

ПІДЗЕМНІ ВОДИ ТРІЩИНУВАТИХ КРИСТАЛІЧНИХ ПОРІД ЯК РЕЗЕРВНЕ ДЖЕРЕЛО ПИТНОГО ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІННИЦІ (УКРАЇНА)

В.М. Шестопапов¹, Б.Д. Стеценко², Ю.Ф. Руденко³

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

Доктор геолого-мінералогічних наук, професор, академік НАН України, директор.

² ДУ «Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України», Київ, Україна, E-mail: stecenko@hydrosafe.kiev.ua

Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник.

³ ДУ «Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України», Київ, Україна, E-mail: rud@hydrosafe.kiev.ua

Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора.

Показано можливість водопостачання Вінниці за рахунок тільки підземних вод тріщинуватих кристалічних порід докембрійського віку в разі виникнення надзвичайних ситуацій. Створено гідрогеологічну модель Вінницького родовища підземних вод. Уточнено гідрогеологічні параметри, граничні умови, структуру водообміну і джерела формування експлуатаційних запасів підземних вод тріщинуватих кристалічних порід. Проаналізовано вплив різних чинників на водозбагаченість тріщинуватих кристалічних порід. Визначено комплекс додаткових польових геологорозвідувальних робіт, які доцільно провести для вибору перспективних ділянок для закладання експлуатаційних свердловин. Вивчено можливість форсованої експлуатації підземних вод у залежності від тривалості надзвичайного періоду. Для забезпечення надійного водопостачання населення м. Вінниця як у штатному режимі, так і при можливих надзвичайних ситуаціях доцільно виконати комплекс необхідних робіт з відновлення водозаборів підземних вод.

Ключові слова: тріщинуваті кристалічні породи; підземні води; математичне моделювання; ресурси; забезпеченість; надзвичайний період; Вінницьке родовище підземних вод.

GROUNDWATER OF FRACTURED CRISTALLINE ROCK AS RESERVE SOURCE FOR POTABLE WATER SUPPLY TO VINNITSA (UKRAINE)

V.M. Shestopalov¹, B.D. Stetsenko², Yu.F. Rudenko³

¹ SI «Radioenvironmental Center of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine, E-mail: vsh@hydrosafe.kiev.ua

Doctor of geological and mineralogical sciences, professor, academician of NAS of Ukraine, director.

² SI «Radioenvironmental Center of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine, E-mail: stecenko@hydrosafe.kiev.ua

Candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher.

³ SI «Radioenvironmental Center of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine, E-mail: rud@hydrosafe.kiev.ua

Candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher, deputy director.

The paper shows the possibility of water supply to Vinnitsa using groundwater in fractured crystalline rocks of Precambrian age, in case of emergencies. Hydrogeological model of the Vinnitsa groundwater field has been created. Hydrogeological parameters, boundary conditions and water exchange mechanism, as well as sources of exploitable groundwater reserves formation in the fractured crystalline rocks were specified. The influence of various factors on the water content of the fractured crystalline rocks was studied. A set of additional field prospecting works necessary for siting of the production wells was determined. The possibility of groundwater exploitation in the forced regime depending on the length of emergency period was studied. To ensure reliable water supply to Vinnitsa both in normal operation and in emergency, it would be appropriate to conduct a set of necessary works to restore groundwater intake facilities.

Key words: groundwater; fractured crystalline rocks; mathematical modelling; resources; availability of groundwater reserves; emergency period; Vinnitsa groundwater field.

© В.М. Шестопапов, Б.Д. Стеценко, Ю.Ф. Руденко, 2018

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ТРЕЩИНОВАТЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД КАК РЕЗЕРВНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ВИННИЦЫ (УКРАИНА)

В.М. Шестопапов¹, Б.Д. Стеценко², Ю.Ф. Руденко³

¹ ГУ «Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины», Киев, Украина, E-mail: vsh@hydrosafe.kiev.ua

Доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик НАН Украины, директор.

² ГУ «Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины», Киев, Украина, E-mail: stecenko@hydrosafe.kiev.ua

Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.

³ ГУ «Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины», Киев, Украина, E-mail: rud@hydrosafe.kiev.ua

Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора.

Показана возможность водоснабжения Винницы за счет подземных вод трещиноватых кристаллических пород докембрийского возраста в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Создана гидрогеологическая модель Винницкого месторождения подземных вод. Уточнены гидрогеологические параметры, граничные условия, структура водообмена и источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод трещиноватых кристаллических пород. Проанализировано влияние различных факторов на водообильность трещиноватых кристаллических пород. Определен комплекс дополнительных полевых геологоразведочных работ, которые целесообразно провести для выбора перспективных участков и заложения эксплуатационных скважин. Изучена возможность форсированной эксплуатации подземных вод в зависимости от продолжительности чрезвычайного периода. Для обеспечения надежного водоснабжения населения г. Винница как в штатном режиме, так и при возможных чрезвычайных ситуациях целесообразно выполнить комплекс необходимых работ по восстановлению водозаборов подземных вод.

Ключевые слова: подземные воды; трещиноватые кристаллические породы; математическое моделирование; ресурсы; обеспеченность запасов подземных вод; чрезвычайный период; Винницкое месторождение подземных вод.

Вступ

Проблема забезпечення населення України якісною питною водою є соціально значущою, оскільки питна вода безпосередньо впливає на стан здоров'я громадян і слугує одним із визначальних чинників екологічної та епідеміологічної безпеки життєдіяльності людини.

Системи централізованого питного водопостачання багатьох міст України використовують повністю чи переважно поверхневі джерела – води Дніпра, Дністра, Південного Бугу, Сіверського Дінця та багатьох інших великих і малих річок України. Крім незадовільного сучасного екологічного стану, поверхневі джерела водопостачання вкрай вразливі у разі виникнення надзвичайних ситуацій природного чи техногенного походження. Це не тільки надвисокі повені, які призводять до виходу з ладу водозабірних систем, але і аварії на хімічних, нафтових підприємствах, АЕС, можливі руйнування дамб, водозаборів, водогонів тощо внаслідок диверсій.

Єдиним альтернативним джерелом водопостачання міського населення України в такому разі є напірні, захищені від прямих надходжень

забруднювальних речовин підземні води, які мають стабільний у часі хімічний склад, фізико-хімічні та мікробіологічні показники.

Недостатнє водопостачання населення з підземних джерел і дефіцит фінансових можливостей для розвитку водогосподарського комплексу України вимагають поступового, послідовного та системного впровадження основних положень Стратегії геологічного вивчення й використання ресурсів питних підземних вод для водопостачання.

