ділянці «Десна» уточнено водопровідність водоносного горизонту сеноман-келовейських відкладів та коефіцієнт фільтрації мер-

гельно-крейдової товщі ($km = 80$ м²/добу замість 300 м²/добу, $K_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ замість $1 \cdot 10^{-3}$ м/добу).

2. На ділянці «Бортничі» визначено водопровідність середньоруського водоносного горизонту, де за даними відкачування та результатами розв'язання зворотних задач $km = 600$ м²/добу (раніше було 350—500 м²/добу).

3. Було враховано бучацько-канівський водоносний горизонт, на п'езометричну поверхню якого було задано ГУ I роду, що було обґрунтовано стабільністю рівнів цього горизонту в умовах водовідбору 1984 р.

За результатами цієї роботи були затверджені запаси на ділянці «Бортничі I-II» в кількості 123,9 тис. м³/добу.

При цьому було виконано переоцінку експлуатаційних запасів на деяких ділянках Київського родовища в бік їх зменшення, і в підсумку по основних водоносних комплексу та горизонту затверджені запаси в кількості 724,4 тис. м³/добу.

Прогнозні рішення були виконані в стаціонарній постановці з різними варіантами задання водовідбору: прогнозне рішення з водовідбором, який існував станом на 1983 р.; прогнозне рішення з урахуванням нарощування водовідбору по м. Київ та містах-супутниках. Головне, що було доведено авторами, полягало в тому, що загальний прогнозний водовідбір у межах Київського родовища питних підземних вод був забезпечений джерелами їх формування.

Дуже важливою є робота (Нікіташ та ін., 2001), що була спрямована на підрахунок експлуатаційних запасів підземних вод Велико-Димерського родовища методом математичного моделювання із застосуванням електронних обчислювальних машин.

Варто зазначити, що, по-перше, специфіка моделювання фільтрації підземних вод цього родовища, розташованого у Броварському районі Київської області, полягала в тому, що воно знаходиться в зоні впливу потужних водозаборів м. Київ та міст-супутників (Бровари, Бориспіль). У зв'язку з цим рівні підземних вод сеноман-келовейського та байоського водоносних комплексу та горизонту, що використовуються для господарсько-питного водопостачання, знаходяться у порушеному режимі. Система водовідбору базується на мережі груп водозабірних свердловин (так званих «великих колодязів»), продуктивність яких в останні

роки досить суттєво змінювалась, що призвело до різноспрямованих змін напрямків руху рівнів підземних вод і темпів їх зниження—підвищення. Тому в таких складних умовах техногенного впливу, а також при досить значній фільтраційній неоднорідності водотривких порід оцінити взаємний вплив діючих водозаборів і водозабору, що проектувався на заводі «Кока-Кола», можна було лише із застосуванням математичного моделювання фільтрації підземних вод. При цьому область фільтрації, що моделюється, охоплювала площу, на якій проявився вплив діючих водозаборів.

По-друге, після отримання прогнозів у роботах 1972 і 1984 рр. на час виконання роботи 2001 р. пройшло 30 і 15 років, відповідно. Тому можна було порівняти надані прогнози з рівнями підземних вод на початок 2000-х років і у такий спосіб дійти висновку щодо якості обґрунтування схематизації природних умов на моделі, застосованих параметрів водоносних горизонтів і комплексів та роздільних слабопроникних товщ і, відповідно, щодо достовірності оцінки експлуатаційних запасів підземних вод методом математичного моделювання. Треба сказати, що це зіставлення ускладнюється тією обставиною, що в період з 1984 р. водовідбір підземних вод у Києві досить суттєво змінювався. Зокрема, по сеноман-келовейському водоносному комплексу з 300 тис. м³/добу в 1985 р. він зменшився до 190 тис. м³/добу у 1996 р., потім, протримавшись на такому рівні до 1999 р., у 2000 р. впав до 160 тис. м³/добу. По байоському горизонту спостерігається аналогічна картина. Так, з 180 тис. м³/добу у 1986 р. водовідбір зменшився у 1995 р. до 95 тис. м³/добу, потім у 1999 р. піднявся до 140 тис. м³/добу, а у 2000 р. знизився до 125 тис. м³/добу. Якщо врахувати, що зазначені зміни водовідбору відбувались в різних місцях області фільтрації, яка моделюється, то стане зрозумілим, що зіставлення прогнозних і фактичних даних не є справою простою. До цього додається ще одна суттєва обставина. При досить складній фільтраційній неоднорідності водовмісних порід введення нових водозаборів («Десна», «Бортничі») в період з 1985 по 2000 р. викликало значний перерозподіл знижень рівнів підземних вод у межах області фільтрації, що теж ускладнює зіставлення фактичних і модельних показників. Крім того, за цей період відбувся

суттєвий перерозподіл водовідбору на раніше введених в дію водозаборах. Зокрема, із 46 водозаборів по м. Київ на сеноман-келовейський водоносний комплекс водовідбір значно скоротився у 2000 р. у порівнянні з 1985 р. на 20 водозаборах.

Аналогічна картина спостерігається на водозаборах байоського водоносного горизонту. З 18 водозаборів по 14 водозаборах дебіт зменшився, по трьох збільшився, а один водозабір «Осокорки» був введений в роботу з 1997 р.

Таким чином, порівняно з періодом моделі 1984 р. характер збудження поля фільтрації, що моделюється, значно змінився. Зіставлення прогнозних знижень (Новиков и др., 1984) з натурними (станом на 2000 р.) показало, що фактичні зменшення менші за прогнозні, що зумовлено скороченням у порівнянні з 1983 р. водовідбору. В той же час урахування змін у водовідборі авторами роботи (Нікіташ та ін., 2001) привело до зближення прогнозних і фактичних знижень рівнів підземних вод продуктивних водоносних горизонтів.

Автори роботи 2001 р. за вихідні взяли параметри моделі зі звіту 1984 р. Лише живлення водоносного горизонту в бучацько-канівських відкладах з бічних границь моделі було задано більш жорстко (ГУ II роду $Q = \text{const}$) по відношенню до моделі 1984 р. (ГУ III роду $q = f(\Delta H)$). Незначної корекції зазнали також деякі фільтраційні параметри в районі Димерського родовища підземних вод, яке було під час детальної розвідки значно краще вивчено, ніж при виконанні роботи 1984 р. Але найбільший вплив на доведення модельних рівнів до зафіксованих за даними режимних спостережень мала зміна інтенсивності інфільтрації в зоні розмивання відкладів київських мергелів (з 5 до 30 мм/рік).

З наведеного випливає, що всі охарактеризовані моделі були актуальними для свого часу, всі належним чином відкалібровані та збалансовані, всі пройшли апробацію в ДКЗ СРСР або ДКЗ України.

Разом з тим моделі 70—80-х років минулого століття мали певні недоліки, зумовлені:

- неповним урахуванням джерел формування експлуатаційних ресурсів;
- неточністю кількісних оцінок джерел формування експлуатаційних ресурсів, вибраних як основні генетичні складові;

• умовністю прийнятої прогнозованої схеми водовідбору.

В наступні роки продовжувалось вивчення геолого-гідрогеологічних умов території дослідження, уточнення уявлень про структуру водоносних горизонтів, накопичення відомостей про їх параметри, гідродинамічні і гідрохімічні умови формування підземних вод. Попередні математичні моделі реалізовувалися на обчислювальній техніці, яка в наш час вже не застосовується. З'явилася нова потужна і зручна комп'ютерна техніка і програмне забезпечення до неї.

Тому метою виконання досліджень авторів даної статті було створення сучасної фільтраційної моделі Київського родовища підземних вод, доведення її функціональної відповідності природно-антропогенним умовам і переоцінка експлуатаційних запасів підземних вод, прив'язаних до реальної схеми водопостачання міста.

Для досягнення цієї мети було необхідно:

• вивчити та проаналізувати інформацію про природні умови (кліматичні, геоморфологічні, геологічні і тектонічні), про структуру водоносних горизонтів, їх параметри, зовнішні та внутрішні границі, режим підземних вод об'єктів досліджень для визначення особливостей фільтраційної схеми і зовнішніх контурів моделі;

• проаналізувати результати попередньої оцінки експлуатаційних запасів підземних вод КПМА;

• вивчити та проаналізувати інформацію про техногенні умови об'єкта дослідження та їх вплив на довкілля;

• скласти розрахункову схему під модельні розрахунки;

• створити математичну модель території КПМА — підготувати масиви вихідної інформації до моделі, розв'язати зворотні стаціонарну і нестаціонарну задачі з метою уточнення гідрогеологічних параметрів, довести функціональну відповідність моделі природним та техногенно зміненим умовам;

• оцінити за результатами моделювання гідродинамічний стан підземних вод з визначенням джерел їх формування на сучасний період;

• виконати переоцінку експлуатаційних запасів підземних вод з визначенням джерел їх

формування і впливу проектного водовідбору на довкілля.

Насамкінець зауважимо, що крім охарактеризованих вище широковідомих моделей, які пройшли апробацію в ДКЗ СРСР або ДКЗ України, автори статті мали достатній досвід створення математичних моделей об'єкта, що вивчається, виконуючи відомчі замовлення колишнього Міністерства України з надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи (Шестопапов и др., 1992, 1996), КП «Київводоканал» (Руденко и др., 1992; Шестопапов и др., 1995), ДРГП «Північгеологія» (Копылова и др., 2007; Сапрыкин, 2009; Шестопапов и др., 2004), а також держбюджетну тематику НАН України (Руденко та ін., 2014; Шестопапов и др., 2009; Шестопапов та ін., 2009). Крім того, матеріали цих досліджень були опубліковані в монографіях (Водообмен..., 1991; Chernobyl..., 2000).

Основна відмінність цих моделей від попередніх полягає у відтворенні на моделі олігоцен-четвертинного водоносного комплексу, на який задавалось інфільтраційне живлення та реалізувався зв'язок з поверхневими водами (ГУ I роду $H = \text{const}$ або ГУ III роду $q = f(\Delta H)$).

Схематизація природних умов

Робота по створенню гідрогеологічної моделі КПМА була започаткована зі складання уявлення про фільтраційні особливості об'єкта дослідження і проведення гідрогеологічної схематизації. Далі на підставі розчленування розрізу на розрахункові водоносні і слабопроникні шари та обґрунтування зовнішніх контурів моделі за геолого-гідрогеологічними ознаками була створена розрахункова схема багатозарової водоносної системи, що вивчається.

