

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.2.224915>  
УДК [556.3:552.3/551.44:532.5+004.94](477)

Л.І. ПЕТРЕНКО\*, І.М. РОМАНЮК, Н.Б. КАСТЕЛЬЦЕВА, І.А. ПЕРСІЦ

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна  
E-mail: Petrenko.L@nas.gov.ua; romaniuk@hydrosafe.kiev.ua; mnbkastel@gmail.com

\* Автор для кореспонденції

## МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ШТУЧНОГО ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВОДОЗАБОРУ У КРИСТАЛІЧНИХ ПОРОДАХ (НА ПРИКЛАДІ ЖАШКІВСЬКОГО РОДОВИЩА, УКРАЇНА)

Сьогодні зміни клімату, забруднення поверхневих та підземних вод — головні чинники, які особливо гостро піднімають питання пошуку альтернативних джерел питної води. Основні водоносні горизонти та комплекси, що експлуатуються зараз підземними виробками, приурочені до осадових відкладів. Альтернативним джерелом питної води виступає використання підземних вод кристалічних тріщинуватих водовмісних порід. Однак досвід ефективного застосування тріщинних підземних вод у кристалічних породах невеликий через не визначену тріщинуватість кристалічних порід і відповідно їх обводненість. Підвищення результативності використання такого геологічного середовища з метою водопостачання є дуже складним завданням, проте можливим за умови штучного поповнення підземних вод кристалічних порід. Комп'ютерне моделювання є дуже поширеним та перевіреним способом вивчення поведінки підземних вод в осадових відкладах, на відміну від тріщинуватих кристалічних порід. Дане дослідження стосується розгляду на геофільтраційній моделі способу збільшення продуктивності водозабору у кристалічних тріщинуватих водовмісних породах за рахунок штучного збільшення тріщинуватості останніх. На моделі Жашківського родовища на прикладі однієї із свердловин наведено декілька варіантів збільшення тріщинуватості кристалічних порід та їх впливу на зміну дебіту свердловини.

**Ключові слова:** підземні води; ресурси; водозбагаченість; моделювання; тріщинуваті кристалічні породи; свердловини.

### Вступ

**Актуальність.** Сьогодні основними джерелами питної води і води для технічних потреб є: 1) поверхневі води з річок та водосховищ, 2) підземні води осадових відкладів. У контексті змін клімату та у зв'язку із зростанням забруднення поверхневих вод потреба у придатній питній воді тепер особливо гостро постає перед суспільством. В Україні посухи спостеріга-

ються вже зараз у північних та західних регіонах, які вважаються зонами достатнього вологозабезпечення (Трипольська, 2020). Подальше очікуване потепління клімату в Україні призведе до нестабільності снігового покриву та зменшення надходження талої води у водоносні горизонти та до річок. Це, в свою чергу, спричинить періодичне висихання мілких річок. Збільшиться відсоток злив, вода з яких буде швидко стікати у вигляді поверхневого

Цитування: Петренко Л.І., Романюк І.М., Кастельцева Н.Б., Персіц І.А. Моделювання умов штучного збільшення продуктивності водозабору у кристалічних породах (на прикладі Жашківського родовища, Україна). *Геологічний журнал*. 2021. № 2 (375). С. 47—57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.2.224915>

Citation: Petrenko L.I., Romanyuk I.M., Rasteltseva N.V., Persits I.A. (2021). Modelling of artificial increase in productivity of water intake wells in crystalline rocks (on the example of Zhashkiv ground water deposit, Ukraine). *Geologičnij žurnal*, 2 (375), 47-57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.2.224915>

стоку. Посухи також будуть негативно проявлятися на територіях вирощування сільськогосподарських культур: зниження рівня ґрунтових вод негативно впливає на вологість ґрунту та врожайність, а додаткове зрошення вимагатиме додаткових водних ресурсів. Тому питання пошуку альтернативних джерел питної води — штучного збагачення підземних вод — є дуже актуальним. Підземні води тріщинуватої зони кристалічних порід майже на всій території Українського щита (УЩ) використовують для водопостачання ще з середини минулого століття, незважаючи на те, що окремі комплекси порід не характеризуються високою водозбагаченістю (Шестопапов та др., 1989). Тому саме у цьому регіоні проблема штучного збільшення дебітів свердловин є особливо актуальною.

*Постановка проблеми.* Оцінка експлуатаційних запасів підземних вод (ОЕЗПВ) полягає в отриманні доказів можливості експлуатації підземних вод при заданому дебіті водозабору протягом певного терміну його роботи чи необмежено довгий час. Виконання цієї оцінки для території УЩ, до якої, зокрема, входить Жашківське родовище, являє собою досить складну задачу (Бабінець та др., 1979; Дробноход, 2008). Перш за все це пояснюється складністю умов формування підземних вод під впливом різних природних та штучних факторів. Разом з цим існуючі методи і прийоми, розроблені в теорії фільтрації, дозволяють майже завжди вирішувати цю задачу з достатньою для практики точністю. На території УЩ на сьогодні застосовуються, як правило, гідравлічні методи. Для оцінки забезпеченості ЕЗПВ, визначених гідравлічним методом в умовах УЩ, використовується здебільшого балансовий метод (Шестопапов та др., 1989; Михалюк та ін., 1997; Нагорный та др., 2009). При цьому приймається ряд допущень та умов, які в остаточному підсумку значною мірою занижують дійсні експлуатаційні запаси на тій чи іншій ділянці. Про це свідчить досвід розвідки та експлуатації низки водозаборів (Рослий, Наконечный, 1967). Для території, яка характеризується незначними водними ресурсами, такий підхід до оцінки запасів знижує ефективність пошукових та розвідувальних робіт на воду. Перспективним у цьому відношенні є використання гідродинамічних методів. Однак

застосування аналітичних формул для розрахунку водозаборів на окремих ділянках або зовсім неможливо, або допустимо з великими припущеннями через те, що реальні гідродинамічні схеми пласта у багатьох випадках не можуть бути без значної похибки зведені до розрахункової схеми, для якої існують аналітичні рішення. Суттєве підвищення точності гідродинамічного методу оцінки запасів підземних вод може бути досягнуте за допомогою методу моделювання (Шестопапов та ін., 2018).