Але на сьогоднішній день найактуальнішим завданням є розробка і термінове впровадження методичних засад і відповідних рекомендацій щодо надійного водопостачання населення міст питною водою високої якості під час можливих надзвичайних ситуацій.

Основні проблеми сучасного повномасштабного використання підземних вод для питного водопостачання населення України пов'язані з:

— недостатнім освоєнням розвіданих запасів і прогнозних ресурсів підземних вод для питного водопостачання населення;

— потенційною загрозою ускладнення санітарно-епідемічної ситуації в окремих регіонах країни через низьку якість питної води, в балансі якої переважають ресурси незахищених від техногенного забруднення поверхневих вод;

— потребою економічної оптимізації систем видобування підземних вод на діючих водозабірних спорудах для скорочення експлуатаційних витрат;

— необхідністю перегляду і вдосконалення законодавчих, нормативно-правових, нормативних актів, які регламентують або заохочують використання підземних вод для питного водопостачання населення;

— обмеженістю інвестицій та дефіцитом фінансових ресурсів, необхідних для геологічного вивчення і збільшення використання підземних вод питної якості.

Частково це стосується і створення системи спеціального водопостачання в умовах надзвичайних ситуацій.

Загальна кількість прогнозних ресурсів підземних вод використовується в Україні лише на 7%, а видобуток експлуатаційних запасів становить трохи більше 11% загальної кількості розвіданих запасів [Соболевский, 1978]. Аналіз наведених даних свідчить про значний потенціал організації системи водопостачання під час надзвичайних ситуацій. А для населених пунктів, що не мають розвіданих запасів підземних вод, необхідно провести їх виявлення, оцінювання, розвідку та освоєння. Тільки так може бути створена система надійного водопостачання населення захищеними підземними водами в умовах надзвичайних ситуацій (на випадок аварійного забруднення поверхневих джерел, руйнування магістральних каналів і водогонів та ін.).

Ця проблема є особливо нагальною, оскільки кількість, масштаби і ризики надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру поступово зростають. Для населених пунктів, що не мають розвіданих, надійно захищених від забруднення підземних джерел водопостачання, необхідно виконати відповідні пошуково-оцінювальні й розвідувальні роботи, причому за позитивних результатів підземні води слід використовувати і в штатний період. При цьому на ранніх стадіях геологорозвідувального процесу доцільно розглядати можливість як штатної, так і форсованої експлуатації підземних вод.

Особливо актуальним, враховуючи виклики сьогодення, є питання доведення наукових роз-

робок до рівня практичного використання. Наведемо на прикладі Вінницького родовища підземних вод авторський підхід до вирішення цього питання. Вибір даного родовища був обумовлений його знаходженням в межах Українського щита в області розвитку тріщинних вод докембрійських кристалічних порід, що в цілому обумовлює досить несприятливі умови формування і накопичення значних водних ресурсів.

Природні умови району досліджень

Вінницька область розташована в Лісостеповій зоні України.

Клімат помірно-континентальний. Річна кількість атмосферних опадів сягає 520-590 мм, 80% з яких випадає в теплий період.

Річкова мережа в районі Вінниці належить басейну Південного Бугу. Річки мають переважно снігове і дощове живлення і відносяться до типу долинних. Південний Буг є найбільшою річкою, що протікає по території Вінниці і поділяє її площу на дві частини. Модуль підземного стоку цієї річки в районі Вінниці в середньому становить 0,638 л/(с·км²) (Є.В. Косяк та ін., 1975), що відповідає інтенсивності інфільтраційного живлення підземних вод приблизно 20 мм/рік.

У геоструктурному плані територія досліджень знаходиться в межах Подільського блоку на південно-західній окраїні Українського щита. Цей блок складається з архей-протерозойських порід, побитих тектонічними розломами і тріщинами, які місцями утворюють скупчення в межах вузьких (200-600 м) або більш широких (до 2000 м) протяжних ділянок, перспективних для видобування підземних вод (найбільш продуктивні свердловини промислових підприємств Вінниці приурочені до них).

На докембрійському фундаменті території досліджень залягає малопотужний осадовий чохол, представлений піщано-глинистими породами переважно неоген-четвертинного віку. На вододілах у невеликих западинах фундаменту трапляються також осадові відклади палеогенового віку.

В районі досліджень Південний Буг розтинає осадовий чохол і кору вивітрювання фундаменту до масивних кристалічних порід. В долинах інших річок осадовий чохол теж значною мірою розмитий річковими потоками і має малу потужність.

Кора вивітрювання кристалічних порід фундаменту, яка представлена слюдистими глинами, первинним каоліном та жорсткою, розповсюджена майже всюди, за винятком прируслової

частини Південного Бугу, і відіграє роль роздільного слабо проникного шару між поверхово розташованими водоносними комплексами в палеоген-неоген-четвертинних відкладах і в зоні підвищеної тріщинуватості докембрійських кристалічних порід, через що останній є, в основному, напірним (Д.Р. Литвак та ін., 1969; Є.В. Косяк та ін., 1975; Л.В. Бердак, 2013). Напори в середньому сягають 15 м, інколи — 30 м.

Осадовий чохол на території Вінниці та її околиці маловодний (Є.В. Косяк та ін., 1975) і, до того ж, незахищений від можливого забруднення з поверхні землі, через що промислово не експлуатується.

Водозабезпечення Вінниці

Джерелом централізованого питного водозабезпечення населення Вінниці є поверхневі води Південного Бугу.

Підземні води в Вінниці використовуються з кінця 60-х років минулого століття промисловими підприємствами. Експлуатуються підземні води зони підвищеної тріщинуватості докембрійських кристалічних порід.

За результатами пошукових робіт (Є.В. Косяк та ін., 1975) приблизно чотири з десяти розвідувальних свердловин (38%) виявились непридатними для видобування води через занадто малі питомі дебіти. Це свідчить про високий рівень неоднорідності гідрогеологічних умов формування експлуатаційних ресурсів підземних вод докембрійського водоносного комплексу на відносно невеликій площі.

Ще у 1975 р. на території Вінниці діяли 62 безсистемно розташовані свердловини з загальним дебітом 8600 м³/добу (Є.В. Косяк та ін., 1975). Тоді на правобережній частині міста свердловинами видобувалось близько 2500 м³/добу, а на лівобережній – 6100 м³/добу. Більшу частину загального видобутку лівобережжя (4400 м³/добу) забезпечували сім свердловин з дебітами 500-1000 м³/добу, що розташовані в межах Вінницької перспективної ділянки, яка у вигляді смуги шириною 200-600 м простягається від Південного Бугу в центрі Вінниці до східного краю міста. За декілька років їх експлуатації зниження рівнів підземних вод у свердловинах досягли 15-17 м і стабілізувались. Решта свердловин мала дебіти 10-100 м³/добу.