При створенні гідрогеологічної моделі КПМА були вибрані такі просторові межі території досліджень: границею зі сходу і північного сходу слугував Остер-Золотоніський вал, на заході, південному заході і частково на півдні — УЩ, на південному сході — Канівське водосховище, на півночі — р. Уж. Таким чином, границі моделі були вибрані з урахуванням особливостей геолого-гідрогеологічної, тектонічної й орогідрографічної будови тери-

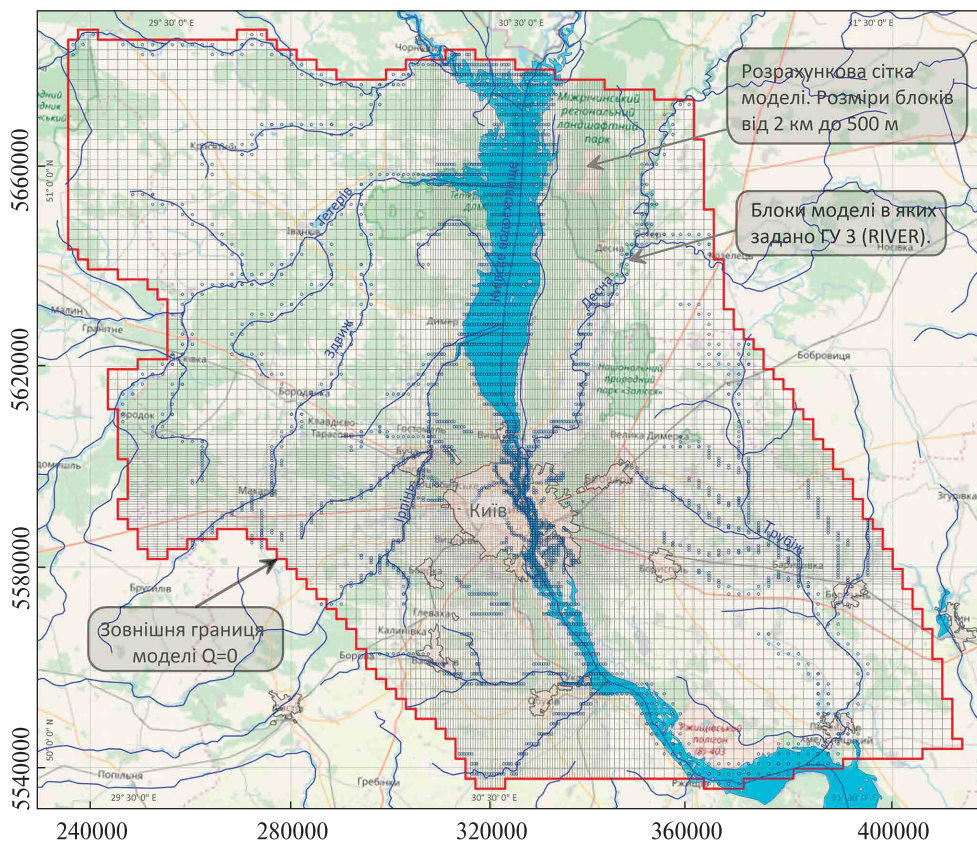


Рис. 2. Карта-схема просторової дискретизації моделі. Метричні координати відповідають географічній проекції — WGS84 UTM zone 36N

Fig. 2. Schematic map showing spatial discretization of the model. Metric coordinates correspond to the geographical projection — WGS84 UTM zone 36N

торії. Крім того, були враховані розміри депресійної воронки, що утворилася на середину 80-х років минулого століття, коли водовідбір із сеноман-келовейського та байоського водоносних комплексу та горизонту становив 80—85 % від затверджених запасів. Щоб рахувати безпосередній контакт водоносних горизонтів у плані і розрізі була побудована робоча карта гідравлічного взаємозв'язку водоносних горизонтів і комплексів зони інтенсивного і значного водообміну. В зонах безпосереднього (прямого) гідравлічного взаємозв'язку водопровідність водоносних горизонтів додавалась.

Загальна площа моделювання, що становила 17 630 км², була розбита на ортогональні розрахункові блоки з мінімальним розміром 0,5 × 0,5 км, максимальним — 2 км (рис. 2).

Відповідно до геологічної будови в межах території КПМА виділяють водоносні горизонти і комплекси, приурочені до четвертинних, міоцен-олігоцен-пліоценових, еоценових,

сеноман-келовейських, середньоюрських (байоських) відкладів.

Основні слабопроникні шари, що мають регіональне розповсюдження і потужності від 10 до 100 м, представлені київськими мергелями, мергельно-крейдовою товщею верхньої крейди, бат-келовейськими глинисто-алевритовими утвореннями, глинистою товщею тріасу. Спорадичне розповсюдження мають червоно-бурі та строкаті глини неогену (правобережжя Дніпра).

Найбільше практичне значення для організації централізованого водопостачання мають водоносний комплекс сеноман-келовейських відкладів і водоносний горизонт байоських відкладів, що широко експлуатуються. З точки зору формування їхнього якісного складу та експлуатаційних запасів велику роль відіграють водоносні горизонти, що виступають у ролі живлячих (насамперед перші від поверхні землі).

При схематизації території, що вивчається, в розрізі враховано чотири водоносних горизонти і комплекси зони інтенсивного і значного водообміну та три регіональних слабопроникних шари між ними.

Перший водоносний комплекс на моделі об'єднує обводнену товщу четвертинних, пліоценових і олігоценів відкладів, що залягають над регіонально витриманим шаром київських мергелів.

Перший роздільний шар представлений регіональною товщею київських мергелів і глин.

Другий водоносний комплекс на моделі схематизує обводнену товщу еоценових відкладів, розповсюджених практично на всій території. Локальні ділянки відсутності цих відкладів відзначено на південно-східній границі моделі. В південній частині досліджуваної території і в межах Остер-Золотоніського валу обводнені еоценові відклади залягають безпосередньо на обводнених породах сеноман-келовейського віку. На цих ділянках водопровідність вказаних відкладів додавалась.

Другий роздільний шар представлений мергельно-крейдовою товщею турону—сенону, що регіонально розповсюджена в центральній і північній частинах території досліджень.

Третій водоносний комплекс на моделі приурочений до відкладів сеноманського ярусу верхньої крейди і келовейських відкладів юри.

Третій роздільний шар схематизує регіонально розвинену товщу батських глин. Відсутня вона лише в крайній південно-західній частині досліджуваної території по границі з УЩ.

Четвертий водоносний горизонт схематизує обводнені континентальні відклади середньої юри, представлені в основному пісками і пісковиками байоського ярусу. В межах досліджуваної території є локальні площі відсутності байоського водоносного горизонту, розкидані практично по всій території. Підстеляється цей водоносний горизонт регіональним триасовим водотривом.

При схематизації фільтраційної неоднорідності водоносних товщ і роздільних шарів були використані матеріали робіт (Бабінець, 1961; Бабінець і др., 1979; Водообмен..., 1989, 1991, 2001; Литвак і др., 1972; Монастырский і др., 1986; Нікіташ та ін., 2001; Новиков і др., 1978, 1984; Руденко і др., 1992; Шестопалов і др.,

1996). Були зіставлені точкові значення водопровідності з інтервалом зміни середнього значення по зоні на модельних картах. По обводнених відкладах еоцену та сеноману—келовею отримано задовільний збіг цих значень. Для четвертинних порід як розрахункова була прийнята верхня межа значень водопровідності. Це пов'язано з тим, що за роки після завершення регіональної оцінки на території Київської області для цілей меліорації були виконані сотні нових дослідно-фільтраційних випробувань. Складена наприкінці 80-х років минулого століття в інституті «Укрдіпровдгосп» з урахуванням цих даних карта водопровідності четвертинних відкладів Київської області надає значення приблизно вдвічі більші, ніж на регіональній моделі (Сапрыкин і др., 1991). Це викликає необхідність уточнення при проведенні подальших досліджень як достовірності точкових визначень, так й інтервалів зміни середніх оцінок, отриманих на моделях.

Карти водопровідності середньоюрських відкладів є доволі орієнтовними, тому що базуються на обмеженій кількості точок опробування. Зони по водопровідності для цих порід виділялись на основі карт літологічного складу і потужності, побудованих у відділі стратиграфії і палеонтології мезозойських відкладів Інституту геологічних наук НАН України. Значення коефіцієнтів водопровідності по зонах розподілялись з урахуванням моделювання фільтрації, наведеного в роботах (Литвак і др., 1972; Нікіташ та ін., 2001; Новиков і др., 1984; Руденко і др., 1992; Сапрыкин і др., 1991; Шестопалов і др., 1996).

На ділянках виклинювання роздільних шарів водопровідність горизонтів, що мають прямий гідравлічний взаємозв'язок, додавалась. Так, у центральній і північній частинах, де відсутні київські мергелі, додавалась водопровідність четвертинних, пліоценових, олігоценів та еоценових відкладів. А, наприклад, у південно-східній частині території, крім київських мергелів, відсутня мергельно-крейдова товща (на окремих ділянках роздільних шарів взагалі її немає). В цьому випадку додавались водопровідності трьох верхніх комплексів (або всіх чотирьох).

Найбільші складності виникли при схематизації параметрів перетікання через роздільні шари, тому що кількість більш-менш достовір-

них визначень коефіцієнтів фільтрації роздільних шарів дуже обмежена.

Схематизація фільтраційної неоднорідності товщі київських мергелів проведена з використанням результуючих модельних карт, наведених у роботах (Литвак и др., 1972; Нікіташ та ін., 2001; Новиков и др., 1984; Руденко и др., 1992; Сапрыкин и др., 1991; Шестопапов и др., 1995). При цьому враховані різні значення коефіцієнтів фільтрації київських мергелів у річкових долинах і на вододілах. Характерними для вододільних ділянок є значення питомої проникності $\chi_0 = k_0 / m_0$ порядку $(2-5) \cdot 10^{-6}$ доба⁻¹; для річкових долин — $(1-2) \cdot 10^{-5}$ доба⁻¹. В місцях відсутності роздільного шару задавали фіктивне значення k_0/m_0 на рівні $5 \cdot 10^{-2}$ доба⁻¹, що було викликано особливістю застосованого програмного забезпечення, яке разом з тим забезпечувало повний збіг п'єзометричних рівнів суміжних водоносних горизонтів (комплексів) між собою.

При схематизації фільтраційної неоднорідності мергельно-крейдової товщі також були використані результати раніше проведених робіт по моделюванню геофільтрації. Отримані при попередніх дослідженнях значення застосовувалися як вихідні для моделі території досліджень. Цілком достовірними видаються встановлені закономірні погіршення фільтраційних властивостей із зануренням товщі і збільшенням її потужності. В межах лівобережжя Дніпра χ_0 змінюється переважно від $1 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6}$ доба⁻¹. На південно-західному схилі ДАБ (правобережжя Дніпра) χ_0 дорівнює $2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$ доба⁻¹, на півночі — $1 \cdot 10^{-6}$ доба⁻¹. В місцях відсутності цього роздільного шару застосовувався підхід, що описаний вище.

Найбільші складності виникли при схематизації роздільного шару середньоюрських відкладів (J₂b). При цьому були використані результати геологозйомочних робіт на території досліджень, матеріали визначення можливості закачування вод у глибокі горизонти (Швай, 1973). Оцінки коефіцієнтів фільтрації батських глин прийняті з урахуванням проведеного моделювання по території м. Київ (Бабинець, 1961; Бабинець и др., 1979; Литвак и др., 1972; Монастырский и др., 1986; Нікіташ та ін., 2001; Новиков и др., 1984; Руденко и др., 1992; Шестопапов и др., 1996). Переважно значення параметра χ_0

становлять $1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-7}$ доба⁻¹, на західній границі моделі — $1 \cdot 10^{-5} - 1,5 \cdot 10^{-4}$ доба⁻¹.