*Метою досліджень* є вивчення на геофільтраційній моделі Жашківського родовища можливостей збільшення продуктивності водозабору за рахунок підземних вод, приурочених до кристалічних порід, у контексті штучних змін гідрогеологічних параметрів і поповнення ділянки водоносного горизонту залученими ресурсами.

*Матеріали та методи.* Вихідною інформацією слугували фондові матеріали виконаних досліджень у різний час (Терешков, 1977; Никиташ, Литвак, 1983; Василенко та ін., 2016). Методи дослідження — комп'ютерне моделювання руху підземних вод та аналіз конкретних геолого-геофізичних, гідрогеологічних, гідрологічних, геоморфологічних умов у районі розташування Жашківського водозабору.

*Аналіз літературних джерел та вивченість району дослідження.* Жашківське родовище належить до центральної частини УЩ, гідрогеологічне вивчення умов залягання підземних вод якого розпочато на початку ХХ ст. і після 1920-х років мало планомірний характер. У 1960-х роках були відкриті родовища тріщинуватих вод, які почали використовувати для значного водопостачання. Також у цей час Ф.А. Руденком (1958) та Б.М. Мандриком (1974) розробляються принципи і здійснюється типізація гідрогеологічних умов УЩ. Під керівництвом В.М. Шестопапова ґрунтовно досліджуються особливості водообміну комплексної багаторівневої системи «осадові породи — слабопроникні шари (кора вивітряння) — кристалічні породи» (Шестопапов та др., 1989). Ведеться геологічна зйомка та видаються карти, в тому числі і гідрогеологічна, масштаб 1:50 000 (Великанов, Комар, 1964). У 1974 р. комплексною геофізичною партією було проведено оперативний аналіз геофізичних матеріалів, їх переінтерпретація та складення карт і прогно-

зів з метою виявлення перспективних ділянок на пошуки підземних вод на території Черкаської та Кіровоградської областей. У 1975—1977 рр. Д.І. Терешковим було виконано звіт про результати пошуків і попередньої розвідки підземних вод для водопостачання м. Жашків Черкаської області УРСР (Терешков, 1977). У 1983 р. під керівництвом Д.Р. Литвака, О.П. Нікіташа та інших гідрогеологів підготовлено звіт про результати робіт з оцінки водозбагаченості гідрогеологічних свердловин на території УЩ (Нікіташ, Литвак, 1983). Серед розглянутих родовищ підземних вод у кристалічних породах аналізували також Жашківську ділянку. У 2016 р. Б.В. Василенком була здійснена геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів ділянок № 1 та 2 Жашківського родовища питних підземних вод у м. Жашків Черкаської області (Василенко та ін., 2016). Однак, незважаючи на очевидні успіхи, досягнуті гідрогеологами та геофізиками, родовища підземних вод у тріщинуватих кристалічних породах докембрію залишаються достатньою мірою не вивченими.

У даній роботі на моделі розглядається спосіб штучного збільшення продуктивності водозабору у кристалічних породах. Наукові та практичні результати щодо збільшення запасів підземних вод та їхнього забору разом із використанням поверхневих вод — штучним поповненням запасів підземних вод (ШПЗПВ) — дозволяють застосовувати такий спосіб для підтримки господарсько-питного постачання у світі. Основні акценти проблеми ШПЗПВ у кристалічних породах в Україні та за кордоном частково висвітлено у (Raposo et al., 2012; Hashemi et al., 2013; Tarun et al., 2016; Петренко, 2018).

## Підходи до моделювання

Достовірність результатів оцінки експлуатаційних запасів підземних вод значною мірою визначається правильністю та детальністю складання розрахункової фільтраційної схеми району дослідження. Першим кроком у розробці числової моделі є побудова відповідної концептуальної моделі системи тріщин. Концептуальна модель являє собою фізичну модель системи, що описує основні особливості геології і гідрогеології. Вона включає в себе ін-

терпретацію та схематизацію реальності, яка є основою математичних розрахунків. Розробка концептуальної моделі системи тріщин є важливим, але часто недооціненим кроком у числовому моделюванні. Особливі труднощі виникають при визначенні геометрії тріщин і фізики потоку рідини.

Виділяють два напрями у вивченні процесів руху рідини у тріщинуватому середовищі. В одному випадку тріщинувата порода розглядається як середовище, розбите системами правильно розміщених тріщин з відомою геометрією. Розгляд процесів фільтрації на цій основі пов'язаний з вирішенням ряду досить складних питань — встановленням закономірностей руху рідини в одиничній тріщині, ступені впливу на фільтраційні процеси інтенсивності тріщинуватості кристалічних порід і кількості у них тріщин, орієнтування тріщин у просторі, анізотропії порід та ін. Розробка цього напрямку ведеться окремими дослідниками (Баренблатт, Желтов, 1960; Смахов, 1961). Однак у зв'язку із складністю виявлення та вивчення всіх перерахованих факторів на практиці такий підхід у вивченні руху води у тріщинуватих породах є менш поширеним. Другий напрям, який і був у подальшому обраний нами для відображення умов руху підземних вод на моделі, заснований на тому, що тріщинуваті породи у розрахунках розглядаються як суцільне проникне середовище, яке характеризується неперервними властивостями (Баренблатт та др., 1960; Баренблатт, Желтов 1960). Цей підхід, з точки зору теорії фільтрації, більш загальний, але дозволяє знехтувати розмірами, конфігурацією і просторовим розташуванням тріщин, тобто дозволяє застосовувати формули, виведені для пористого середовища. Тріщинувата зона кристалічних порід докембрію у такому випадку може бути розглянута як суцільне середовище з неперервними властивостями, але як таке, що характеризується великою мінливістю фільтраційних властивостей у плані і потребує відповідної схематизації щодо масштабу розгляду водоносної системи.