Починаючи з 90-х років ХХ ст. видобуток підземних вод на підприємствах м. Вінниця значно знизився. За даними ДНВП «Геоінформ

України» з 2001 по 2014 р. він коливався в межах 1450-2450 м³/добу.

Зважаючи на те, що найбільші дебіти експлуатаційних свердловин можна очікувати в межах двох перспективних ділянок, виявлених під час комплексних пошукових робіт на підземні води (Є.В. Косяк та ін., 1975), наші дослідження стосувалися саме цих ділянок. Крім Вінницької ділянки на лівобережжі Південного Бугу, була розвідана Пирогівська ділянка на правобережжі, яка простягається широкою смугою (до 2 км) від центра Вінниці вздовж Вишенських озер до західної околиці міста.

Зазначимо, що детальна інформація про конструктивні особливості існуючих експлуатаційних свердловин, за винятком св. 1551(2) та св. 337(1), відсутня. Ми зробили припущення, що проектними свердловинами буде розкрита повна ефективна потужність зони підвищеної тріщинуватості. Тоді допустиме зниження підземних вод буде складатися з існуючого напору над покрівлею докембрійських порід і половини ефективної потужності зони їх підвищеної тріщинуватості.

За даними попередніх досліджень потужність зони підвищеної тріщинуватості докембрійських порід Українського щита зазвичай сягає 30-50 м, але іноді може перевищити 150 м. В сенсі формування фільтраційних і колекторських властивостей тріщинуваті кристалічні породи водоносні тільки у верхній частині зони тріщинуватості, а з глибиною їх водопроникність значно зменшується і відносно мало впливає на дебіт свердловин.

Так, на прикладі експлуатаційних св. 1515(2) та св. 337(1) (Л.В. Бердак, 2013), розташованих на правобережжі Південного Бугу в межах ділянки кристалічних порід з порівняно малим розвитком розривної тектоніки, за даними коротких досліджень зона припливу основного об'єму води в експлуатаційні свердловини становить перші 8-10 м від поверхні масивних кристалічних порід, розкритих цими свердловинами до глибини понад 100 м. В інших експлуатаційних свердловинах, зокрема, розташованих в межах Вінницької і Пирогівської перспективних ділянок, приурочених до тектонічних розломів, ефективна потужність зони підвищеної тріщинуватості може бути в декілька разів більшою. На це непрямо вказують значно більші питомі дебіти свердловин на цих ділянках (Є.В. Косяк та ін., 1975).

Через відсутність фактичних даних про глибини існуючих експлуатаційних свердловин і зону тріщинуватості кристалічних порід у межах Вінницької і Пирогівської перспективних ділянок експериментально-розрахункові дослідження проведені нами з різною ефективною потужністю зони тріщинуватості (10-50 м).

За існуючої норми водопостачання міст з централізованою подачею гарячої води на одну людину передбачена витрата 0,22 м³/добу. Наразі населення Вінниці налічує 390 тис. осіб. Тобто потрібно поставляти 85-86 тис. м³/добу питної води на все місто.

Звісно, збільшити при цьому видобуток підземних вод з 8,6 тис. м³/добу, що колись відбиралися, до 85-86 тис. м³/добу в сталому режимі фільтрації на необмежений термін не реально. Але через інерцію процесу зниження рівнів підземних вод можна спробувати забезпечити необхідний приріст загального дебіту експлуатаційних свердловин на деякий час в несталому режимі фільтрації.

Щоб з'ясувати, на який термін мережа експлуатаційних свердловин на перспективних ділянках Вінниці спроможна забезпечити видобуток прісної підземної води до 86 тис. м³/добу, були виконані експерименти на чисельній математичній моделі підземної гідросфери цього міста та прилеглої до нього території.

Гідрогеологічна модель району досліджень

Застосований в даних дослідженнях метод чисельного математичного моделювання ґрунтується на розв'язанні системи диференціальних рівнянь фільтрації підземних вод у часткових похідних (1), яка в даних дослідженнях описує рух підземних вод у поверхово розташованих один над одним двох водоносних шарах з роздільним відносно водотривким шаром між ними.

Ця система рівнянь з розподіленими параметрами враховує передумови Дюпюї і Мятієва-Грінського про правомірність спрощеного характеру руху підземних вод при певному співвідношенні між значеннями коефіцієнтів фільтрації порід шарів, що залягають поверхово один над одним. Так, якщо відношення між значеннями коефіцієнтів фільтрації порід сусідніх шарів перевищує 20-30, то напрямку руху підземних вод в шарі з більшим значенням коефіцієнта фільтрації можна вважати тільки горизонтальним, а цей шар порід – водоносним; напрямку руху підземних вод у шарі з меншим

значенням коефіцієнта фільтрації можна вважати тільки вертикальним, а цей шар порід – відносно водотривким.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[(km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] + \left(\frac{k_0}{m_0} \right)_{1,2} (H_1 - H_2) + W = \mu_1 \frac{\partial H_1}{\partial t}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[(km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial y} \right] + \left(\frac{k_0}{m_0} \right)_{1,2} (H_2 - H_1) = \mu_2 \frac{\partial H_2}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

де H_1 і H_2 – абсолютні позначки рівнів підземних вод у 1- та 2-му водоносних горизонтах, м;
 km_1 і km_2 – коефіцієнти водопровідності порід у 1- та 2-му водоносних горизонтах, м²/добу;

$(k_0/m_0)_{1,2}$ – питома проникність відносно водотривкого шару між 1- і 2-м водоносними горизонтами, де k_0 і m_0 – водопроникність (в м/добу) і потужність (в м) порід роздільного слабо проникного шару, добу⁻¹;

W – інтенсивність інфільтраційного живлення підземних вод, м/добу;

m_1 і m_2 – коефіцієнти водовіддачі порід 1- і 2-го водоносних шарів.

Зв'язок поверхневих вод річкової мережі з підземними водами на моделі імітувався за допомогою граничної умови (ГУ) 3-го роду ($q = f(\Delta H)$, де q – інтенсивність водообміну між річкою і шаром водоносних порід, що залягає безпосередньо під нею; $f(\Delta H)$ – задана залежність від різниці між позначками рівнів води в річці і водоносному шарі безпосередньо під нею).

Дебіти експлуатаційних свердловин задавали за допомогою ГУ 2-го роду ($Q = \text{const}$), де Q – дебіт свердловини.

На контурі області моделювання задавали ГУ 2-го роду ($Q = 0$). Для мінімізації консервативності впливу цієї границі на результати експериментів в область моделювання, крім Вінниці, увійшла також прилегла територія, яка набагато перевищує площу цього міста.