Ємкісні властивості порід визначені з урахуванням даних дослідно-фільтраційних робіт, проведених експедиціями ДРГП «Північгеологія», а також результатів моделювання. Властивості досліджуваних водоносних комплексів і горизонтів, які прийняті при складанні фільтраційної схеми моделі, наведені у таблиці.

Для спрощення розв'язання зворотної задачі на моделі підбирали результуючу величину інфільтраційного живлення (інфільтрація і конденсація атмосферної вологи без урахування випаровування і транспірації ґрунтової води). Задані на моделі початкові значення інфільтраційного живлення запозичені з роботи (Шестопапов и др., 1996).

Взаємозв'язок першого від поверхні водоносного горизонту з річками здійснювався заданням на моделі граничних умов III роду $q = f(\Delta H)$. Відмітки рівнів води в річках задавали в кожному річковому блоці у відповідності до топографічних карт, побудованих на моменти часу, коли річковий стік не був зарегульований гідротехнічними спорудами. Відмітки підосви підруслових відкладів достовірно не відомі; орієнтовно вони задавалися для р. Дніпро менше середньобагаторічного рівня води в річці на 10 м, для притоків першого порядку — на

Значення гравітаційної і пружної водовіддачі, прийняті при моделюванні

Values for specific yield and storage coefficient assigned in groundwater flow modelling

Водоносний комплекс (горизонт)	Значення водовіддачі	
	гравітаційна	пружна
Олігоцен-пліоцен-четвертинний	0,2	—
Еоценовий	0,2	10^{-3}
Сеноман-келовейський	—	10^{-4}
Байоський	—	10^{-4}

Примітка. За час експлуатації в межах м. Київ спостерігалось зниження рівнів підземних вод у еоценовому водоносному горизонті нижче його покрівлі, у зв'язку з чим значення пружної водовіддачі змінювалось на гравітаційну.

Note. During operation within the city of Kyiv, there was a decrease in groundwater levels in the Eocene aquifer below its roof, due to which the value of elastic water yield changed to gravitational.

5 м, для притоків другого порядку — на 3 м. Фільтраційні параметри підруслових відкладів річок на території досліджень випробовувались в процесі дослідно-фільтраційних робіт тільки на одиничних ділянках. Однак результати регіональних оцінок підземного стоку в річки свідчать, що величина додаткового фільтраційного опору (ΔL) не перевищує значень 100—200 м.

На зовнішніх границях моделі задавали ГУ II роду $Q = 0$. У першому від поверхні землі водоносному горизонті, де границі моделі збігаються з річками або водосховищем, була задана ГУ III роду $q = f(\Delta H)$.

Для оцінки забезпеченості експлуатаційних запасів природними, штучними і залученими ресурсами, а також ємкісними та пружними запасами необхідно було розв'язати зворотні і прогнольні задачі з урахуванням порушених умов фільтрації в межах досліджуваної ділянки. Перетікання через слабопроникні шари визначено, виходячи з посилання Мятієва-Гіринського на нехтування горизонтальною складовою фільтрації в слабопроникних шарах, вертикальною складовою — в добре проникних, а також пружними запасами роздільних шарів.

Для схематизації дебітів свердловин використані дані витрат усіх водозаборів господарсько-питного призначення на території досліджень. При цьому враховано як водозабори, що діють на ділянках із затвердженими запасами, так і водозабори, які експлуатують незатверджені запаси (разом понад 1000 свердловин). Якщо в один блок моделі попадали декілька водозаборів, то вони об'єднувались у «великі колодязі» і на моделі задавався сумарний водовідбір (ГУ II роду $Q = f(t)$).

Розв'язання імітаційних задач з метою визначення чутливості моделі до зміни гідрогеологічних параметрів

Точність гідрогеологічних прогнозів значною мірою залежить від тих вихідних параметрів, які задаються в розрахункову схему. При вивченні впливу водовідбору на зміну гідрогеологічних умов дослідженнями охоплюється значна територія, для якої необхідно знати значення параметрів та їхній розподіл. Дуже складно і не завжди можна визначити за допомогою лабораторних або дослідно-фільтраційних робіт величини коефіцієнтів фільтрації

і пружної водовіддачі глинистих слабопроникних відкладів. Одержавши числові значення параметрів для окремих точок території, дуже важко визначити їхній розподіл по площі. Зазвичай закономірності зміни параметрів представляють у вигляді відповідних карт водопровідності, рівнепровідності та п'езопровідності. Для великих територій достовірну побудову таких карт здійснити важко. Лабораторні дослідження часто не забезпечують необхідну достовірність параметрів, що визначаються, а дослідно-фільтраційні роботи у великому обсязі не проводяться через їх високу вартість. Таким чином, території виявляються охарактеризованими тільки в окремих пунктах. У цьому випадку в складних природних умовах відомі методи ручної і машинної інтерполяції / екстраполяції стають практично мало прийнятними. Осереднення параметрів по всій території або на окремих її ділянках може призвести до суттєвих погрешностей або навіть невірних результатів прогнозу.

Ще складніша справа з визначенням величини сумарного живлення водоносного пласта. Зазвичай інфільтраційне живлення оцінюється орієнтовно на основі аналізу кліматичних умов району та інколи — за даними режимних спостережень; глибинне живлення часто не може бути оцінено. Розподіл цих результатів на всю територію, яка досліджується, завжди є умовним.

Зважаючи на вказані проблеми, автори виконали розв'язання імітаційних задач з метою визначення чутливості моделі до зміни гідрогеологічних параметрів. У стаціонарній постановці досліджувався вплив зміни інфільтраційного живлення, коефіцієнтів водопровідності, а також питомої проникності роздільних шарів на рівневий режим олігоцен-пліоцен-четвертинного, еоценового, сеноман-келовейського і байоського водоносних горизонтів і комплексів. Для дослідження було вибрано профіль по межиріччю Тетерів—Здвиж—Ірпінь—Дніпро—Трубіж, що дозволяє, з нашої точки зору, поширювати виявлені закономірності на весь об'єкт дослідження.

Основні висновки, що випливають з аналізу розв'язання імітаційних задач, зводяться до такого:

1. На реакцію рівневої поверхні олігоцен-пліоцен-четвертинного водоносного комплексу впливали такі гідрогеологічні параметри (в

порядку зменшення інтенсивності): а) інфільтраційне живлення; б) питома проникність київських мергелів; в) водопровідність олігоцен-пліоцен-четвертинних відкладів; г) водопровідність еоценових відкладів; д) питома проникність підруслових відкладів; е) питома проникність мергельно-крейдової товщі; ж) водопровідність сеноман-келовейських відкладів; з) водопровідність байоських відкладів; і) питома проникність батських глин.

2. На реакцію рівневої поверхні еоценового водоносного горизонту впливали такі гідрогеологічні параметри (в порядку зменшення інтенсивності): а) інфільтраційне живлення; б) водопровідність еоценових відкладів; в) питома проникність київських мергелів; г) водопровідність сеноман-келовейських відкладів; д) водопровідність олігоцен-пліоцен-четвертинних відкладів; е) питома проникність підруслових відкладів; ж) питома проникність мергельно-крейдової товщі; з) питома проникність батських глин; і) водопровідність байоських відкладів.

3. На реакцію рівневої поверхні сеноман-келовейського водоносного комплексу впливали такі гідрогеологічні параметри (в порядку зменшення інтенсивності): а) інфільтраційне живлення; б) водопровідність сеноман-келовейських відкладів; в) водопровідність еоценових відкладів; г) питома проникність київських мергелів; д) водопровідність олігоцен-пліоцен-четвертинних відкладів; е) питома проникність мергельно-крейдової товщі; ж) питома проникність батських глин; з) питома проникність підруслових відкладів; і) водопровідність байоських відкладів.

4. На реакцію рівневої поверхні байоського водоносного горизонту впливали такі гідрогеологічні параметри (в порядку зменшення інтенсивності): а) інфільтраційне живлення; б) питома проникність батських глин; в) водопровідність байоських відкладів; г) водопровідність сеноман-келовейських відкладів; д) водопровідність еоценових відкладів; е) водопровідність олігоцен-пліоцен-четвертинних відкладів; ж) питома проникність підруслових відкладів; з) питома проникність київських мергелів; і) питома проникність мергельно-крейдової товщі.

5. Реакція водообмінної геосистеми на будь-які зміни гідрогеологічних параметрів у межах

вододільних просторів значно вища, ніж у межах річкових долин.

6. Максимальний вплив на амплітуду коливання рівнів підземних вод у межах вододільних просторів мала зміна інфільтраційного живлення (для всіх водоносних горизонтів і комплексів), дещо меншою мірою — питома проникність київських мергелів і батських глин (для олігоцен-пліоцен-четвертинного водоносного комплексу та байоського водоносного горизонту, відповідно), а також водопровідність еоценових і сеноман-келовейських відкладів (для однойменних водоносних комплексів, відповідно).

7. В межах річкових долин амплітуда коливання рівневої поверхні залежить насамперед від зміни інфільтраційного живлення і питомої проникності підруслових відкладів.

8. Зміна гідрогеологічних параметрів впливала на амплітуду коливання рівнів підземних вод таким чином (цифрами 1, 2, 3, 4 позначено відповідно олігоцен-пліоцен-четвертинний, еоценовий, сеноман-келовейський, байоський водоносні комплекси і горизонти; вплив параметрів показано в порядку зменшення інтенсивності): а) водопровідність олігоцен-пліоцен-четвертинних відкладів — 1, 2, 3, 4; б) водопровідність еоценових відкладів — 2, 3, 1, 4; в) водопровідність сеноман-келовейських відкладів — 3, 2, 4, 1; г) водопровідність байоських відкладів — 4, 3; д) питома проникність підруслових відкладів — 1, 2, 3, 4; е) питома проникність київських мергелів — 1, 2, 3, 4; ж) питома проникність мергельно-крейдової товщі — 3, 4, 2, 1; з) питома проникність батських глин — 4, 3, 2, 1; і) інфільтраційне живлення — 1, 2, 3, 4.

9. В областях розповсюдження гідравлічних «вікон» значно знижується реакція об'єднаного водоносного комплексу на будь-які зміни гідрогеологічних параметрів.

10. Збільшення і зменшення інфільтраційного живлення в два рази викликало неадекватну реакцію рівнів підземних вод. При скороченні живлення амплітуда зміни рівнів була менше, ніж при його зростанні. Це пояснюється тим, що при зменшенні живлення відбулося переміщення вододілів. Лінії вододілів наблизилися до «річкових» блоків з малим ерозійним врізом, що сприяло перехопленню розвантаження головним водотоком району — р. Дніпро.

Місцями вододіли зникли. Відбулася інверсія руху підземних вод, тобто деякі області розвантаження перетворилися в області живлення. Очевидно, що додаткове живлення з річок і вплинуло на амплітуди зниження рівнів.

11. Зміна проникності підруслових відкладів практично рівною мірою вплинула на всю водообмінну товщу, що говорить про поширення дренаючої ролі річок району на всю зону активного водообміну.