Геофільтраційна модель Жашківського родовища дослідження була створена на базі популярного пакету програм MODFLOW, реалізованого в сервісній оболонці PMWin (Chiang, Kinzelbach, 2001). На першому етапі моделювання — схематизації гідродинамічних умов —

були проаналізовані вхідні дані про досліджувану область фільтрації, а саме дані про: геологічну будову області фільтрації, умови залягання та розповсюдження водоносних горизонтів та слабо проникних шарів; умови та джерела живлення підземних вод; основні гідрогеологічні параметри водоносних горизонтів і слабо проникних шарів та закономірностей їх зміни по площі та в розрізі, поверхневих водних об'єктів та умов взаємозв'язку підземних та поверхневих вод; умови інфільтрації атмосферних опадів; природних та техногенних джерел живлення підземних вод та ін. У моделі вводили узагальнені значення величин потужності відкладів, параметра перетікання (для кори вивітрювання) та ін. Наприклад, водоносні горизонти та комплекси осадового чохла мають важливе значення як осередки природного і штучного формування запасів і ресурсів підземних вод, як джерела живлення свердловин, що розкрили кристалічні породи та отримуватимуть з них воду, яка формується у залягаючих вище шарах, особливо у локальних ерозійних западинах, де потужності осадових відкладів збільшуються. Але зменшення потужності відкладів чи, навпаки, завищене значення при застосуванні середньої величини потужності певною мірою впливатиме на отриманий результат. Таким чином, оцінки водозбагаченості кристалічних тріщинуватих порід на моделі здійснювали на основі аналізу поведінки підземних вод у різних гідрогеологічних умовах (шляхом зміни ряду гідрогеологічних параметрів), беручи до уваги, що задані на моделі величини інфільтраційного живлення, області живлення і розвантаження водоносних горизонтів наближені до природних.

## Результати

### Характеристика моделі

При схематизації гідрогеологічних умов у розрізі враховували перший водоносний шар, перший водотривкий та перший шар кристалічних гірських порід різного ступеня тріщинуватості. Спочатку розмір блоку моделі становив  $100 \times 100$  м, а після фрагментування моделі розмір блоку зменшили у 10 разів.

Перший (верхній) водоносний шар на моделі схематизує всі водоносні горизонти осадових відкладів, що представлені водовмісними

породами різного генезису, літологічного складу і віку.

В якості роздільного шару прийнята зона кори вивітрювання, яка поширена практично повсюдно і характеризується, як правило, глинистими та суглинистими (малопроникними) відкладами. Ця зона, що утворилася в результаті тривалого вивітрювання магматичних та місцями метаморфічних порід, має потужність від 2 до 28 м. Наявність цієї зони зумовлює розрив рівнів між першим і другим водоносними шарами.

Нижньою межею шару кристалічних порід прийнято рівень згасання тріщинуватості кристалічних відкладів (приблизно на глибині 70—100 м).

Усередині моделі взаємозв'язок першого від поверхні водоносного шару з поверхневими водотоками (річками, озерами, болотами, дренажними каналами) задавали на їх контурах за допомогою граничних умов (ГУ) третього роду

$$q = f(\Delta H_p),$$

де  $q$  — інтенсивність водообміну між річкою і водоносним шаром,  $\text{м}^3/\text{добу}$ ;  $f(\Delta H_p)$  — задана функція від різниці відміток рівнів води в річці і у водоносному горизонті. На рис. 1 наведено типовий гідрогеологічний розріз.

Відмітки рівнів у річках та інших поверхневих водотоках задавали в кожному блоці відповідно до гідрографічної мережі, знятої з топографічних карт масштабу 1:100 000. Дебіти експлуатаційних свердловин задавали за допомогою ГУ 2-го роду ( $Q = \text{const}$ ), де  $Q$  — дебіт свердловини. На контурі області моделювання (вододіли) задавали ГУ 2-го роду ( $Q = 0$ ). Для мінімізації впливу цієї границі на результати експериментів в область моделювання, крім долини р. Торч, увійшла також прилегла територія, яка набагато перевищує площу м. Жашків.

На рис. 2 наведено схематичне зонування величин коефіцієнтів водопровідності  $T$  ( $\text{м}^2/\text{добу}$ ) для осадових відкладів (шар 1) та кристалічних порід (шар 2) в умовах Жашківського родовища.

Точкові значення коефіцієнта водопровідності порід докембрійського водоносного комплексу, що визначені за даними відкачок із свердловин, оцінювали в основному за формулою:

$$k_m = 130 q,$$



де  $km$  — точкове значення коефіцієнта водопровідності порід,  $m^2/добу$ ;  $q$  — питомий дебіт свердловини,  $dm^3/c$ .

Значення параметра перетікання для порід зони кори вивітрювання приймали у межах від  $10^{-2}$  до  $10^{-4}$   $добу^{-1}$ . Це пов'язано з різним складом відкладів кори вивітрювання — від рихлих дресвяних відкладів до щільних глинистих утворень.

Значення коефіцієнтів водовіддачі порід водоносних шарів на моделі для кожного з них задавали одним числом. Для осадового чохла  $\mu_1 = 0,25$ ; для кристалічних порід фундаменту  $\mu_2 = 0,01$ . 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 у цьому комплексі нижче його покрівлі, принаймні, до половини ефективної потужності зони тріщинуватості.

Через брак фактичних даних про питому фільтраційну проникність шару руслових відкладів у річкових розрахункових блоках моделі цей параметр задавали одним числом  $0,025$   $добу^{-1}$  (Raposo, 2012). 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

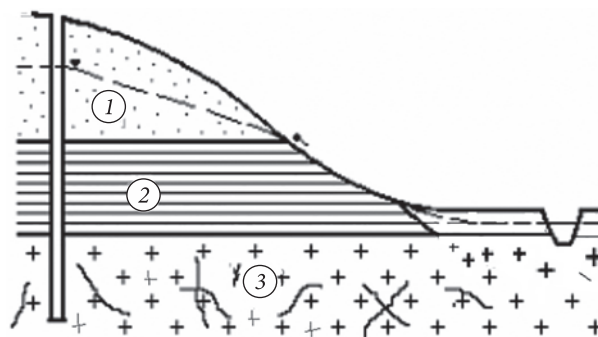


Рис. 1. Типовий гідрогеологічний розріз: 1 — осадові відклади; 2 — кора вивітрювання; 3 — кристалічні породи.

Fig. 1. Typical hydrogeological section: 1 — sediments; 2 — weathering crust; 3 — crystalline rocks

фільтрації руслових відкладів річок для території моделювання була використана його усереднена величина для суглинків ( $0,025$   $м/добу$ ) з діапазону  $0,1—0,01$   $м/добу$ .