В даних дослідженнях згадану систему диференціальних рівнянь в скінченнорізницевою вигляді розв'язували за допомогою комп'ютерної програми MODFLOW з пакету PMWIN [Chiang and Kinzelbach, 2001]. Для цього область моделювання була попередньо поділена квадратною сіткою на розрахункові блоки розміром 250×250 м.

Для параметричного наповнення моделі були використані схеми водопровідності порід палеоген-неоген-четвертинного (km_1) і докембрійського (km_2) водоносних комплексів, взяті з попередніх пошукових і розвідувальних робіт (Є.В. Косяк та ін., 1975; Л.В. Бердак, 2013).

В межах Вінниці та її околиці значення водопровідності порід палеоген-неоген-четвертинного водоносного комплексу коливаються від одиниць до декількох десятків м²/добу. Більші значення водопровідності характерні для лівобережжя Південного Бугу, де загальна потужність осадового чохла більша.

Точкові значення водопровідності порід докембрійського водоносного комплексу, визначені за даними відкачок з свердловин, оцінювали в основному за формулою: $km = 130 q$, де km – точкове значення водопровідності порід, м²/добу; q – питомий дебіт свердловини, дм³/с. Значно рідше цей параметр оцінювався за графіками часового простеження.

Фонові значення водопровідності тріщинуватих докембрійських порід невеликі і не перевищують кілька одиниць м²/добу, в середньому 2-3 м²/добу. На Вінницькій і Пирогівській перспективних ділянках значення цього геофільтраційного параметра значно більші, часто досягаючи кілька десятків, а то і більше сотні м²/добу, в середньому 20-40 м²/добу.

Значення питомої проникності (k_0/m_0) роздільного шару між вищезгаданими водоносними комплексами (кора вивітрювання з середньою потужністю 10-15 м при коефіцієнті фільтрації порід, що її складають, $n \cdot 10^{-2}$ м/добу) на моделі задавали одним числом $0,001^{-1}$ м/добу.

Значення коефіцієнтів водовіддачі порід водоносних шарів на моделі для кожного з них задавали одним числом. Для осадового чохла $m_1 = 0,2$; для кристалічних порід фундаменту $m_2 = 0,01$. Обидва значення є типовими для гравітаційної водовіддачі осадових і кристалічних порід, хоча докембрійський водоносний комплекс є напірним. Для шару докембрійського водоносного комплексу гравітаційна водовіддача була прийнята через планування зниження рівнів підземних вод в цьому комплексі нижче його покрівлі, принаймні до половини ефективної потужності зони тріщинуватості.

Через брак фактичних даних про питому фільтраційну проникність шару руслових відкладів в річкових розрахункових блоках моделі цей параметр задавали одним числом, дорівнюючим $0,025^{-1}$ м/добу. Ця величина за визначенням є відношенням коефіцієнта фільтрації руслових відкладів до її потужності, яка в малих річках зазвичай в середньому сягає 1 м. Для визначення узагальненого коефіцієнта фільтрації руслових відкладів річок на території моделю-

вання була використана його усереднена величина для суглинків (0,025 м/добу) з діапазону 0,1-0,01 м/добу.

Щодо значень інфільтраційного живлення, то виходячи з матеріалів Г.Г. Лютого (2003), Е.Е. Соболевського, Н.В. Цупко (1978), модуль середньорічного стоку річок району досліджень 90%-ї забезпеченості змінюється від 0,51 до 0,7 дм³/с·км², що відповідає інфільтраційному живленню 16,0-22,0 мм/рік. Ці значення дуже близькі до значень модуля підземного стоку в річки 50%-ї забезпеченості району робіт, що сягає 0,638 дм³/с·км² (Є.В. Косяк, 1975; Д.Р. Литвак, 1969) і відповідає інтенсивності фільтраційного живлення, що дорівнює 20 мм/рік. Останнє і було прийняте за початкове при розв'язанні обернених модельних задач.

Результати моделювання

Уточнення гідрогеологічних параметрів і граничних умов, а також структури водообміну в межах м. Вінниця в природних і порушених умовах виконано в процесі розв'язання обернених задач.

Моделювання з відображенням природних умов показало прийнятний збіг модельних і фактичних даних як за рівнями підземних вод, приурочених до докембрійських кристалічних порід (рис. 1), так і за значенням модулю підземного стоку в річки 50%-ї забезпеченості (0,638 дм³/с·км² – фактичний, 0,654 дм³/с·км² – модельний).

Аналіз модельної карти гідроізогіпс (гідроізоп'ез) водоносного горизонту, приуроченого до тріщинуватих кристалічних порід докембрію, свідчить про те, що режим рівнів підземних вод цілком визначається характером орогідрографії району досліджень. Основний напрямок руху природного потоку орієнтований по нормалі до Південного Бугу. Разом з тим річки більш низького порядку (Десна, Рівець, Рів, Згар та ін.) також мають вплив на водоносний горизонт, що вивчається. Живлення горизонту здійснюється на вододільних просторах та їх схилах. Максимальні п'езометричні позначки підземних вод докембрійського водоносного горизонту сягають на вододілах трохи більше від 290 м, мінімальні – менш за 240 м (у долинах річок).

Природні ресурси області, яка моделюється, що формуються за рахунок місцевого інфільтраційного живлення, одночасно являють собою