Розв'язання оберненої (зворотної) стаціонарної задачі в природних умовах

Уточнення гідрогеологічних параметрів і граничних умов, а також структури водообміну в межах Київського родовища підземних вод у природних і порушених умовах виконано в процесі розв'язання обернених задач.

Розв'язання задач зводилося переважно до визначення інфільтраційного живлення, коригування питомої проникності роздільних шарів, незначною мірою коефіцієнтів водопровідності обводнених відкладів, а також з'ясування складових водного балансу в природних та порушених умовах (останнє розглядається в наступному розділі).

Для підбору величини інфільтраційного живлення були використані дані спостережень за рівнями підземних вод у період квазістаціонару. Вірогідність моделі в цілому оцінювалася за збігом модельних і натурних рівнів.

Розв'язання зворотної стаціонарної задачі виконано в такий спосіб. Спочатку на моделі були задані гідрогеологічні параметри і граничні умови, що відповідають мірі вивченості району дослідження в процесі раніше проведених робіт. У результаті були отримані такі рівневі картини.

В олігоцен-пліоцен-четвертинному водоносному комплексі на досліджуваній території модельні рівні встановилися переважно нижче натурних. Порівнювалися дані по 57 спостережних свердловинах (Шестопалов та ін., 2009). Більш істотною ця різниця була на правобережжі Дніпра. На деяких обмежених по площі ділянках спостерігалася зворотна картина, тобто модельні рівні були вище натурних.

В еоценовому водоносному комплексі модельні рівні на лівобережжі Дніпра більші відповідали натурним. На правобережжі, особливо в західній та південно-західній

частинах області фільтрації, що моделюється, отримане положення рівневої поверхні було вище їхнього природного розподілу. Для порівняння були враховані дані по 70 спостережних свердловинах (Руденко, Негода, 2018).

Схожа картина спостерігалася в сеноман-келовейському водоносному комплексі. Для порівняння були враховані дані по 51 спостережній свердловині (Руденко, Негода, 2018). У байоському водоносному горизонті збіг модельних та природних рівнів був цілком прийнятним (розбіжність не перевищувала 2—3 м). Порівнювалися дані по 13 спостережних свердловинах (Шестопалов та ін., 2009).

На підставі викладеного вище калібрування моделі здійснювалося в такий спосіб.

Перш за все певним чином була змінена концепція задання інфільтраційного живлення. Замість дрібних зон на периферії моделі (початкова інфільтрація коливалася від 5 до 18 мм/рік) ми задали $W = 20$ мм/рік, а в центральній частині моделі (практично територія м. Київ) $W = 60$ мм/рік. Початкове інфільтраційне живлення на цій території становило 30—36 мм/рік. Нове значення інфільтрації було задано з міркувань наявності техногенного інфільтраційного живлення, що виникло при втраті води з водогонів міста.

Такий підхід дав позитивний результат для першого від поверхні водоносного комплексу. Але для еоценового і сеноман-келовейського водоносних комплексів це призвело до певного, хоча і незначного, підвищення рівнів підземних вод.

Для приведення у відповідність п'єзометричних модельних поверхонь сеноман-келовейського та еоценового водоносних комплексів з фактичними даними була змінена питома проникність роздільного шару київських мергелів на правобережжі Дніпра поблизу західної границі моделі. Були змінені значення цього параметра по зонах таким чином (з північного заходу на південний захід): початкові значення, що дорівнювали $(2—8) \cdot 10^{-6}$ доба⁻¹, були зменшені до $1 \cdot 10^{-6}$ доба⁻¹.

Питома проникність мергельно-крейдової товщі на невеликій ділянці правобережжя (в північній частині м. Київ і прилягаючій в цьому напрямку території) зазнала змін з $1 \cdot 10^{-5}$ на $1 \cdot 10^{-6}$ доба⁻¹. Крім того, в північній частині моделі було зменшено значення коефіцієнта во-

допровідності обводнених сеноман-келовейських порід зі 130 до 50 м²/добу.

Проведене корегування розрахункових гідрогеологічних параметрів дозволило домогтися прийняттого збігу модельних і натурних рівнів підземних вод у всіх водоносних горизонтах і комплексах (розбіжність між модельними і природними рівнями підземних вод не перевищувала 2—3 м).

Варто зазначити, що остаточний розв'язок було отримано з урахуванням розв'язання епігнозної задачі, що буде описано в наступному розділі. Річ у тому, що кореляція між собою результатів розв'язання нестационарної та стаціонарної задач досить кропіткий процес. Була здійснена не одна ітерація задля задовільного збігу фактичних і модельних даних у природних і порушених техногенезом умовах.

Аналіз модельної карти гідроізоплосі олігоцен-пліоцен-четвертинного водоносного комплексу свідчить про те, що рівневий режим цілком визначається характером орогідрографії регіону. Напрямок руху природного потоку на лівобережжі орієнтований чітко по нормалі до Дніпра. Разом з тим річки більш низького порядку (Десна, Ірпінь) і зовсім невеликі (Либідь, Сирець, Нивка) також впливають на зазначений водоносний комплекс. Живлення його здійснюється на вододільних просторах та їхніх схилах.

Природні ресурси області, яка моделюється, формуються внаслідок місцевого інфільтраційного живлення (944,3 тис. м³/добу) та одночасно являють собою і ресурси першого від поверхні землі водоносного комплексу, приуроченого до четвертинних відкладів, з якого транзитом надходить усе місцеве інфільтраційне живлення нижчезалягаючих водоносних горизонтів і комплексів.

Водоносний комплекс, приурочений до еоценових відкладів, безпосередньо дрениється річковою мережею на ділянках відсутності слабопроникних київських мергелів. У межах площі розвитку київських відкладів вертикальне розвантаження комплексу здійснюється в річкових долинах по зонах підвищеної проникності роздільного шару. Максимальні п'езометричні відмітки поширені на правобережжі Дніпра і сягають 140—150 м; п'езометричні мінімуми спостерігаються в заплаві Дніпра — 88—90 м. Живлення еоценового во-

доносного комплексу відбувається внаслідок спадного перетікання з олігоцен-пліоцен-четвертинного водоносного комплексу в межах вододільних просторів і значно меншою мірою — в результаті перетікання з нижчезалягаючих водоносних горизонтів (265,0 і 126,7 тис. м³/добу, відповідно). Його розвантаження здійснюється у вищезалягаючі водоносні горизонти в районах річкових долин та шляхом перетікання в нижчезалягаючі водоносні горизонти.

Картина п'езометричної поверхні сеноман-келовейського водоносного комплексу в природних умовах аналогічна розглянутій вище, але більш згладжена. П'езометричні максимуми знаходяться в південно-західній частині території, що розглядається. Мінімальні відмітки зафіксовані в заплаві Дніпра. Живлення водоносного комплексу відбувається переважно внаслідок перетікання підземних вод з вищезалягаючих обводнених відкладів у межах вододільних просторів, меншою мірою — в результаті підживлення знизу (126,7 і 18,0 тис. м³/добу, відповідно).

Розвантаження підземних вод цього водоносного комплексу через мергельно-крейдову товщу відбувається в річкових долинах і внаслідок перетікання в нижчезалягаючі водоносні горизонти.

Виходячи з розгляду картини п'езометричної поверхні байоського водоносного горизонту, можна зробити такі висновки.

Напрямок латерального потоку в цьому водоносному горизонті орієнтовано чітко із заходу на схід (від схилів УЩ у напрямку центральної частини ДАБ). Притоки Дніпра не дрениють байоський водоносний горизонт. У межах досліджуваної території байоський водоносний горизонт може бути віднесений до зони значного водообміну (у зв'язку з наявністю значної кількості гідрогеологічних «вікон»). У даному водоносному горизонті не спостерігається така витримана диференціація зон живлення і розвантаження (вододіли і долини річок, відповідно), як у вищезалягаючих водоносних комплексах. Живлення байоського водоносного горизонту здійснюється внаслідок перетікання з вищезалягаючих водоносних горизонтів (18,0 тис. м³/добу), розвантаження — в результаті висхідного вертикального перетікання в долині р. Дніпро. Площинне живлення

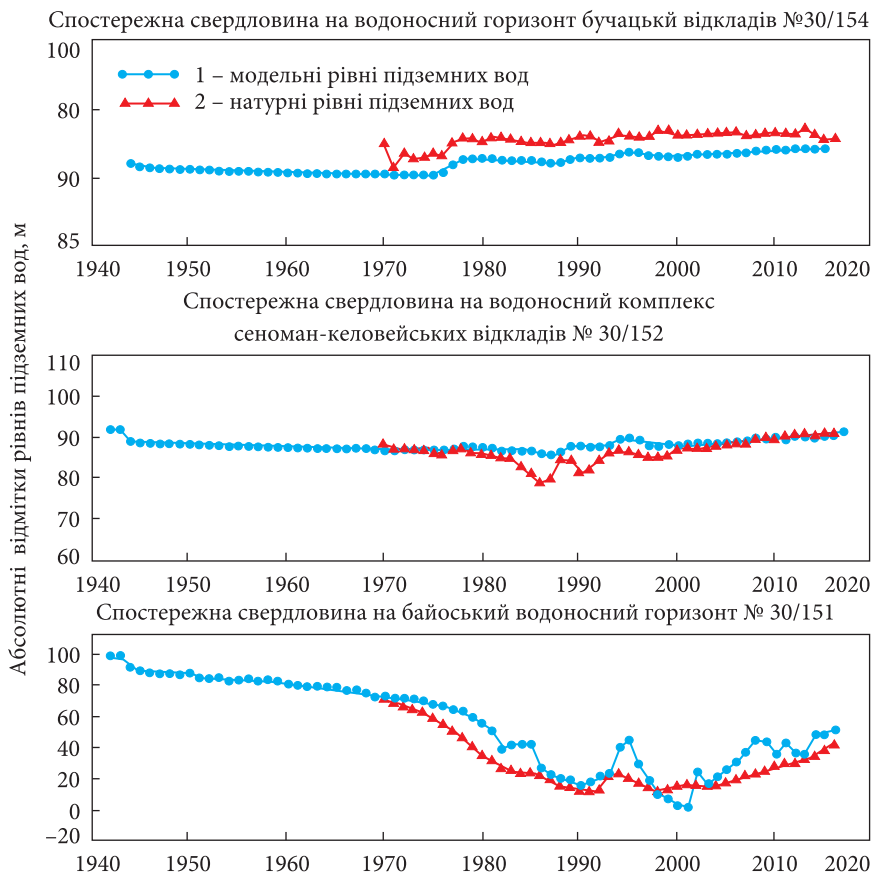


Рис. 3. Графіки збігу натурних та модельних рівнів підземних вод по спостережному куцу «Троещина»

Fig. 3. Graphs showing coincidence of measured and modelled groundwater levels for the "Troyeshchyna" observation well cluster

байоського водоносного горизонту відрізняється від живлення вищезалігаючих комплексів не тільки відсутністю закономірної приуроченості до вододільних просторів, але і значно меншою інтенсивністю.