Згідно з літературними даними та результатами польових досліджень (Терешков, 1977; Никиташ и др., 1983; Василенко та ін., 2016), свердловини, пробурені у кристалічних породах, здебільшого не взаємодіють між собою через особливості тріщинуватості відкладів. Тому було прийнято рішення розділити область фільтрації на окремі фрагменти і виконати детальне моделювання з урахуванням особливостей будови пластів, умов водопровідності та перетікання підземних вод для кожного

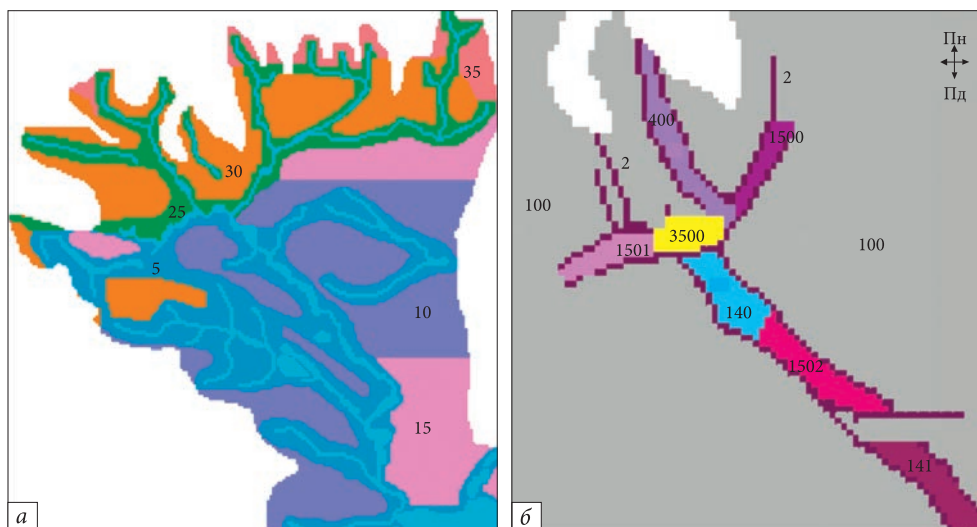


Рис. 2. Зонування шарів моделі осадових відкладів (а) та кристалічних порід (б) досліджуваного родовища за величинами коефіцієнтів водопровідності  $T$  ( $m^2/добу$ ). Розмір блоку моделі становить  $100 \times 100$  м

Fig. 2. Zoning on the model layers the sediments (a) and crystalline rocks (b) of the studied area according to the values of Transmissivity  $T$  ( $m^2/day$ ). The block size of the model is  $100 \times 100$  m

фрагмента. Оцінений фільтраційний процес на кожному з фрагментів через не визначену тріщинуватість у природних умовах неможливо буде розповсюдити (поширити) на всю область, але розв'язання таких задач і відповідно надані рекомендації для кожного з проаналізованих випадків можна буде пропонувати для подальшого розгляду при вирішенні завдань збільшення водозабору в умовах тріщинуватих кристалічних порід.

### Моделювання умов збільшення продуктивності водозабору

Моделювання умов збільшення продуктивності водозабору здійснювали на моделі з розміром блоку 10 x 10 м шляхом виконання тестових рішень на знаходження відмітки залягання рівня підземних вод на моделі при зміні певних гідрогеологічних параметрів. Для цього в умовах свердловини (свердловин) після проведення корегування рівня підземних вод на моделі і досягнення такого його значення (при відповідному дебіті та зниженні), яке було виміряне під час польових робіт, задавали різні значення водопровідності (ступінь якої є характеристикою ступеня тріщинуватості кристалічних порід) поблизу свердловини чи на деякій відстані від неї та аналізували отриманий приріст рівня підземних вод (і відповідно дебіту свердловини). Тобто, задаючи водовмісні «тріщини» поблизу свердловини та знаючи їх геометричні параметри (кількість блоків на моделі та їх розміри), можна аналізувати вплив зони штучної тріщинуватості на продуктивність водозабору.

Водопровідність тріщин при оцінці продуктивності водозабору у кристалічних тріщинуватих породах має виключно важливе значення. Від проникності тріщини залежить об'єм рідини, який тріщина може «постачати» до свердловини. Часто тріщини з великим перетином (потужністю 100 мм) з'єднані між собою лише мікротріщинами. Проникність макротріщин значно зменшується через наявність у них місцевих звужень, перетиснень, виступів (Ломизе, 1951). Також розкритість тріщин є одним з визначальних факторів у процесах фільтрації рідини у тріщинуватих колекторах кристалічних порід і відповідно у формуванні питомих дебітів свердловин (Боревський и др., 1973).

Гірські породи «тріщини» на моделі — зони штучної тріщинуватості. Вони є частиною (певною витягнутою зоною) масиву кристалічних порід, тобто мають горизонтальний зв'язок внаслідок руху в них підземних вод і вертикальний зв'язок в результаті перетікання підземних вод із залягаючих вище горизонтів. Змінюючи значення коефіцієнта водопровідності так званої «тріщини» на моделі, ми у такий спосіб змінювали тріщинуватість (ступінь тріщинуватості) виокремленої частини масиву кристалічних порід. Параметри зон штучної тріщинуватості задавали на етапі створення моделі, коли здійснювали присвоєння шарам різних характеристик – середньої потужності, коефіцієнта водопровідності, а для середнього шару додатково – параметра перетікання тощо. Задання середньої потужності шару, наприклад, у подальших міркуваннях при аналізі результатів тестування щодо кількості води у «тріщині» дозволило зосередитись тільки на впливі ширини та її довжини на рівень підземних вод у досліджуваній свердловині.

У роботі (Шестопалов та ін., 2020) розглянуто декілька свердловин, для яких моделювались умови збільшення їх продуктивності. Нижче наведено приклад для св. 1925. На рис. 3 зображені «умови свердловини». Використане тут словосполучення «умови свердловини» означає дебіт, зниження, коефіцієнт водопровідності та інші параметри.

Св. 1925 характеризується значною потужністю слабо тріщинуватих відкладів (44 м) магматично-метаморфічного походження, а також каоліновою корою вивітрювання та осадовими глинистими відкладами загальною потужністю до 32 м (Терешков, 1977). Параметр перетікання

$$k_0/m_0 = 10^{-4} \text{ добу}^{-1},$$

де  $k_0$  — коефіцієнт фільтрації відкладів кори вивітрювання (м/добу);  $m_0$  — потужність кори вивітрювання (м); значення (на моделі) рівня підземних вод для шару 2 — кристалічних порід  $H_{2e} = 166,1$  м); дебіт свердловини  $Q = 212,5 \text{ м}^3/\text{добу}$ ; зниження рівня підземних вод  $S = 31,1$  м.