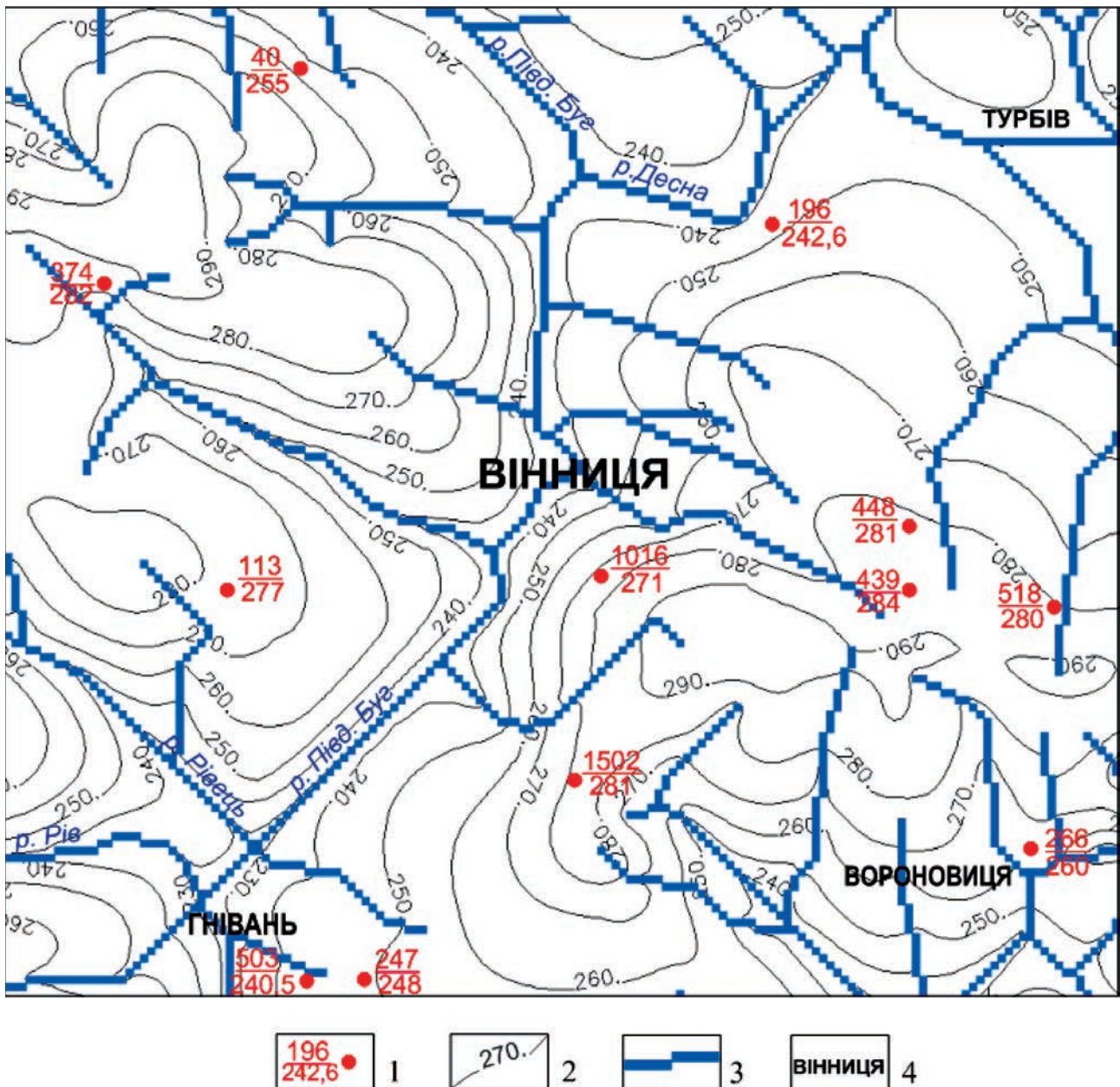


Рис. 1. Модельна схема гідроізогіпс (гідроізоп'ез) докембрійського водоносного комплексу в природних умовах 1 – спостережна свердловина; цифри: зверху – номер свердловини, знизу – фактична позначка рівня підземних вод у свердловині, м; 2 – гідроізогіпса (гідроізоп'еза), м; 3 – модельна річка; 4 – населений пункт

Fig. 1. Model scheme of water table (piezometric head) contours in the Precambrian aquifer complex under natural conditions

1 – observation well; figures: above – well number, below – actual elevation of groundwater level in the well, m; 2 – water table (piezometric head) contour, m; 3 – model approximation of the river; 4 – urban settlement

і ресурси першого від поверхні водоносного комплексу, приуроченого до палеоген-неоген-четвертинних відкладів, з якого транзитом надходить місцеве інфільтраційне живлення до докембрійського водоносного горизонту.

Балансові розрахунки живлення палеоген-неоген-четвертинного водоносного комплексу показали, що на 68% воно відбувається внаслідок

інфільтрації атмосферних опадів, на 19,5% – у результаті перетікання з докембрійського водоносного комплексу і на 12,5 – внаслідок живлення з річок.

Розвантаження цього комплексу відбувається переважно в поверхневій водотоки (80,6%), а також у нижчезалягаючий водоносний горизонт (19,4%).

Структура водообміну докембрійського водоносного комплексу на 100% пов'язана з взаємодією з вищезалігаючим палеоген-неоген-четвертинним водоносним комплексом. Результати розв'язання оберненої стаціонарної задачі для природних умов досліджуваної території дозволили встановити природні ресурси підземних вод, їх розподіл по площі та водоносних горизонтах (комплексах), а також структуру й інтенсивність водообміну.

Уточнення формування водообміну в межах Вінницького родовища підземних вод за умов антропогенного впливу, викликаного експлуатацією докембрійського водоносного комплексу, проведено в процесі розв'язання оберненої епігнозної задачі станом на 1975 р. Вибір цього відрізка часу пояснюється максимальним водовідбором (8600 м³/добу), який був досягнутий на промислових підприємствах м. Вінниця.

Як початкові умови використовували збалансоване розв'язання зворотної стаціонарної задачі в природних умовах.

Отримана на моделі схема рівнів підземних вод докембрійського водоносного комплексу (рис. 2) показала, що зниження рівнів підземних вод в експлуатаційних свердловинах досягли приблизно 15 м, а воронка депресії поширилась на невелику площу, що відповідає фактичним даним і було встановлено ще авторами попередніх пошукових робіт (Є.В. Косяк та ін., 1975).

Таке ж саме площинне поширення має і депресійна воронка, що утворилася в палеоген-неоген-четвертинному водоносному комплексі. Тільки зниження в її межах приблизно на 30% менші, ніж у водоносному комплексі, що приурочений до докембрійських тріщинуватих порід.

Структура водообміну в межах Вінницького родовища при експлуатації свердловин, облаштованих на докембрійський водоносний комплекс, зазнала певних змін. Це пов'язано з формуванням складових, які забезпечують водовідбір із докембрійського водоносного комплексу в кількості 8600 м³/добу.