Результати розв'язання зворотної стаціонарної задачі для природних умов досліджуваної території дозволили уточнити інфільтраційне живлення підземних вод, розподіл природних ресурсів по площі і по водоносних горизонтах і комплексах, а також структуру й інтенсивність водообміну.

Основні висновки за результатами аналізу виконаних рішень можна викласти в такий спосіб.

1. Природні ресурси території КПМА, що формуються внаслідок місцевого інфільтраційного живлення атмосферними опадами, одночасно являють собою і ресурси першого від поверхні землі водоносного комплексу, через який надходить все інфільтраційне живлення нижчезалігаючих горизонтів і комплексів.

2. Регіональний розподіл п'езометричних максимумів і мінімумів напірних водоносних горизонтів і комплексів, а також спрямованість руху підземних вод у плані значною мірою ви-

значаються характером сучасної орогідрографії району. Напрямок регіонального латерального потоку здійснюється з боку найбільш піднятих у сучасному рельєфі структур (УЩ, Остер-Золотоніський вал) до регіональної області розвантаження (р. Дніпро). Ідентичність п'езометричних поверхонь напірних водоносних комплексів і дзеркала ґрунтових вод залежить від глибини залягання горизонтів, наявності і характеру слабопроникних шарів. Для верхніх водоносних горизонтів і комплексів ідентичність вища, а для нижніх менша.

3. Вертикальне перетікання між горизонтами — провідний фактор водообміну в межах території Київського родовища. Спрямованість вертикального водообміну між горизонтами і комплексами визначається співвідношенням напорів у вище- і нижчезалігаючих водоносних горизонтах та орогідрографічними особливостями території. В межах вододільних просторів встановлено значне переважання низхідного руху підземних вод з верхніх водоносних горизонтів у нижні; у долинах річок спостерігається зворотна картина, тобто розвантаження підземних вод нижніх

водоносних горизонтів у верхні. Дана закономірність чітко фіксується у верхній гідродинамічній зоні, а в нижній (байоський водоносний горизонт) вона встановлюється не повсюдно.

4. Розповсюджені в межах КПМА регіональні слабопроникні шари сприяють зменшенню інтенсивності вертикального водообміну з глибиною: у верхніх водоносних горизонтах і комплексах вона значно вища, ніж у нижніх.

Розв'язання епігнозної нестационарної задачі

Уточнення сучасних умов формування водообміну в межах території м. Київ, що зазнала інтенсивного антропогенного впливу, проведено в процесі розв'язання епігнозної задачі в нестационарній постановці. За початкові умови взято збалансоване розв'язання зворотної стаціонарної задачі в природних умовах. Вплив гідротехнічного будівництва враховано на мо-



Рис. 4. Модельна карта гідроізоп'єз сеноман-келовейського водоносного комплексу за результатами розв'язання нестационарної оберненої задачі станом на січень 2017 р.

Fig. 4. Model map of the hydroisopiestic lines for the Cenomanian-Callovia aquifer based on the results of the transient inverse problem as of January 2017

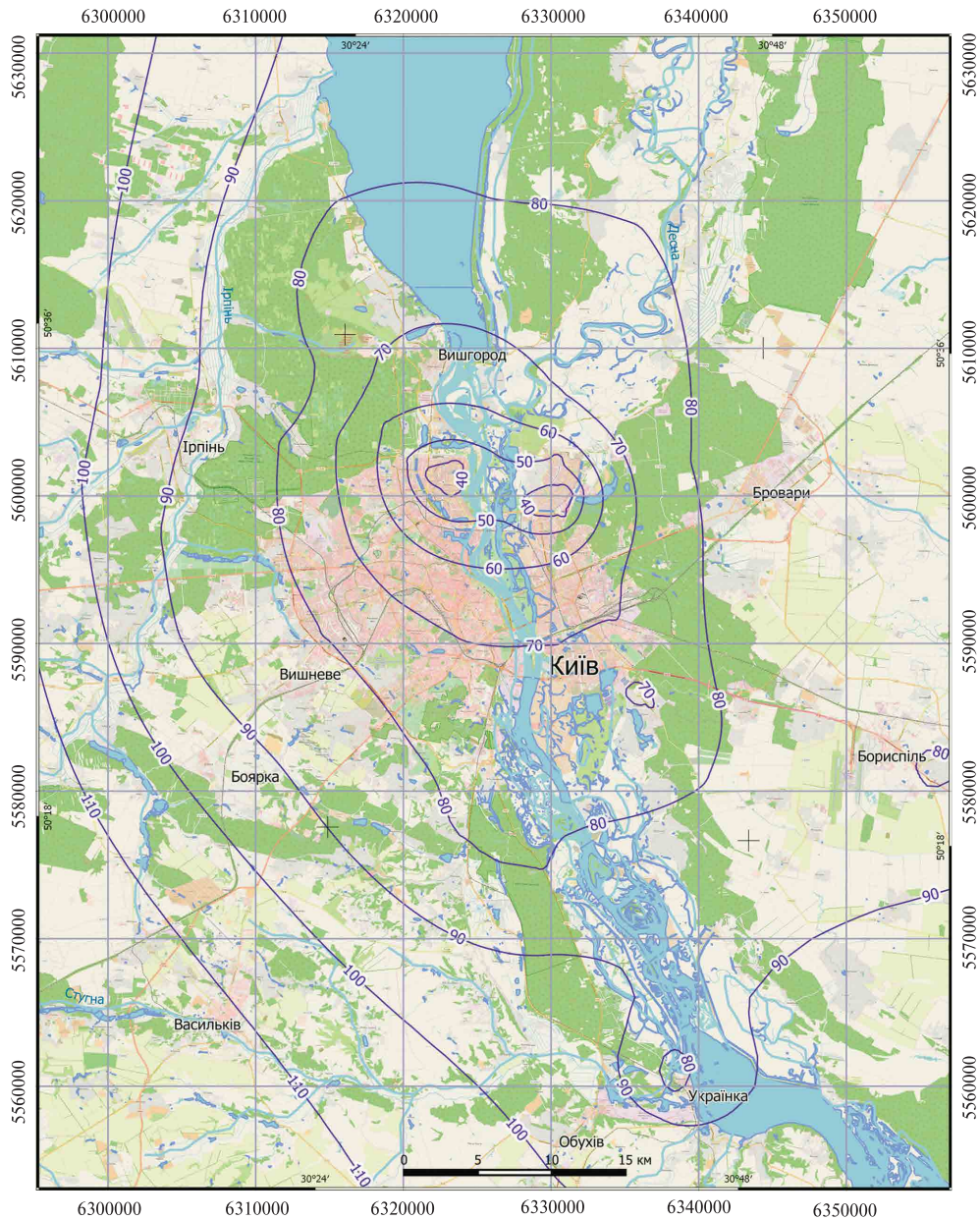


Рис. 5. Модельна карта гідроізоп'єз байоського водоносного горизонту за результатами розв'язання нестационарної оберненої задачі станом на січень 2017 р.

Fig. 5. Model map of the hydroisopiestic lines for the Bajocian aquifer based on the results of the transient inverse problem as of January 2017

делі заданням у річці підпертих рівнів з моменту заповнення водоймищ (Київського — з 1966 р., Канівського — з 1974 р.).

Гравітаційна та пружна водовіддачі відповідали даним, наведеним у таблиці.

Термін розв'язання епігнозної задачі склав 75 років, починаючи з 1943 р. (слабо порушений природний стан водообмінної системи) і закінчуючи 2017 р.

Дані по водовідбору підземних вод з водоносних комплексу та горизонту сеноман-келовейських і середньоюрських відкладів були враховані в повному обсязі. Зовнішні границі моделі не змінювались.

При розв'язанні зворотної нестационарної задачі використано метод багатоваріантного розрахунку. Якщо корегувалися гідрогеологічні параметри в ході її розв'язання, то повторю-



Рис. 6. Карта залишкових напорів над покрівлею сеноман-келовейського водоносного комплексу за результатами розв’язання першого варіанту прогнозу станом на 2043 р.

Fig. 6. Map of the residual heads above the top of the Cenomanian-Callovian aquifer based on the 1st scenario of the model forecast as of 2043

валося розв’язання стаціонарної задачі в природних умовах.

Оцінка розв’язання зворотної нестационарної задачі відбувалася за збігом модельних і натурних рівнів у контрольних точках, а також шляхом порівняння природних і модельних темпів зниження п’езометричних рівнів у спостережних свердловинах (рис. 3). На рисунку видно, що загальна тенденція відносно зміни

фактичних і модельних рівнів підземних вод збігається.

Що стосується балансових складових формування експлуатаційних запасів підземних вод продуктивних водоносних горизонтів (комплексів) станом на 2017 р. у порівнянні з природним режимом, то варто відмітити зростання залучення поверхневих вод на 56,0 тис. м³/добу і зменшення розвантаження підземних