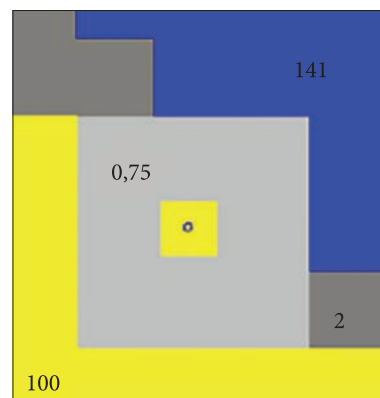
*Хід моделювання.* Вихідні умови на моделі відповідають параметрам, при яких було досягнуто зниження рівня підземних вод, що було зафіксовано при бурінні під час прове-

дення польових робіт. Довкола свердловини є контур з коефіцієнтом водопровідності  $T = 0,75 \text{ м}^2/\text{добу}$ , параметр перетікання ( $k_0/m_0$ ) становить  $10^{-4} \text{ добу}^{-1}$ . У свердловині та у межах «поля» свердловини ( $7 \times 7$  блоків довкола свердловини) вихідне значення коефіцієнта водопровідності сягає  $T = 100 \text{ м}^2/\text{добу}$ . Початкова величина рівня підземних вод — 166,1 м. Першим етапом тестування є збільшення тріщинуватості безпосередньо біля свердловини. Збільшивши коефіцієнт водопровідності «поля» у 6 разів, отримуємо приріст величини рівня 0,9 м, а у 26 разів ( $T = 2600 \text{ м}^2/\text{добу}$ ) — 1 м. Збільшивши параметр перетікання на два порядки (при  $T = 600 \text{ м}^2/\text{добу}$ ), одержуємо рівень підземних вод приблизно у 167 м, тобто приріст величини рівня становить 0,9 м. Збільшивши коефіцієнт водопровідності до  $2600 \text{ м}^2/\text{добу}$ , отримуємо додатковий приріст рівня підземних вод на 0,1 м, тобто відбувається зростання на 1 м відносно початкової величини. Отже, дані зміни призводять до незначного зростання рівня підземних вод і не дозволяють нарощувати водовідбір.

Наступним етапом тестування є проведення «тріщини» поблизу свердловини довжиною 80 м і шириною 10 м та з коефіцієнтом водопровідності контуру  $T = 100 \text{ м}^2/\text{добу}$ . Після розв'язку отримуємо рівень 174,1 м; отже, приріст рівня сягає майже 8 м. Такий приріст рівня дозволяє збільшити початковий водовідбір ( $212,5 \text{ м}^3/\text{добу}$ ) майже на 30 % — до  $275 \text{ м}^3/\text{добу}$ . При відображенні другої зони штучної тріщинуватості такого ж розміру при аналогічних інших параметрах одержуємо приблизно таку ж величину приросту — майже 8 м. Задавши дві такі зони одночасно, отримуємо приріст рівня приблизно на 12 м від початкового. Одночасне використання двох паралельних аномальних зон тріщинуватості дозволяє збільшити початковий водовідбір майже на 55 % — до  $330 \text{ м}^3/\text{добу}$ . Також нами було розглянуто варіант з використанням однієї зони, але продовженої на 30 м до гіпотетичної ділянки з високим коефіцієнтом водопровідності (в даному випадку це ділянка з коефіцієнтом водопровідності  $140 \text{ м}^2/\text{добу}$ ). В такому разі при початковому дебіті ( $212 \text{ м}^3/\text{добу}$ ) шуканий рівень сягає 181 м (приріст становить близько 15 м). При цьому можливий водовідбір може сягати близько  $390 \text{ м}^3/\text{добу}$ .

**Рис. 3.** Значення коефіцієнта водопровідності  $T$  ( $\text{м}^2/\text{добу}$ ) для шару 2. Розмір блоку моделі становить  $10 \times 10 \text{ м}$

**Fig. 3.** The value of Transmissivity  $T$  ( $\text{m}^2/\text{day}$ ) for layer 2. The block size of the model is  $10 \times 10 \text{ m}$



Крім цього, на прикладі даної свердловини розглянуто можливість збільшення перетікання з верхнього горизонту для нарощування можливого водовідбору. Збільшивши параметр перетікання поблизу свердловини з  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-3} \text{ добу}^{-1}$ , отримуємо приріст рівня менше 2 м (1,6 м), що аналогічно приросту водовідбору приблизно на 8 % (менше  $230 \text{ м}^3/\text{добу}$ ). Збільшення ж параметра перетікання до  $3 \cdot 10^{-2} \text{ добу}^{-1}$  суттєво впливає на підняття рівня (близько 11 м), відповідно на можливість збільшення дебіту. Але водночас ці зміни викликають недопустиме зниження рівня підземних вод у верхньому горизонті, що пояснюється низькими фільтраційними властивостями порід і є неприпустимими. Отже, цей підхід не може бути застосований для даних умов і вказує на важливість спостереження за зміною рівня підземних вод у верхньому горизонті (шарі осадових відкладів).

## Обговорення результатів

В однакових гідрогеологічних умовах можна отримати зовсім різну продуктивність водозабору, яка буде залежати від схеми будови водозабору. Гідродинамічна ефективність будь-якої схеми будови водозабору, в свою чергу, залежить від розміщення свердловини, її радіуса, довжини і розміщення фільтра, відстані до контуру живлення та ще деяких параметрів. Але при обґрунтуванні раціональної схеми водозабору комбінації та поєднання згаданих параметрів не зможуть вичерпати всієї різноманітності природних умов залягання підземних вод у тріщинуватих відкладах.

У роботі за допомогою математичної моделі теоретично обґрунтовується можливість збіль-



шення продуктивності водозабору за рахунок механічного (наприклад, за допомогою вибухової речовини (Чуриков и др., 1990; Нагорний, 2011)) збільшення тріщинуватості обводнених кристалічних порід. Під час моделювання руху підземних вод у тріщинуватих породах було прийнято ряд припущень, які пов'язані як з не визначеністю реальної тріщинуватості у природі, так і з особливостями схематизації умов (середні значення потужності та інших параметрів), а також з детальністю моделювання. До основних прийнятих припущень віднесли такі: різна водопровідність відповідає різним умовам тріщинуватості; під «тріщиною» розуміємо масив порід певної ширини/довжини, свердловини не взаємодіють між собою; приплив води до зони штучної тріщинуватості здійснюється через параметр перетікання (відтворюються умови взаємозв'язку осадових відкладів і кристалічних порід), через значення коефіцієнта водопровідності моделюється зв'язок між різними блоками та діапазонами блоків).