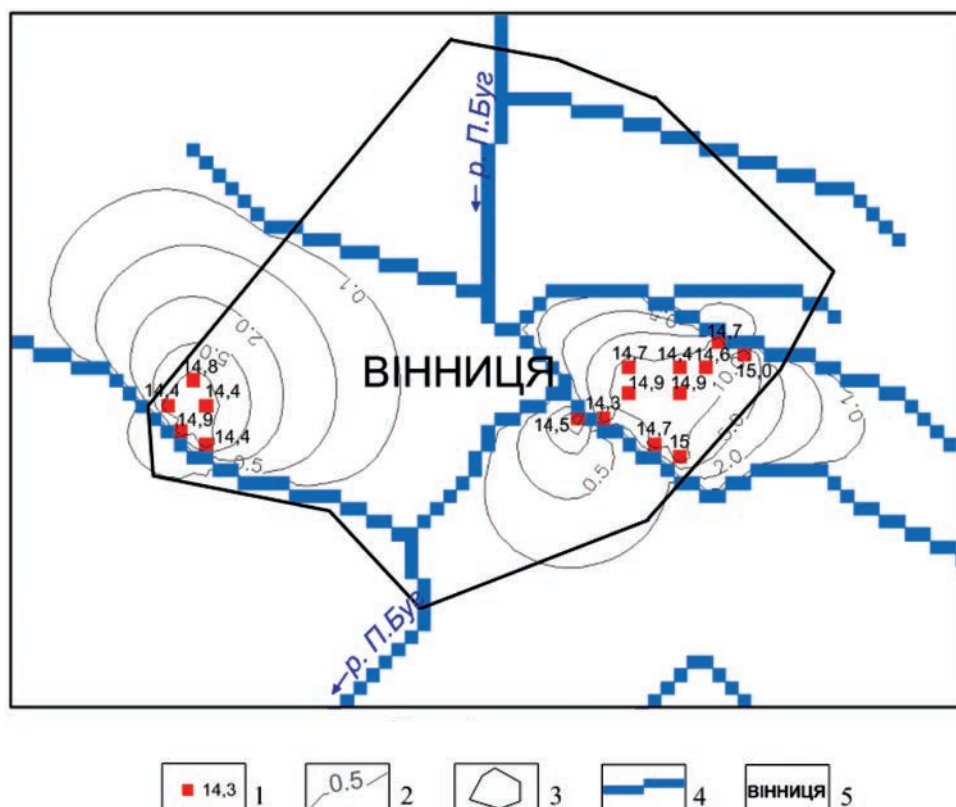


Рис. 2. Модельна схема знижень рівнів підземних вод докембрійського водоносного комплексу станом на 1975 р. 1 – експлуатаційна свердловина і зниження рівня підземних вод; 2 – лінія однакових знижень рівнів підземних вод; 3 – схематичні межі Вінниці; 4 – модельна річка; 5 – населений пункт

Fig. 2. Model scheme of the groundwater level drawdown in the Precambrian aquifer complex, as of 1975. 1 – production well and drawdown value, m; 2 – line of equal drawdown, m; 3 – schematic boundaries of Vinnytsia; 4 – model approximation of the river; 5 – urban settlement

Живлення підземних вод палеоген-неоген-четвертинного водоносного комплексу з річок зросло на 33,6%, а розвантаження в річки зменшилося на 4,4%. Перетікання з водоносного комплексу, приуроченого до осадових порід, у докембрійський водоносний комплекс підвищилося на 29,3%, за рахунок чого і були забезпечені експлуатаційні запаси підземних вод останнього.

В першому від поверхні водоносному комплексі внаслідок природної інфільтрації атмосферних опадів формується основна частина природних ресурсів, а в результаті припливу поверхневих вод – залучених ресурсів.

У докембрійському водоносному комплексі вертикальне перетікання через роздільний шар кори вивітрювання є основним чинником, що впливає на формування експлуатаційних ресурсів підземних вод.

Сформований на сьогоднішній день водовідбір і режим підземних вод у системі поверхово залягаючих водоносних комплексів території м. Вінниця дозволяє розглянути питання щодо альтернативного поверхневим водам р. Південний Буг джерела водопостачання населення в разі виникнення надзвичайних ситуацій.

Передбачається, що у випадку нагальної тимчасової потреби у заміні джерела питної води з приводу природного або техногенного забруднення поверхневих вод у районі Вінниці для водопостачання населення міста можна було б використати підземні води докембрійського водоносного комплексу за допомогою існуючих і нових водозабірних свердловин.

Спочатку вирішувалося питання щодо можливого максимального водовідбору при збереженні сталого режиму фільтрації. За граничне допустиме зниження ми прийняли $S_{\text{доп.}} = 30$ м (середній напір над покрівлею докембрійських порід плюс половина ефективної потужності тріщинуватої зони).

На моделі був підібраний такий дебіт свердловин, який задовольняв вищевикладені умови. Загалом, прогнозний водовідбір сягав 15 800 м³/добу (4400 м³/добу на правобережжі Південного Бугу та 11 400 м³/добу на лівобережжі). У порівнянні з модельною схемою ізознижень при водовідборі 8600 м³/добу вдвічі зросли зниження в центрах депресійних воронок лівобережжя та правобережжя Південного Бугу і відповідно в 1,4 та 2,4 – їх площі.

Щодо змін у структурі водообміну, то у зв'язку з підвищенням водовідбору з 8,6 тис. м³/добу

до 15,8 тис. м³/добу в межах докембрійського водоносного комплексу, приуроченого до тріщинуватих кристалічних порід, в 1,25 раза зріс перетік з вищезалігаючого водоносного комплексу та в 1,3 раза підвищилось живлення з річок. Тобто, зросли залучені ресурси. Зауважимо при цьому, що зниження рівня підземних вод докембрійського водоносного комплексу під річками не перевищило 0,6 м, і їх гідралічний зв'язок зберігся.

У подальшому експерименти на чисельній математичній моделі Вінницького родовища виконували з урахуванням несталого режиму фільтрації і мали за мету встановлення можливого терміну експлуатації прогнозного водозабору в залежності від його навантаження, аж до задекларованої потреби 86,0 тис. м³/добу при збереженні умови $S_{\text{доп.}} = 30$ м.

На рис. 3 демонструється залежність терміну (T) дії Вінницького водозабору підземних вод з загальним дебітом 86,0 тис. м³/добу від максимального допустимого зниження рівнів підземних вод (S) в експлуатаційних свердловинах зони підвищеної тріщинуватості докембрійських кристалічних порід. В цілому вона має вигляд лінійної функції $T = 3,6 S - 58,0$.