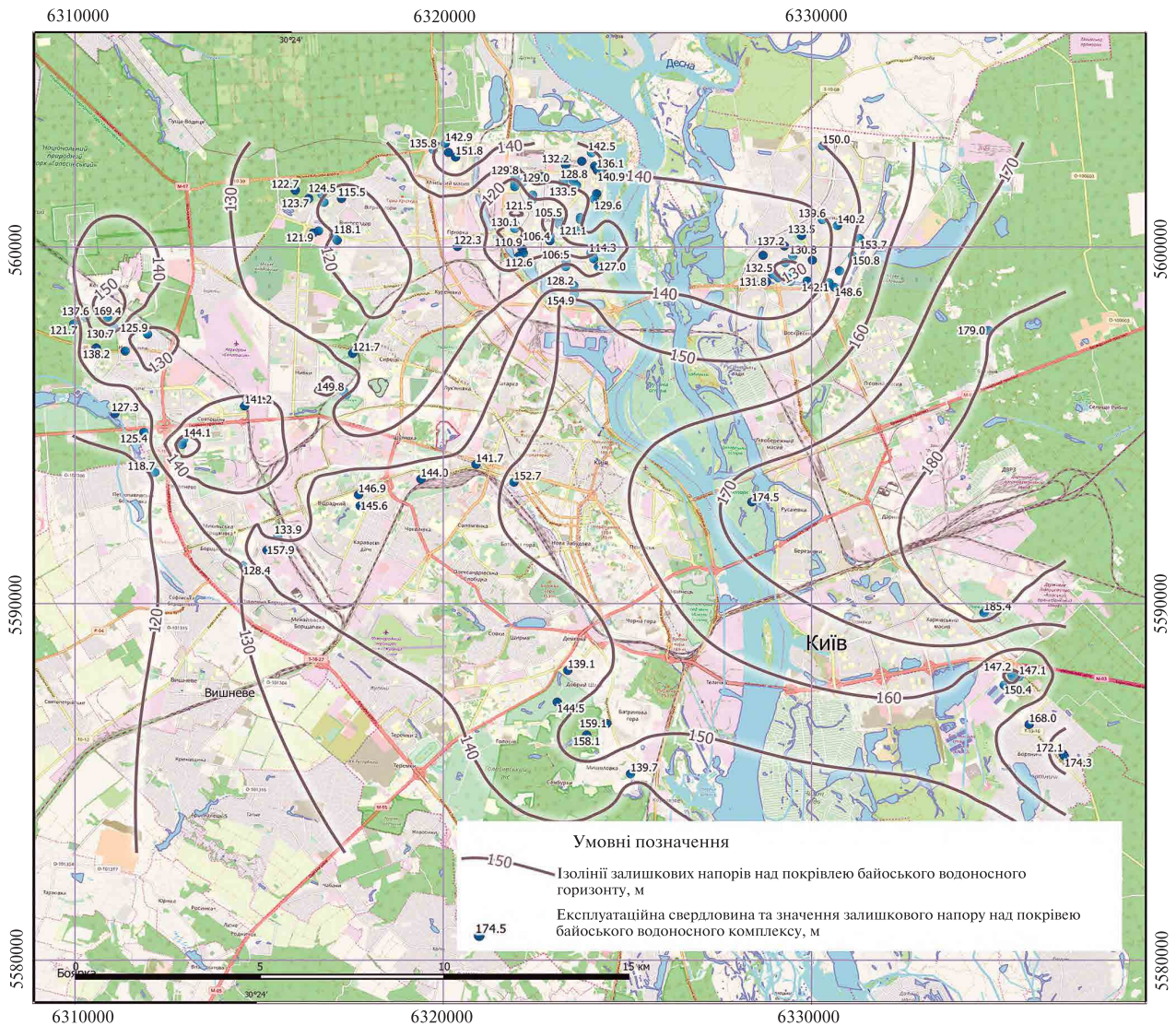


Рис. 7. Карта залишкових напорів над покрівлею байоського водоносного горизонту за результатами розв'язання першого варіанту прогнозної задачі станом на 2043 р.

Fig. 7. Map of the residual heads above the top of the Bajocian aquifer based on the 1st scenario of the model forecast as of 2043

вод в річки на 163,8 тис. м³/добу. При цьому перетікання з вищезалігаючих водоносних горизонтів у сеноман-келовейський водоносний комплекс збільшилося на 61,0 тис. м³/добу (у 1,5 рази), а розвантаження скоротилося на 53,0 тис. м³/добу (у 1,7 рази). У байоському водоносному горизонті спостерігалися такі ж самі процеси. Живлення горизонту збільшилося на 42,0 тис. м³/добу (у 3,3 рази), а розвантаження знизилося на 16,0 тис. м³/добу (у 9,4 рази).

За результатами розв'язання епігнозної задачі можна зробити такі висновки.

1. Територія м. Київ є наочним прикладом гідрогеологічного об'єкта, на який вплинув комплекс антропогенних факторів. Поява но-

вих джерел формування водообміну (водозаборів, гідротехнічних споруд і т. ін.) визначило зміну його структури, інтенсивності водообміну між водоносними горизонтами (комплексами), а також між підземними й поверхневими водами.

У сеноман-келовейському водоносному комплексі і байоському водоносному горизонті зміни умов водообміну зумовлені водовідбором підземних вод для господарсько-питних цілей і значно меншою мірою гідротехнічним будівництвом (у зонах гідравлічних «вікон»). Водовідбір підземних вод спричинив розвиток регіональної депресійної воронки в байоському водоносному горизонті й локальних воронок

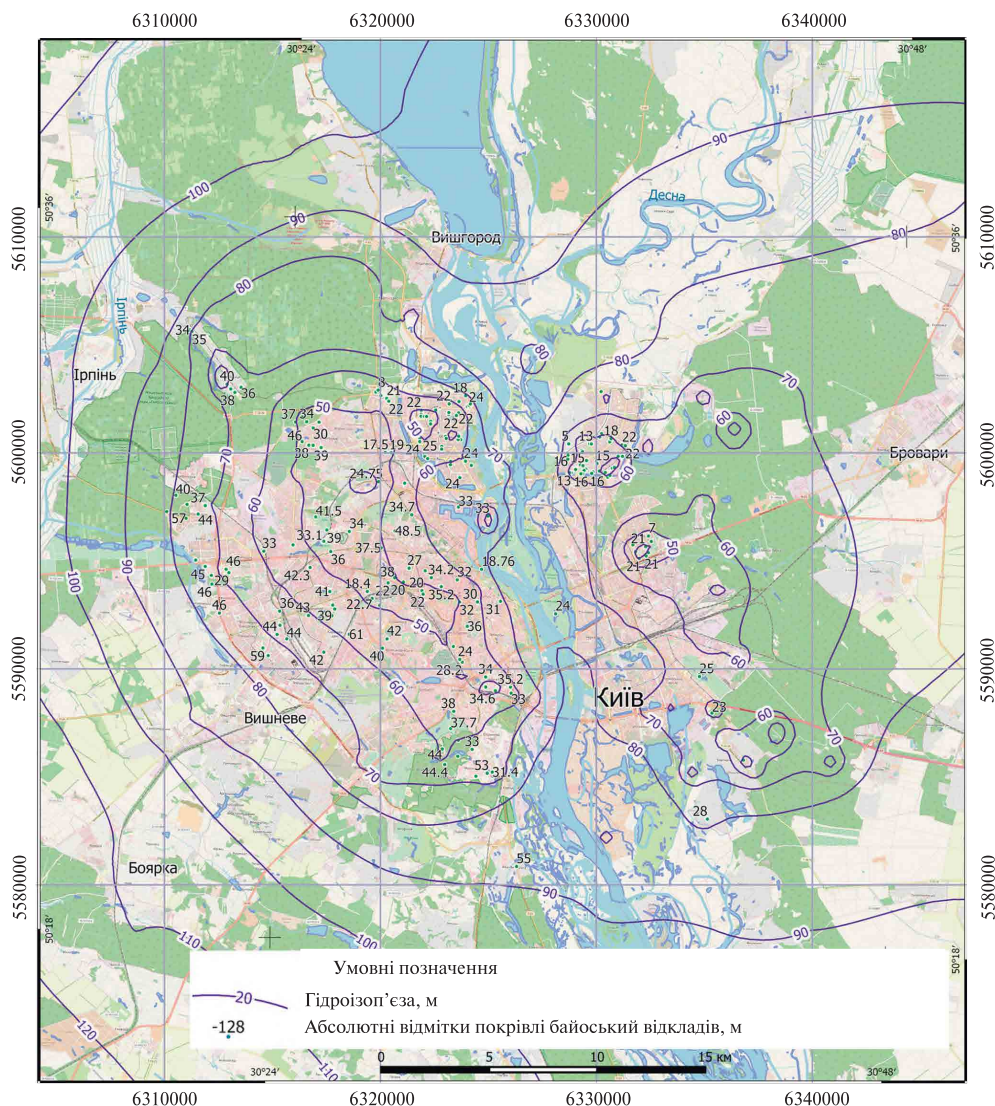


Рис. 8. Карта гідроізоп'єз сеноман-келовейського водоносного комплексу за результатами розв'язання другого варіанту прогнозу станом на 2043 р.

Fig. 8. Map of the hydroisopiestic lines for the Cenomanian-Callovian aquifer based on the results of the 2nd scenario of the model forecast as of 2043

(практично збігаючих з територією Києва) у сеноман-келовейському водоносному комплексі та певним чином у еоценовому водоносному горизонті. Відбулася інтенсифікація (іноді на порядок і більше) щодо природних умов перетікання між водоносними горизонтами й комплексами.

2. Експлуатаційні запаси підземних вод, що відбирали на водозабірних ділянках КПМА, станом на початок 2017 р. формуються за рахунок природних та залучених ресурсів, а також ємкісних запасів.

В першому від поверхні землі водоносному комплексі внаслідок інфільтрації атмосферних

опадів накопичується основна частина природних ресурсів, а в результаті припливу поверхневих вод — залучених ресурсів. У структурі водообміну задіяні також ємкісні запаси, однак частка їх незначна.

У нижчезалягаючих водоносних комплексах і горизонтах вертикальне перетікання через роздільні шари є основним чинником, що впливає на формування експлуатаційних запасів підземних вод.

3. Сформований на сьогоднішній день водовідбір і рівневий режим у багат шаровій системі водоносних горизонтів і комплексів території Києва (рис. 4, 5) дозволяє розглянути пи-

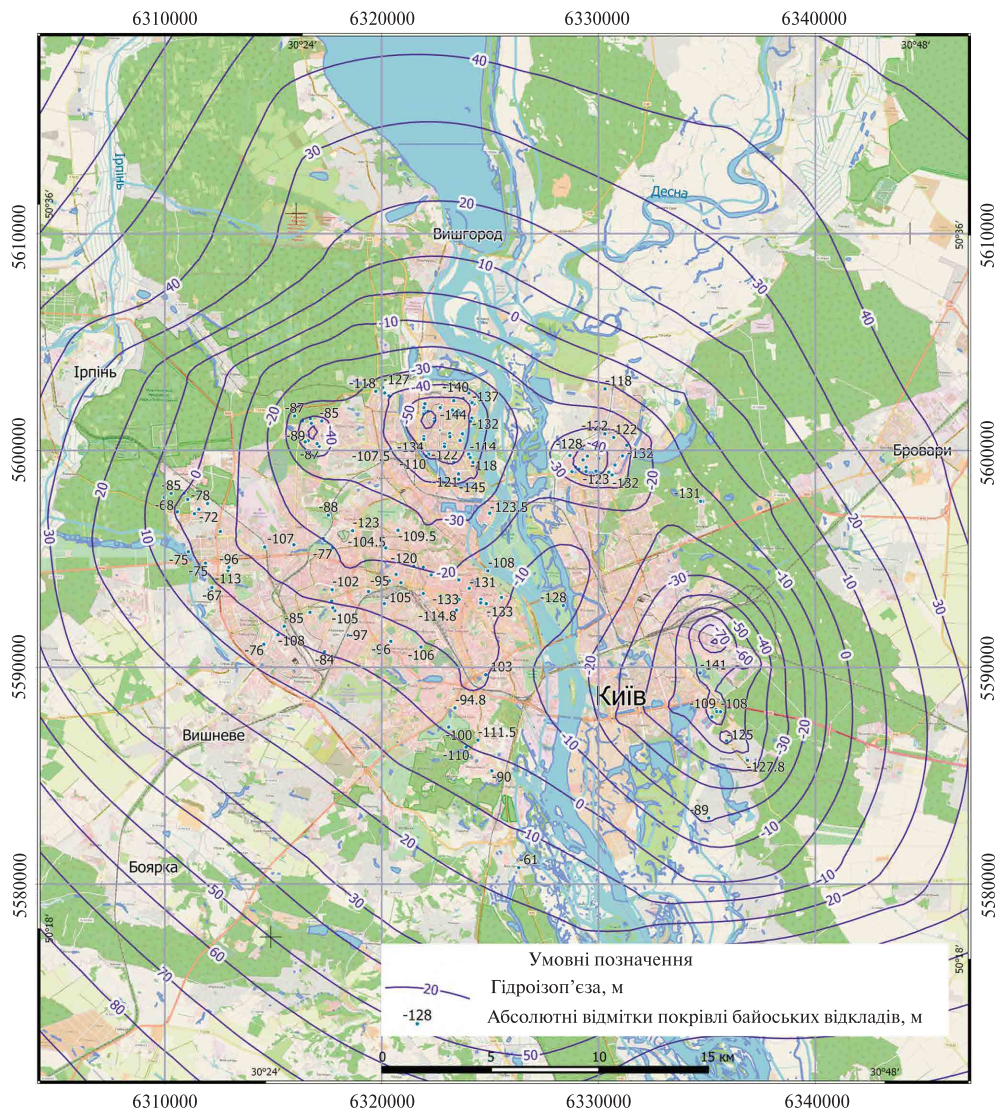


Рис. 9. Карта гідроізоп'єз байоського водоносного горизонту за результатами розв'язання другого варіанту прогнозу станом на 2043 р.