Перед розглядом та вивченням обводненості тріщинуватого кристалічного масиву слід звичайно мати обґрунтовану інформацію про ресурси підземних вод. Методика оцінки природних ресурсів підземних вод описана у монографії В.М. Шестопалова (Шестопалов, 1988). При цьому варто враховувати, що гідрологічні і гідрометричні методи оцінки підземного стоку у річки, які приймаються в якості оцінки природних ресурсів підземних вод, є, як правило, дуже заниженими. Тому, при можливості, вони корегуються у бік збільшення за допомогою гідродинамічного методу оцінки підземного стоку або, теж при можливості, методом аналізу діючих водозаборів з метою виділення компоненти природних ресурсів, яка забезпечує їх дебіт, і застосування методу аналогії. Також розрахунок стійких рівнів видобутку вимагає розуміння водного балансу водоносного горизонту. Тріщини відіграють важливу роль в цьому балансі, оскільки вони можуть контролювати живлення і розвантаження з водоносного горизонту. Наприклад, субвертикальні зони тріщин, що виходять на поверхню в топографічних низинах, можуть забезпечити значне підживлення водоносного горизонту. Врахування цього на моделі вимагає багатьох додаткових даних, яких при польових роботах зазвичай не вдається отримати.

Наведений аналіз результатів моделювання на прикладі однієї із свердловин Жашківського родовища показав теоретичну можливість ефективного застосування штучного збільшення тріщинуватості для збільшення дебіту свердловини. Результати моделювання, згадані вище, підтвердили, що умисне збільшення тріщинуватості безпосередньо біля свердловини не призвело до значного збільшення рівня підземних вод, а одночасне використання двох паралельних «тріщин» у шарі кристалічних порід поблизу свердловини дозволило збільшити початковий водовідбір приблизно на 55 %. При цьому варто зазначити, що отримані модельні результати не будуть повністю аналогічними до одержаних у природі з подібними умовами.

На практиці збільшення водовідбору повинно проводитися поступово при обов'язковому спостереженні за динамічними рівнями в свердловинах та іншими показниками підземних вод (гідрохімічними, санітарно-бактеріологічними та ін.).

## Висновки

Дослідження стосується питання штучного збільшення продуктивності водозабору у кристалічних тріщинуватих відкладах. Підвищення точності гідродинамічного методу оцінки запасів підземних вод може досягатись за допомогою методу моделювання. На основі даних про геологічні, гідрологічні, тектонічні та інші умови Жашківського родовища створено геофільтраційну модель. На моделі на прикладі однієї із свердловин теоретично розглянуто спосіб штучного збільшення продуктивності водозабору за рахунок збільшення тріщинуватості водовмісних кристалічних порід (наприклад, із використанням вибухової речовини). Збільшення тріщинуватості на моделі безпосередньо навколо свердловини виявилось не ефективним для зростання її дебіту. Варіант двох паралельних витягнутих аномальних зон тріщинуватості, що імітують водопровідні розломні зони у шарі кристалічних порід поблизу свердловини, дозволив, за розрахунками, суттєво збільшити початковий водовідбір. Очевидно, що у природних умовах результати не будуть точно такими ж, як на моделі. Однак запропонований спосіб штучного збільшення продуктивності водозабору за рахунок ство-



рення витягнутих зон збільшеної тріщинуватості кристалічних порід варто розглядати як перспективний для практичного використання.

Це дослідження було виконано у межах науково-дослідної роботи «Нові підходи до розв'язання проблем нецентралізованого водопос-

тачання за рахунок підземних вод, приурочених до кристалічних порід (на прикладі родовища Українського щита)». Автори висловлюють щире подяку академіку НАН України В.М. Шестопалову за цінні зауваження та побажання, які були використані під час підготовки статті.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Бабинец А.Е. (ред.), Боровский Б.В., Шестопалов В.М. Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины. Киев: Наук. думка, 1979. 214 с.
- Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. *Приклад. математика и механика*. 1960. Т. 24, вып. 5. С. 864.
- Баренблатт Г.И., Желтов П.Ю. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. *Докл. АН СССР*. 1960. Т. 132, № 3. С. 545—548.
- Боровський Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. Москва: Недра, 1973. 304 с.
- Василенко Б.В., Новак К.В., Ольшевська А.Ю. Геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів ділянок № 1 та № 2 Жашківського родовища питних підземних вод в м. Жашків Черкаської області (підрахунок запасів станом на 30.04.2015 р.). Київ, 2016. 155 с.
- Великанов В.А., Комар В.А. Гидрогеологическая карта СССР масштаба 1:50 000. Отчет Южно-Украинской геологической экспедиции о гидрогеологической съемке планшетов М-36-109-В (Умань) и М-36-109-Г (Бабанка). Киев, 1964. 91 с.
- Дробноход М.І. Оцінка запасів підземних вод. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. 384 с.
- Ломизе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. Москва: Госэнергоиздат, 1951. 127 с.
- Мандрик Б.Н. Особенности формирования и оценки эксплуатационных запасов подземных вод в условиях Украинского щита: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев, 1974. 230 с.
- Михалюк А.В., Войтенко Ю.І., Лігоцький Н.В. Нова технологія інтенсифікації видобутку нафти і природного газу із застосуванням енергії вибуху. *Нафтова і газова промисловість*. 1997. № 4. С. 24—26.
- Нагорный В.П., Глоба В.М., Денисюк И.И. Взрывные работы при добыче природных углеводородов, строительстве магистральных трубопроводов и подземных хранилищ. Киев: Полиграфист, 2009. 330 с.
- Нагорный В.П. Імпульсні методи відновлення продуктивності водозабірних свердловин: Довідник НАН України. Київ, 2011. 187 с.
- Никиташ А.П., Литвак Д.Р. Отчет о результатах работ по оценке водообильности гидрогеологических скважин на территории Украинского щита применительно к задачам разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод на 1981—1983 гг.: в 4-х т. Киев: Мингео УССР, ПГО «Севукргеология», Комплексная геофизическая экспедиция, 1983. 150 с.
- Петренко Л.І. Можливості штучного поповнення підземних вод кристалічних порід для водопостачання. *Геол. журн.* 2018. № 2 (363). С. 23—32. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur\\_2018\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur_2018_2_5)
- Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. Москва: Недра, 1966. 282 с.
- Рослый А.Г., Наконечный В.И. Отчет о разведке Городецкого участка Уманского месторождения подземных вод хозяйственно-питьевого и технического назначения. 1967.
- Рослый А.Г., Наконечный В.И. Отчет о разведке Городецкого участка Уманского месторождения подземных вод хозяйственно-питьевого и технического назначения. № 27446. Трест «Киевгеология». Киев, 1967. 145 с.
- Руденко Ф.А. Гидрогеология Украинского кристаллического массива. Москва: Госгеолтехиздат, 1958. 214 с.
- Смехов Е.М. Труды Всесоюзного совещания по трещинным коллекторам нефти и газа. Москва: Гостоптехиздат, 1961. 20 с.
- Терешков Д.И. Отчет о результатах поисков и предварительной разведки подземных вод для водоснабжения г. Жашкова Черкасской области УССР. Белоцерковская геологоразведочная партия, 1975—1977. Белая Церковь, 1977. 190 с.
- Трипольська Г. Як проявляється зміна клімату в Україні? 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.boell.org/uk/2020/06/09/yak-proyavlyayetsya-zmina-klimatu-v-ukraini> (дата звернення 13.04.20).
- Чуриков В.А., Кукишин В.Ю., Непочатов С.Д., Крайцов А.Ф. Регенерация водозаборных скважин взрывными методами с использованием эффекта разуплотнения пород водоносного горизонта. *Теория и практика совершенствования взрывных работ*. Киев: Наук. думка, 1990. С. 98—101.
- Шестопалов В.М. Методы изучения естественных ресурсов подземных вод. Москва: Наука, 1988. 168 с.
- Шестопалов В.М., Дробноход Н.И., Лялько В.И., Огняник Н.С., Ситников А.Б., Сухоробый А.А., Боровский Б.В., Бут Ю.С., Митник М.М., Брикс А.Л., Гавловский С.А., Лютый В.И., Морозов В.И., Головченко Ю.Г., Баер Р.А.,