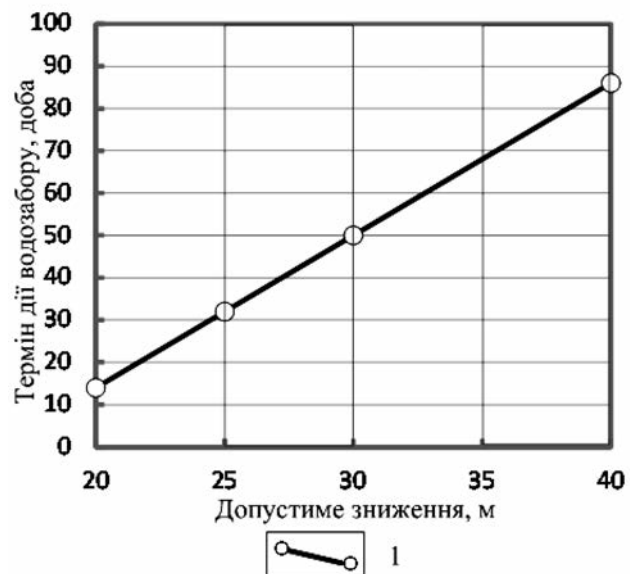


Рис. 3. Залежність терміну дії Вінницького підземного водозабору з загальним дебітом 85,6 м³/добу від допустимого зниження рівня підземних вод в експлуатаційних свердловинах

1 – модельні оцінки і лінійна апроксимація між ними

Fig. 3. Dependence of the operating period of the Vinnitsa groundwater intake facility with the total discharge rate of wells 85,6 thousand m³/day on acceptable drawdown in production wells

1 – model estimated values and linear approximation between

Як видно на рис. 3, експлуатувати докембрійський водоносний комплекс з дебітом 86,0 тис. м³/добу можна біля двох місяців, але, безумовно, цей висновок повинен бути підтверджений при виконанні комплексу пошуково-розвідувальних робіт.

На рис. 4 наведено зв'язок між загальним дебітом свердловин Вінницького водозабору і часом досягнення допустимого зниження у 30 м. Крива на цьому рисунку з часом плавно переходить в асимптоту $Q = 15,80$ тис. м³/добу – прогнозний видобуток підземних вод з докембрійського водоносного горизонту при сталому режимі фільтрації.

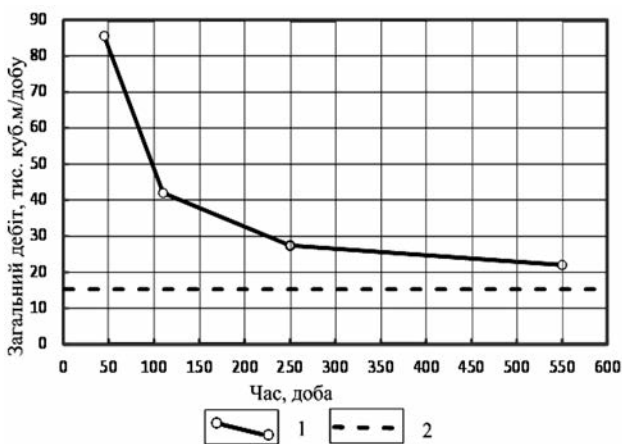


Рис. 4. Залежність загального дебіту свердловин Вінницького водозабору від часу досягнення 30 м зниження рівнів підземних вод в них

1 – модельні оцінки і лінійна апроксимація між ними;
2 – загальний дебіт водозабору при сталому режимі фільтрації (15,8 тис. м³/добу)

Fig. 4. Dependence of the total discharge rate of wells in the Vinnitsa groundwater intake facility on the time of water well drawdown to 30 m

1 – model estimated values and linear approximation between them;
2 – total discharge rate of wells in the groundwater intake facility under steady-state flow regime (15.8 thousand, m³/day)

Зауважимо, що досвід проведення пошуково-розвідувальних робіт і буріння поодиноких розвідувально-експлуатаційних свердловин з метою забезпечення питного водопостачання вказує на те, що реальні умови відбору підземних вод з тріщинуватих кристалічних порід для практичних цілей можливі тільки на обмежених по площі ділянках, незважаючи на суцільне розповсюдження кристалічних порід на території досліджень. Це визначається різкою нерівномірністю водозбагаченості вміщуючих порід і викликає необхідність обґрунтування вибору

ділянок, що сприятливі для відбору підземних вод (далі – перспективних ділянок). Однак вибір перспективних ділянок по суті являє собою прогноз водозбагаченості тріщинуватих кристалічних порід. Таким чином, з'ясування особливостей умов формування експлуатаційних запасів підземних вод кристалічних порід пов'язано з дослідженням двох основних питань:

— які чинники впливають на вибір перспективних ділянок у кристалічних породах;

— які основні джерела формування експлуатаційних запасів підземних вод.

За даними Е.Е. Соболевського [Соболевский, 1978], визначення впливу різноманітних чинників на водозбагаченість тріщинуватих кристалічних порід вивчається під час проведення пошуково-розвідувальних робіт на окремих родовищах підземних вод. Аналіз результатів цих робіт полягає у визначенні:

— ступеня водозбагаченості тріщинуватих кристалічних порід у розрізі;

— зміни глибин розвитку активної тріщинуватості кристалічних порід від сучасної поверхні землі;

— характеру зміни водозбагаченості тріщинуватих кристалічних порід з глибиною;

— залежності водозбагаченості тріщинуватих кристалічних порід від потужності кори витірювання;

— залежності водозбагаченості тріщинуватих кристалічних порід від глибини їх залягання;

— залежності ступеня збігу позначок покровлі кристалічних порід і верхньої границі водоприпливу в свердловину;

— залежності водозбагаченості тріщинуватих кристалічних порід від зміни верхньої границі зони водоприпливу в свердловину;

— ступеня участі свердловин різної водозбагаченості в загальній кількості розвіданих експлуатаційних запасів підземних вод.

Щодо визначення джерел формування експлуатаційних запасів підземних вод тріщинуватих кристалічних порід, то основні висновки аналізу даних розвідки й експлуатації водозаборів такі [Соболевский, 1978]:

— основними складовими формування експлуатаційних запасів підземних вод в тріщинуватих кристалічних породах є природні ресурси та залучення поверхневого (транзитного) стоку;

— сталий режим проведення групових дослідно-експлуатаційних відкачок переконує у

забезпеченості експлуатаційних запасів підземних вод живленням і дає підґрунтя для ствердження щодо практичної відсутності в балансі експлуатаційних запасів підземних вод природних запасів;

— модулі експлуатаційних запасів підземних вод тріщинуватих кристалічних порід, частіше всього, не перевищують подвійного значення модулів природних ресурсів підземних вод, що визначені за підземною складовою поверхневого стоку;

— виходячи з нерівномірного розвитку площ річкових басейнів та складних умов формування природних ресурсів підземних вод, визначення останніх на основі даних річкового стоку повинно базуватися на безпосередніх вимірах у районі водозаборів.

Насамкінець зауважимо, що при оцінці експлуатаційних запасів тріщинних підземних вод, приурочених до кристалічних порід, слід чітко дотримуватися принципу стадійності. Але на всіх стадіях геологорозвідувальних робіт варто широко застосовувати сучасні комп'ютерні технології накопичення та обробки інформації, включаючи ГС-технології та математичне моделювання.