Fig. 9. Map of the hydroisopiestic lines for the Bajocian aquifer based on the results of the 2nd scenario of the model forecast as of 2043

тання щодо збільшення експлуатації підземних вод з метою централізованого водопостачання населення столиці України.

Прогнозне моделювання

При розв'язанні прогнозних задач на створеній геофільтраційній моделі з фільтраційними параметрами, отриманими при розв'язанні кінцевого варіанту епігнозу задачі, було розглянуто два варіанти водовідбору.

При реалізації першого варіанту прогнозу на моделі в межах КПМА була втілена сучасна заявка ПрАТ «АК «Київводоканал» (280 тис. м³/добу з сеноман-келовейського водоносного

комплексу і байоського водоносного горизонту), а також задані відомчі водозабори з навантаженням, що відповідають затвердженим експлуатаційним запасам. Крім того, на водозаборах, що працюють на незатверджених запасах, а також на тих, які працюють на затверджених запасах, але знаходяться за межами міської території столиці України, були задані водовідбори станом на 2017 р. Прогноз виконувався терміном на 25 років.

З отриманого рішення (рис. 6, 7) випливає, що при запланованій експлуатації підземних вод спостерігається значний запас знижень по обох продуктивних водоносних го-

ризонту і комплексу та їх виснаження не відбувається.

Представлені експлуатаційні запаси питних підземних вод по Київському родовищу (ділянка ПрАТ «АК «Київводоканал») були затверджені у травні 2019 р. у ДКЗ України (протокол № 4796 від 30.05.2019 р.).

При реалізації другого варіанту прогнозу на створеній моделі додатково задавався водовідбір, який відповідає всім затвердженим раніше експлуатаційним запасам підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу і байоського водоносного горизонту по «великим колодязям» КПМА та її околиць. Загалом водовідбір на моделі склав 720 тис. м³/добу.

Результати розподілу абсолютних позначок рівнів підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу і байоського водоносного горизонту, а також абсолютні позначки їх покрівлі показано на рис. 8 і 9. Як бачимо, і за умови реалізації всіх раніше затверджених запасів у межах КПМА вимога $S_{\text{мод.}} \leq S_{\text{доп.}}$ (моделне значення не перевищує гранично допустимого) витримується.

Загалом водообмін багат шарової водоносної системи, що розглядається, забезпечує формування експлуатаційних запасів підземних вод за рахунок природних та залучених ресурсів і меншою мірою ємкісних запасів у кількості 720 тис. м³/добу. При цьому ще маємо певний резерв щодо допустимих знижень.

Автори статті не підтримують політику керівництва ПрАТ «АК «Київводоканал», спрямовану на значне зменшення видобування підземних вод на водозаборах м. Київ (з 363 експлуатаційних свердловин понад половини вже законсервовані). Історично частка підземних вод у забезпеченні питного водопостачання населення Києва складала 30 % (Водообмен..., 2001). Зараз цей показник не перевищує 10 %. Враховуючи зростаюче забруднення поверхневих вод річок Дніпро та Десна (це два існуючих джерела водопостачання столиці України) безперечно слід робити акцент на видобуванні підземних вод.

На сьогоднішній день дослідження Київського родовища підземних вод тривають в рамках виконання держбюджетної тематики «Оцінка потенційних можливостей водовідбору для водопостачання населення і комплекс-

ного впливу експлуатації підземних вод на стан водообмінної системи (на прикладі Київського та Немирівського родовищ)».

Висновки

1. Створена гідрогеологічна модель КПМА дозволила адекватно відобразити особливості гідрогеологічних умов території досліджень, зокрема врахувати олігоцен-пліоцен-четвертинний водоносний комплекс, що надало змогу реалізувати змінні у часі умови живлення та розвантаження нижчезалегаючих водоносних горизонтів (комплексів). На попередніх моделях перетікання задавалося сталою величиною. Частково були уточнені гідрогеологічні параметри водозбагачених та роздільних шарів водообмінної системи, що вивчається. Насамперед це викликано різницею між темпом зниження та відновлення рівнів підземних вод у свердловинах, що спостерігалось при підвищенні та зниженні водовідбору на різних проміжках часу їх експлуатації.

2. Визначення чутливості моделі до зміни гідрогеологічних параметрів (імітаційне моделювання) показало дренажну роль річок на всю зону активного водообміну, а також максимальний вплив на амплітуду коливань рівнів підземних вод інтенсивності інфільтраційного живлення (передусім у межах вододілів). В областях розповсюдження гідравлічних «вікон» значно знижується реакція об'єданого водоносного комплексу на будь-які зміни гідрогеологічних параметрів.

3. Якість підземних вод, що видобуваються із сеноман-келовейського водоносного комплексу та байоського водоносного горизонту, відповідає встановленим нормативам. Слід лише мати на увазі, що в зоні розмивання київських мергелів (лівобережжя Дніпра) може відбуватися додаткове живлення підземних вод за рахунок штучних ресурсів (техногенні втрати з міських комунікацій), що несе загрозу негативного впливу на їх якість.

4. Річка Дніпро та Київське водосховище за роки інтенсивної експлуатації підземних вод перетворились на потужні додаткові (а подекуди й основні) джерела живлення останніх. Це можна розглядати як один із гарантованих чинників формування експлуатаційних запасів підземних вод.

5. Під впливом водовідбору відбулась значна інтенсифікація перетікання між водоносними горизонтами і комплексами, що вплинуло на проникність роздільних шарів і на швидкість відновлення рівнів за останні 20 років при значному зменшенні експлуатації підземних вод.

6. Згідно з усіма варіантами моделювання виснаження експлуатаційних запасів та природних ресурсів продуктивних водоносних горизонтів та комплексу не відбувається, залишається достатній резерв щодо допустимих знижень рівнів. При цьому нарощування водовідбору з байоського водоносного горизонту слід виконувати поступово з огляду на його порівняно уповільнене природне поповнення.

7. Проведене перезатвердження експлуатаційних запасів питних підземних вод Київського родовища із сеноман-келовейського водоносного комплексу і байоського водоносного горизонту в кількості 280 тис. м³/добу не ви-

черпує потенційних можливостей цих водоносних систем, що було доведено при виконанні прогнозного моделювання та підтверджено фактичними даними експлуатації цих горизонтів (комплексів) у 80-х роках минулого століття.

8. Незважаючи на вразливість поверхневих джерел водопостачання, висновок щодо переважачого використання підземних вод практично не реалізовується, що заперечує розробленій стратегії використання ресурсів питних підземних вод для водопостачання (Стратегія..., 2011).

Автори статті висловлюють щирі вдячність співробітникам Київської гідрогеологічної експедиції ДП «Українська геологічна компанія», зокрема начальнику експедиції О.П. Довженку та начальнику загону А.С. Федоренку, за підготовку фактичного матеріалу, який було використано при створенні гідрогеологічної моделі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Бабинец А.Е. Подземные воды юго-запада Русской платформы. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 378 с.
- Бабинец А.Е., Боровский Б.В., Шестопапов В.М. Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины. Киев: Наук. думка, 1979. 216 с.
- Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в естественных условиях. Шестопапов В.М., Лялько В.И., Огняник Н.С. и др.; Шестопапов В.М. (отв. ред.). Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.
- Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в нарушенных условиях. Шестопапов В.М., Огняник Н.С., Дробноход Н.И. и др.; Шестопапов В.М. (отв. ред.). Киев: Наук. думка, 1991. 528 с.
- Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Шестопапов В.М., Лялько В.И., Ситников А.Б. и др.; Шестопапов В.М. (отв. ред.). Киев: Карбон-Лтд, 2001. Т. 1. 397 с.
- Ковальов О.Б., Матвеев Г.Я., Пастухов В.В. Державна геологічна карта України. М-6 1:200 000. Аркуш М-36-ХІІІ (Київ). Київ: ПДРГП «Північгеологія», 2001.
- Копилова В.С., Руденко Ю.Ф. Звіт: Оцінка стану прогнозних ресурсів та експлуатаційних запасів підземних вод Київської і Чернігівської областей. Київ: ПДРГП «Північгеологія», 2007.
- Литвак Д.Р., Козьменко Г.А., Соловицкий В.Н. Отчет: Гидрогеологические условия и оценка эксплуатационных запасов подземных вод района г. Киева (по состоянию на 01.01.1972 г.). Киев: ГРГП «Севукргеология», 1972.
- Монастырский Г.Я., Филиппова Н.В., Желнова И.А., Федоренко А.С. Отчет о результатах работ по оценке изменения гидрогеологических условий в районе г. Киева под влиянием длительной эксплуатации подземных вод за 1983—1986 гг. Киев: ГРГП «Севукргеология», 1986.
- Нікіташ О.П., Лютий Г.Г., Шевчук О.І., Федоренко А.С. Звіт: Геолого-економічна оцінка Велико-Димерського родовища прісних підземних вод для господарсько-питного водопостачання заводу безалкогольних напоїв «Кока-Кола Беверіджиз Україна ЛТД» в Броварському районі Київської області за результатами детальної розвідки в 1999—2001 рр. (з підрахунком експлуатаційних запасів за станом на 01.10.2001 р.). Київ: ПДРГП «Північгеологія», 2001.
- Новиков В.Н., Кошман В.А. Отчет о детальной разведке подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Киева (участок Бортичи-I-II) за 1980—1984 гг. (с подсчетом эксплуатационных запасов на 01.06.1983 г.). Киев: ГРГП «Севукргеология», 1984.
- Новиков В.Н., Кошман В.А. Отчет о детальной разведке подземных вод для водоснабжения г. Киева (участки «Виноградарь» и «Десна») за 1976—1978 гг. (с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 01.12.1978 г.). Киев: ГРГП «Севукргеология», 1978.