- Жук С.Г., Кубко Ю.И., Мандрик Б.Н. Водобмен в гидрогеологических структурах Украины: Водобмен в естественных условиях. Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.
- Шестопалов В.М., Петренко Л.І., Романюк І. М., Кастельцева Н.Б., Персіц І.А. Нові підходи до розв'язання проблем нецентралізованого водопостачання за рахунок підземних вод, приурочених до кристалічних порід (на прикладі родовища Українського щита). Звіт про НДР ІГН НАН України. Київ, 2020. 236 с.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Стеценко Б.Д. Підземні води тріщинуватих кристалічних порід як резервне джерело водозабезпечення Вінниці (Україна). *Геол. журн.* 2018. № 2 (363). С. 5—16. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur\\_2018\\_1\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur_2018_1_3)
- Chiang W.-H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. 346 p.
- Hashemi H., Berndtsson R., Kompani-Zare M., Persson M. Natural vs. artificial groundwater recharge, quantification through inverse modeling. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 2013. Vol. 17. P. 637-650. <https://hess.copernicus.org/articles/17/637/2013/>
- Raposo J.R., Molinero J., Dafonte J. Parameterization and quantification of recharge in crystalline fractured bedrocks in Galicia-Costa (NW Spain). *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 2012. Vol. 16. P. 1667-1683. <https://hess.copernicus.org/articles/16/1667/2012/>
- Tarun K., Tripathi M.P., Katre P., Tiwari Priti. Groundwater recharge plan for Durg district of Chhattisgarh using satellite data and GIS technique. *Agricultural Research Journal.* 2016. Vol. 53 (2). P. 234-242. <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:jre&volume=53&issue=2&article=015>

Надійшла до редакції 17.02.2021

Надійшла у ревізованій формі 15.04.2021

Прийнята 17.04.2021

## REFERENCES

- Babynets, A.E. (Ed.), Borevski, B. V., Shestopalov. V.M., 1979. Formation of operational groundwater resources of platform structures of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Barenblatt, G.I., Zheltov, P.Yu., Kochyna I, N., 1960. On the basic concepts of the theory of filtration of homogeneous fluids in fractured rocks. *Applied Mathematics and Mechanics*, 24, 5, 864 (in Russian).
- Barenblatt, G.I., Zheltov, P.Yu., 1960. On the basic equations of filtration of homogeneous fluids in fractured rocks. *Report of NAS of Ukraine.*, 132, 3, 545-548 (in Russian).
- Borevski, B.V., Samsonov, B.G., Yazvin, L.S., 1973. Methods for determining the parameters of aquifers based on the data of points. Moscow: Nedra (in Russian).
- Chiang, W.-H., Kinzelbach, W., 2001. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Churikov, V.A., Kukshyn, V.Yu., Nepochatov, S.D., Kravtsov, A.F., 1990. Regeneration of water wells by explosive methods using the effect of decompaction of the aquifer rocks. In: *Theory and practice of improving blasting operations* (pp. 98-101). Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Drobnokhod, M.I., 2008. Assessment of subsurface water reserves. Kyiv: Publishing and printing center "Kyivskii Universytet" (in Ukrainian).
- Hashemi, H., Berndtsson, R., Kompani-Zare, M., Persson, M., 2013. Natural vs. artificial groundwater recharge, quantification through inverse modeling. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, 17, 637-650. <https://hess.copernicus.org/articles/17/637/2013/>
- Lomize, G.M., 1951. Filtration in fractured rocks. Moscow: Gosenergoizdat (in Russian).
- Mandryk, B.N., 1974. Features of the formation and assessment of operational reserves of groundwater in the conditions of the Ukrainian shield: Doctor's thesis (Geological-mineralogical sciences). Kyiv (in Russian).
- Mykhaluk, A.B., Voitenko, Yu.I., Ligotskyi, N.V., 1997. New technology for intensification of oil and natural gas production with the use of explosion energy. *Oil and gas industry*, 4, 24-26 (in Ukrainian)
- Nagorny, V.P., Globa, V.M., Denysuk, I.I., 2009. Blasting operations in the extraction of natural hydrocarbons, construction of trunk pipelines and underground storage facilities. Kyiv: Poligrafist (in Russian).
- Nagorny, V.P., 2011. Impulse methods for restoring the productivity of water intake wells: Handbook of the NAS of Ukraine. Kyiv (in Ukrainian).
- Nikitash, A.P., Litvak, D.R., 1983. Report on the results of the work on the assessment of the water availability of hydrogeological wells in the territory of the USh with reference to the tasks of exploration and assessment of the operational reserves of groundwater for 1981-1983 (in 4 vols.). Kyiv: MinGeo URSR, «Sevukgeologiya», Complex geophysical expedition (in Russian).
- Petrenko, L.I., 2018. The possibility of artificial recharge of ground water in the crystalline rocks for water supply / *Geological Journal*, 2 (363), 23-32. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur\\_2018\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geojur_2018_2_5) (in Ukrainian).
- Raposo, J.R., Molinero, J., Dafonte, J., 2012. Parameterization and quantification of recharge in crystalline fractured bedrocks in Galicia-Costa (NW Spain). *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 16, 1667-1683. <https://hess.copernicus.org/articles/16/1667/2012/>
- Romm, E.S., 1966. Filtration properties of fractured rocks. Moscow: Nedra (in Russian).