В районі м. Вінниця, на думку авторів, необхідно провести пошуково-оцінювальні роботи (підстадія II-2 за [Положення..., 2001]) на виявленні перспективних ділянках надр з метою відбракування ділянок, не придатних для промислового освоєння.

На підстадії пошуково-оцінювальних робіт проводяться комплексні геолого-гідрогеологічні та еколого-гідрогеологічні дослідження з використанням геофізичних, гідрогеохімічних, аерокосмічних, бурових, дослідно-фільтраційних та інших методів. Під час виконання пошуково-оцінювальних робіт на підземні води, які гідравлічно взаємодіють з поверхневими, проводяться також гідрологічні дослідження та збір матеріалів з гідрології району робіт, а також спеціальні роботи з вивчення взаємозв'язку підземних вод з поверхневими. Обсяги і площа пошуково-оцінювальних робіт визначаються ступенем раніше досягнутої геолого-гідрогеологічної вивченості території та потребою замовника в підземних водах відповідного типу.

На діючих водозаборах, що розташовані в межах району пошуково-оцінювальних робіт або за його межами, але які за умовами формування експлуатаційних запасів підземних вод є

аналогами ділянок надр, що вивчаються, проводяться роботи з гідрогеологічного обстеження та збору матеріалів з їх експлуатації. На діючих водозаборах, які можуть гідравлічно взаємодіяти з підземними водами ділянок надр, що вивчаються, на підстадії пошуково-оцінювальних робіт організуються спостереження за режимом підземних вод (якщо вони не проводяться підприємствами, що експлуатують водозабори).

За підсумками пошуково-оцінювальних робіт належить виділяти водоносні горизонти (комплекси) та ділянки надр, перспективні для проведення подальших геологорозвідувальних робіт з оцінкою експлуатаційних запасів підземних вод за категоріями C_1 та C_2 , визначати відповідність якості води заданому призначенню, а також доцільність і черговість подальшого геологічного вивчення перспективних ділянок з урахуванням можливого впливу видобування підземних вод на екологічний стан довкілля.

За умови позитивної геолого-економічної оцінки за даними пошуково-оцінювальних робіт проводиться розвідка родовищ (ділянок) – стадія III за [Положення..., 2001].

Оцінка економічної ефективності експлуатації підземних вод родовищ, що розвідуються (ГЕО-1), здійснюється за матеріалами техніко-економічного обґрунтування доцільності їхньої розробки на основі укрупнених розрахунків.

Метою розвідувальних робіт є підготовка родовищ (ділянок) підземних вод до промислового освоєння у відповідності до вимог Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 05.05.97 № 432, та визначення вихідних даних для опрацювання проектів будівництва об'єктів з видобування та використання підземних вод, що створюються або реконструюються на базі розвіданих запасів підземних вод, включаючи оцінку можливого впливу водозабірних споруд на екологічний стан довкілля.

Методика розвідувальних робіт визначається відповідно до особливостей геологічної будови, гідрогеологічних та геоекологічних умов родовища (ділянки) з урахуванням положень Інструкції із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ відповідного виду підземних вод.

У процесі розвідки родовища (ділянки) підземних вод проводяться буріння розвідувальних, розвідувально-експлуатаційних та спостережних

свердловин, дослідно-фільтраційні та хіміко-аналітичні дослідження. Крім того, до загального комплексу геологорозвідувальних робіт включаються наземні геофізичні дослідження, геофізичні дослідження в свердловинах, спостереження за режимом підземних і поверхневих вод (у тому числі і на діючих водозаборах), гідрометричні та топогеодезичні роботи, а також спеціальні види досліджень, що необхідні для визначення та обґрунтування геоecологічного стану родовища і прогнозування його змін на період експлуатації родовища, технологічні, водно-балансові, бальнеологічні та інші дослідження, які обґрунтовують експлуатаційні запаси підземних вод та техніко-економічні показники видобутку та використання підземних вод.

Матеріали розвідки та геолого-економічної оцінки запасів родовищ підземних вод підлягають експертизі та оцінюються ДКЗ.

Особливу увагу слід звернути на ту обставину, що тріщинуваті породи нерівномірно водозбагачені. Внаслідок цього підвищена тріщинуватість порід не є гарантією їх підвищеної водозбагаченості. Необхідно брати до уваги, що наземні геофізичні методи досліджень, результати яких є одним з основних критеріїв вибору перспективних ділянок, спрямовані на виявлення площ підвищеної тріщинуватості, а не підвищеної водозбагаченості кристалічних порід.

У зв'язку з цим дуже важливо встановити в свердловинах зони водопривливів (провести ви-

тратометрію) і в залежності від цих результатів шляхом моделювання встановити оптимальне навантаження на конкретні експлуатаційні свердловини.

Висновки

Отже, отримані результати попередніх модельних досліджень свідчать, що при умові реальності допустимого максимального зниження рівня підземних вод при їх експлуатації до 30 м (це значення потребує конкретного визначення по кожній свердловині) постачання м. Вінниця водою при надзвичайних ситуаціях можливе за таких умов:

1. При забезпеченні населення водою за існуючими нормами термін форсованої експлуатації підземних вод може становити близько 50 діб.

2. При переході до більш жорстких аварійних норм водопостачання термін використання підземних вод може бути суттєво збільшений.

3. У будь-якому разі для забезпечення надійного водопостачання населення м. Вінниця як у звичайному режимі, так і, перш за все, при надзвичайних ситуаціях доцільно виконати комплекс необхідних робіт і досліджень з відновлення водозаборів підземних вод і пристосування їх до умов різних режимів експлуатації (отримання різних дебітів при різних зниженнях рівня підземних вод у свердловинах, що експлуатуються).

Список літератури

Положення про стадії геологорозвідувальних робіт на підземні води (гідрогеологічні роботи). Київ: Мінекоресурсів України, 2001. 20 с.

Соболевский Э.Э. Особенности региональной оценки эксплуатационных запасов подземных вод массивов трещиноватых пород (на примере

северо-западной части Украинского щита): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Пос. Зеленый, 1978. 208 с.

Chiang, W.-H. and Kinzelbach, W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. 346 p.

References

Chiang, W.-H. and Kinzelbach, W., 2001. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. Springer, Berlin, Heidelberg, 346 pp. (in English).

Regulations on the stages of geological exploration for groundwater (hydrogeological works). Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. Kyiv, 2001, 20 pp. (in Ukrainian).

Sobolevskiy E.E., 1978. Features of the regional assessment of the safe yield of groundwater in fractured rock massifs (with northwestern part of the Ukrainian shield as an example). Cand. geol. and mineral. sci., diss. Zeleny township, 208 pp. (in Russian).

Стаття надійшла
14.12.2017