- Расовський В.М. Звіт про гідрогеологічне довивчення масштабу 1:200 000 території аркушу М-36-ХІІІ (Київ). Київ: ПДРГП «Північгеологія», 2005.
- Руденко Ю.Ф., Гудзенко В.В., Богуславський А.С., Марковская А.Б., Капельцева Н.Б. Отчет: Оценить перспективы водоснабжения г. Киева и городов-спутников за счет подземных вод, разработать схему режимных наблюдений. Киев: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 1992.
- Руденко Ю.Ф., Негода Ю.О. Звіт: Переоцінка експлуатаційних запасів підземних вод Київської промислово-міської агломерації методом математичного моделювання. Київ: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 2018.
- Руденко Ю.Ф., Шестопалов В.М., Стеценко Б.Д., Негода Г.М., Макаренко О.М., Кухаренко Д.Є., Гураль О.В. Заключний звіт за результатами виконання наукової роботи «Полігонна оцінка природних і природно-антропогенних ресурсів підземних вод Дніпровсько-Донецької водоносної системи за 2010—2014 рр.». Київ: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 2014.
- Сапрыкин Ю.П., Руденко Ю.Ф. Отчет о проведенных работах по оценке возможных изменений гидрогеологических условий Днепровского артезианского бассейна при интенсивной эксплуатации подземных вод (территория деятельности ПГО «Севукргеология» за 1986—1990 гг.). Киев: ПГО «Геоинформ Украины», 1991.
- Стратегія використання ресурсів питних підземних вод для водопостачання: Ставицький Е.А., Рудько Г.І., Яковлев Є.О. (ред.). Чернівці: Букрек, 2011. Т. 2. 500 с.
- Швай Л.П. Подземные воды Донецко-Днепровской впадины в связи с нефтегазоносностью. Москва: Недра, 1973. 104 с.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф. Отчет: Разработка и передача для внедрения рекомендаций по расширению использования кондиционных подземных вод для питьевого водоснабжения. Киев: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 1995.
- Шестопалов В.М., Гудзенко В.В., Руденко Ю.Ф., Соболевский Э.Э., Богуславский А.С. Отчет о научно-исследовательской работе «Развитие региональных наблюдений и мониторинг радиоактивного и химического загрязнения подземных вод зоны влияния аварии. Оценка долгосрочного риска техногенного загрязнения подземных вод (заключительный)». Киев: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 1996.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф. Звіт про науково-дослідну роботу «Закономірності формування експлуатаційних ресурсів підземних вод схилів артезіанських басейнів (на прикладі водозаборів Києва, Мелітополя, Придніав'я)». Київ: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 2009.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Богуславський А.С. Отчет: Разработать радиогидрогеологический мониторинг и постоянно действующую гидрогеологическую модель г. Киева и его окрестностей. Оценить состояние и опасность радиоактивного загрязнения эксплуатационных ресурсов и действующих водозаборов подземных вод в районах основного переселения населения и обязательного радиоактивного контроля. Киев: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 1992.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф. Звіт про науково-дослідну роботу «Оптимізація системи водопостачання м. Києва за рахунок підземних вод (заключний)». Київ: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 2004.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Богуславський О.С. Звіт: Наукове обґрунтування управління ресурсами підземних вод Київської промислово-міської агломерації. Київ: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 2009.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Гураль О.В. Звіт: Практичне відпрацювання методики оцінки та прогнозу зміни складних гідрогеологічних та інженерно-геологічних процесів. Київ: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 2009.
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F. Radioactive contamination of groundwater within Kiev Conurbation. In: Shestopalov V. (Ed.), Chernobyl Disaster and Groundwater. Lisse/Abingdon/Exton/Tokio: A.A. Balkema Publ., 2002, pp. 101-132.

Надійшла до редакції 14.09.2021
Надійшла у ревізованій формі 19.10.2021
Прийнята 19.10.2021

REFERENCES

- Babinets, A.E. (1961). Groundwater in the south-west of the Russian platform. Kyiv: Izdatelstvo AN USSR (in Russian).
- Babinets, A.E., Borevsky, B.V., Shestopalov, V.M. (1979). Formation of the exploitable resources of groundwater in platform structures of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Kovalev, O.B., Matveev, G.Y., Pastukhov, V.V. (2001). State Geological Map of Ukraine. Scale 1:200 000. Sheet M-36-XIII (Kyiv). Kyiv: SE "Pivnichgeologiya" (in Ukrainian).
- Kopylova, V.S., Rudenko, Yu.F. (2007). Assessment of the state of groundwater prospective resources and exploitable reserves in Kyiv and Chernigiv regions. Kyiv: SE "Pivnichgeologiya" (in Ukrainian).
- Litvak, D.R., Kozmenko, G.A., Solovitskiy, V.N. (1972). Hydrogeological conditions and assessment of exploitable groundwater reserves in the Kiev area (as of 01.01.1972). Kyiv: PA "Sevukргеologiya" (in Russian)

- Monastyrsky, G.Y., Filippova, N.V., Zhelnova, I.A., Fedorenko, A.S. (1986). Report on the assessment of changes in hydrogeological conditions in the Kiev area under the influence of long-term groundwater extraction in 1983-1986. Kyiv: PA "Sevukrgeologiya" (in Russian).
- Nikitash O.P., Lyutyi, G.G., Shevchuk, O.I., Fedorenko, A.S. (2001). Geological and economic evaluation of Velika-Dymerka fresh groundwater field for domestic and drinking water supply to the "Coca Cola Beverages Ukraine LTD" soft drinks plant in Brovary district of Kyiv region based on detailed exploration in 1999-2001 (including exploitable reserves calculation as of 01.10.2001). Kyiv: SE "Pivnichgeologiya" (in Ukrainian)
- Novikov, V.N., Koshman, V.A. (1984). Report on detailed exploration of groundwater for domestic and drinking water supply to the city of Kyiv (Bortnichi I-II site) for 1980-1984 (including calculation of exploitable reserves as of 01.06.1983). Kyiv: PA "Sevukrgeologiya" (in Russian).
- Novikov, V.N., Koshman, V.A. (1978). Report on detailed exploration of groundwater for domestic and drinking water supply to the city of Kyiv (Vinogradar and Desna sites) for 1976-1978 (including calculation of exploitable reserves as of 01.12.1978). Kyiv: PA "Sevukrgeologiya" (in Russian).
- Rasovsky, V.M. (2005). Report on supplementary hydrogeological survey on a scale 1:200 000 for the area of the sheet M-36-XIII (Kyiv). Kyiv: SE "Pivnichgeologiya" (in Ukrainian).
- Rudenko, Yu.F., Gudzenko, V.V., Boguslavsky, A.S., Markovskaya, A.B., Kasteltseva, N.B. (1992). Report: To assess the prospects of groundwater supply in Kiev and satellite towns and develop a regime observations scheme. Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Russian).
- Rudenko, Yu.F., Negoda, Iu.O. (2018). Report: Reassessment of exploitable reserves of groundwater for the Kyiv urban-industrial agglomeration using mathematical modelling. Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Rudenko, Yu.F., Shestopalov, V.M., Stetsenko, B.D., Negoda, G.M., Makarenko, O.M., Kukhareno, D.E., Gural, O.V. (2014). Final report on the research work Assessment in the test site conditions of natural and natural-anthropogenic groundwater resources of the Dnieper-Donets aquifer system for 2010-2014. Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Saprykin, Y.P., Rudenko, Yu.F. (1991). Report on studies to assess possible changes in the hydrogeological conditions of the Dnieper artesian basin under intensive groundwater extraction (activity area of SA "Sevukrgeologiya" for 1986-1990). Kyiv: SRDE "Geoinform of Ukraine" (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Gudzenko, V.V., Rudenko, Yu.F., Sobolevsky, E.E., Boguslavsky, A.S. (1996). Report on research work Development of regional observations and monitoring over radioactive and chemical contamination of groundwater in the zone of accident impact. Assessment of long-term risk for anthropogenic contamination of groundwater. (Final). Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F. (1995). Report on research work: "Development and transfer for implementation of the recommendations on expanding the use of conditioned groundwater for drinking water supply". Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F. (2002). Radioactive contamination of groundwater within Kiev Conurbation. In: Chernobyl Disaster and Groundwater. Lisse/Abingdon/Exton/Tokio: A.A. Balkema Publ., pp. 101-132.
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F. (2004). Report on research work. Optimization of water supply system in the city of Kiev using groundwater (final). Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F. (2009). Report on research work Regularities of formation of exploitable groundwater resources in the slopes of artesian basins (taking Kyiv, Melitopol and Pridunavia groundwater intake structures as an example). Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F., Boguslavsky, A.S. (1992). Report: Development of radio-hydrogeological monitoring and permanently acting hydrogeological model for the city of Kiev and surroundings. Assessment of the state and risk of radioactive contamination of the groundwater exploitable resources and operating water intakes in areas of the main population resettlement and mandatory radiological control. Kyiv: Archives of Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F., Boguslavsky, O.S. (2009). Report: Scientific substantiation of groundwater resources management in Kyiv urban-industrial agglomeration. Kyiv: Archives of Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F., Gural, O.V. (2009). Report on research work "Practical improvement of methods to assess and forecast changes in complex hydrogeological and engineering-geological processes". Kyiv: Archives of the Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Shvay, L.P. (1973). Groundwater of the Dnieper Donets depression as related to oil-and-gas content. Moscow: Nedra (in Russian).
- Stavitskiy, E.A., Rudko, G.I., Yakovlev, E.O. (Eds.). (2011). Strategy for the use of drinking groundwater resources for water supply. Chernivtsi: Bukrek, vol. 2 (in Ukrainian).

Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine: Water exchange in natural conditions. Shestopalov V.M., Lyalko V.I., Ognyanik N.S. et al. (1989). Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).

Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine: Water exchange in disturbed conditions. Shestopalov V.M., Ognyanik N.S., Drobnokhod N.I. et al. (1991). Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).

Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine: Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster. Vol. 1. Shestopalov V.M., Lyalko V.I., Sitnikov A.B. et al. (2001). Kyiv: Karbon LTD (in Russian).

Received 14.09.2021

Received in revised form 19.10.2021

Accepted 19.10.2021

Yu.F. Rudenko¹, V.M. Shestopalov¹, Iu.A. Negoda^{1}, O.V. Gural¹*

¹ State Institution "Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

E-mail: rud@hydrosafe.kiev.ua

² Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: negoda@nas.gov.ua

* Corresponding author

ON THE RATIONAL USE OF EXPLOITABLE DRINKING GROUNDWATER RESERVES FOR WATER SUPPLY TO THE CITY OF KYIV

The influence of anthropogenic load within the Kyiv field of drinking groundwater has resulted in deformation of the water exchange structure and pattern. The main anthropogenic factors affecting water exchange include groundwater intake structures, reservoirs, as well as urban-industrial agglomerations. The paper presents a critical analysis of the previous hydrogeological models of the groundwater field under study, taking into account their shortcomings and using the most realistic solutions. New up-to-date hydrogeological model of the study area has been created. Simulation modelling was performed to determine the effects of hydrogeological parameters changes on the groundwater level position. Epignostic modelling allowed us to specify transmissivity of aquifers, specific permeability of confining beds and natural groundwater recharge, as well as to prove functional correspondence of the created model to natural-anthropogenic conditions. Exploitable reserves of drinking groundwater for the city of Kyiv were reassessed according to the current request of PJSC "AK" Kyivodokanal" and the potential of groundwater withdrawal was shown. Reserves calculated by method of mathematical modelling were approved by the State Committee of Reserves of Ukraine.

Keywords: *Kyiv field of drinking groundwater; hydrogeological model; exploitable reserves; hydrogeological conditions; forecast.*