- Rosly A.G., Nakonechny V.I., 1967. Report on the exploration of the Gorodetsky area of the Umanskoye deposit of groundwater for household, drinking and technical purposes. No. 27446. «Kyivgeology», Kyiv. 145 p. (in Russian).
- Rudenko, F.A., 1958. Hydrogeology of the Ukrainian crystalline massif. Moscow: Gosgeoltekhizdat (in Russian).
- Shestopalov, V.M., 1988. Methods for studying natural resources of groundwater. Moscow: Nauka (in Russian).
- Shestopalov V.M., Drobnokhod N.I., Lyalko V.I., Ognyanik N.S., Sitnikov A.B., Sukhorebnyy A.A., Borevsky B., V., But Yu.S., Mitnik M.M., Brix A.L., Gavlovsky S.A., Lyuty V.I., Morozov V.I., Golovchenko Yu.G., Baer R.A., Zhuk S.G., Kubko Yu.I., Mandrik B.N., 1989. Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine: Water exchange in natural conditions. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Petrenko, L.I., Romanyuk, I.M., Kasteltseva, N.B., Persits I.A., 2020. New approaches to solving the problems of decentralized water supply due to groundwater dedicated to crystalline rocks (on the example of the Ukrainian Shield deposit). *Report on R & D IGN NAS of Ukraine*. Kyiv (in Ukrainian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F., Stetsenko, B.D., 2018. Groundwater of fractured crystalline rock as reserve source for potable water supply to Vinnitsa (Ukraine). *Geological Journal*, 2 (363), 5-16 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.1.126414>
- Smekhov, E.M., 1961. Proceedings of the All-Union meeting on fractured oil and gas reservoirs. Moscow: Gostoptekhizdat (in Russian).
- Tarun, K., Tripathi, M.P., Katre, P., Tivari Priti, 2016. Groundwater recharge plan for Durg district of Chhattisgarh using satellite data and GIS technique. *Agric. Res. J.*, 53 (2), 234-242. <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor;jre&volume=53&issue=2&article=015>
- Tereshkov, D.I., 1977. Report on the results of prospecting and preliminary exploration of groundwater for water supply of the city of Zhashkov, Cherkasy region of the Ukrainian SSR. Belotserkovsk geological exploration field party 1975-1977. Belaya Tserkov (in Russian).
- Trypolska, G., 2020. How is climate change manifesting itself in Ukraine? Retrieved from <https://ua.boell.org/uk/2020/06/09/yak-proyavlyaetsya-zmina-klimatu-v-ukraini> (accessed 13 April 2021) (in Ukraine).
- Vasylenko, B.V., Novak, K.V., Olshevska, O.Yu., 2016. Geological and economic assessment of operational reserves of sites No. 1 and No. 2 of Zhashkiv drinking groundwater deposit in Zhashkiv, Cherkasy region (calculation of reserves as of 30.04.2015). Kyiv (in Ukrainian).
- Velikanov, V.A., Komar, V.A., 1964. Hydrogeological map of USSR of the 1:50 000 scale. Report of the South Ukrainian Geological Expedition on hydrogeological survey of sheets M-36-109-V (Uman) and M-36-109-G (Babanka). Kyiv (in Russian).

Received 17.02.2021

Received in revised form 15.04.2021

Accepted 17.04.2021

L.I. Petrenko\*, I.M. Romanyuk, N.B. Kasteltseva, I.A. Persits

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

E-mail: Petrenko.L@nas.gov.ua; romaniuk@hydrosafe.Kyiv.ua; mnbkastel@gmail.com

\* Corresponding author

#### MODELLING OF ARTIFICIAL INCREASE IN PRODUCTIVITY OF WATER INTAKE WELLS IN CRYSTALLINE ROCKS (ON THE EXAMPLE OF ZHASHKIV GROUNDWATER DEPOSIT, UKRAINE)

Global warming, as well as contamination of surface and ground water are currently the main factors that make the search for alternative sources of drinking water extremely pressing. The majority of aquifers commonly exploited for drinking water supply are contained in sedimentary deposits. Utilization of groundwater in fractured crystalline water-bearing rocks may be an alternative source of drinking water. However, experience in effective use of fractured rocks aquifer for water supply is very poor due to the lack of data on the crystalline rocks fracturing and, accordingly, their water-bearing capacity. Improving the effectiveness of using such geological environments is a very challenging task, yet possible with artificial recharge of crystalline rocks aquifers. Computation modeling is a widespread and proven way to study groundwater behavior in sedimentary deposits, unlike in fractured crystalline rocks. The present study focuses on the groundwater flow model to consider the method of improving the productivity of water intake wells in fractured crystalline rocks aquifer through artificially increase of the rocks' fracturing. On the groundwater flow model for the Zhashkiv groundwater deposit, several scenarios with increase of the crystalline rocks fracturing were simulated and the effect on changing the well pumping rate was evaluated for one of the wells.

**Keywords:** groundwater; resources; groundwater productivity; modeling; fractured crystalline rocks; wells.