

© В.І. Тимошук<sup>1</sup>, А.М. Загриценко<sup>1</sup>, Є.А. Шерстюк<sup>1</sup>, І.В. Чушкіна<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ЧИСЕЛЬНА ПЛАНОВО-ПРОСТОРОВА ГІДРОГЕОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ НОВОТРОЇЦЬКОГО РОДОВИЩА ФЛЮСОВИХ ВАПНЯКІВ

© V. Tymoshchuk<sup>1</sup>, A. Zahrytsenko<sup>1</sup>, Y. Sherstiuk<sup>1</sup>, I. Chushkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

### NUMERICAL SPATIAL GROUNDWATER FLOW MODEL OF THE NOVOTROITSKE FLUX LIMESTONE DEPOSIT

**Мета.** Розробка чисельної планово-просторової гідрогеологічної моделі Новотроїцького родовища на основі аналізу (особливостей?) його сучасного гідродинамічного стану.

**Методика.** Аналіз геолого-гідрогеологічних та гірничотехнічних умов території родовища, математичне моделювання геофільтраційних процесів з використанням програмного комплексу Visual MODFLOW, вирішення епігнозних (обернених) задач в нестационарній постановці, верифікація розробленої геофільтраційної моделі відповідно до сучасних умов досліджуваної території.

**Результати.** В роботі на основі аналізу даних про геолого-гідрогеологічні та гірничо-геологічні умови досліджуваної території встановлені основні фактори, що визначають формування гідродинамічного режиму підземних вод в межах ділянок розташування Західно-доломітного та Вапнякових кар'єрів. На підставі виконаних досліджень обґрунтована загальна гідродинамічна схема досліджуваної території та розроблена і верифікована геофільтраційна модель, що враховує особливості геологічної будови та гідрогеологічних умов Новотроїцького родовища.

**Наукова новизна.** Встановлені закономірності формування гідродинамічного режиму Новотроїцького родовища флюсових вапняків на стадії затоплення на основі відтворення його в чисельній геофільтраційній моделі.

**Практична значимість.** Отримані дані дозволяють розробити оптимальну схему засипки відпрацьованого кар'єру з урахуванням гідрогеологічних умов, що мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище, оцінити ризики підтоплення прилеглих до вироблених просторів територій та розробити заходи щодо їх запобігання. Результати можуть бути використані для прогнозування зміни гідрогеологічних умов при подальшому розвитку (згортанні) гірничих робіт та використані як наукове обґрунтування моніторингу стану підземної гідросфери та розробки нормативно-правових актів у галузі охорони навколишнього середовища.

**Ключові слова:** Новотроїцьке родовище флюсових вапняків, гідродинамічний режим, математичне моделювання, затоплений кар'єр, засипка кар'єра.

**Вступ.** Відкритий спосіб видобутку корисних копалин в Україні є основним – він застосовується приблизно у 80% родовищ, що розробляються [1, 2]. Сучасний стан відкритої розробки корисних копалин характеризується постійним збільшенням глибин видобування, зростанням об'ємів відвальних порід, а також підвищенням вимог до збереження екологічного стану навколишнього середовища [3].

Засипка виробленого простору кар'єру є одним із підходів до скорочення обсягів гірничопідготовчих робіт, забезпечення мінімальних витрат на

транспортування порід розкриву і спрощення організації внутрішнього відвалування й збереження навколишнього середовища на видобувних підприємствах та прилеглих територіях. Засипка відпрацьованих кар'єрів – це складний технологічний процес, який відбувається у взаємодії з геологічним масивом та з підземною гідросферою і є предметом досліджень багатьох учених [4–7]. Переважно існуючі дослідження постмайнінгових процесів спрямовані на вивчення просторово-часових параметрів зміни конусу депресії навколо об'єкту [8]. Принципово відрізняється процес засипки кар'єрного простору в умовах його затоплення, коли можливе виникнення перевищення допустимих рівнів ґрунтових вод на прилеглих територіях, що може призвести до тимчасового підтоплення. В цих умовах важливо коректно врахувати планові обсяги та графіки складування. Проте, достовірний прогноз зміни гідродинамічного режиму в умовах засипки неможливий без врахування деталізованих даних про геологічні, гідрогеологічні та технологічні умови досліджуваної та прилеглих ділянок родовища. Найефективнішим підходом до вивчення умов та прогнозування їх змін є чисельне геофільтраційне моделювання [9, 10].

Дана робота присвячена створенню геофільтраційної моделі Новотроїцького родовища з метою комплексного вивчення та прогнозу зміни режиму підземної гідросфери в умовах засипки затопленого кар'єрного простору. Корисною копалиною Новотроїцького родовища, що відпрацьовується, є вапняки флюсові звичайні, вапняки флюсові доломітизовані [1], що відносяться до числа найбільших родовищ України [2, 6].

**Основна частина.** В адміністративному відношенні Новотроїцьке родовище флюсових вапняків і доломітів розташовано на території Волноваського району Донецької області. Безпосередньо на родовищі розташоване селище Новотроїцьке, на захід від нього на відстані 2...3 км – селище Ольгинка [6]. Західно-доломітна ділянка № 3, в межах якої розташований затоплений Західно-доломітний кар'єр № 3 (ЗДК-3), відноситься до західної частини Новотроїцького родовища.

Згідно зі схемою гідрогеологічного районування південна частина досліджуваної території належить до області тріщинних вод Українського кристалічного масиву, центральна і північна частини розташовані в межах Донецької складчастої області. Район розвитку відкритої частини карбонатної товщі  $C_1^1$  від с. Ольгинка на заході до м. Комсомольське на сході у гідрогеологічному відношенні представляє собою єдину структуру з характерними гідрогеологічними умовами і особливостями формування підземних вод. Основним водоносним горизонтом, як у відношенні водозбагаченості, так і ресурсів підземних вод, є водоносний горизонт карбонатної товщі нижнього карбону ( $C_1^1$ ). Горизонт залягає на обводнених слабо проникних породах девону і докембрію, перекритий здренованими четвертинними відкладеннями.

Підземні води цього горизонту приурочені до закарстованих і тріщинуватих вапняків, що простягаються у широтному напрямку від с. Ольгинка до м. Комсомольське. Ширина розвитку смуги розповсюдження горизонту коливається від 6,0...7,0 км в середній частині до 0,78...1,5 км в східній і західній частинах.

Середній відсоток закарстованості по району складає 22%, а максимальна глибина карстових воронок досягає 250...300 м.

Потужність водоносного горизонту збільшується у північно-східному напрямку і свого максимального значення досягає біля північної границі смуги розвитку карбонатної товщі, складаючи в середньому 250 м.

Навколо водозаборів і кар'єрів сформувалися депресійні воронки, які досягли границь водоносного горизонту. Вони витягнуті в субширотному напрямку. Найбільшу протяжність має депресійна воронка, що сформувалася навколо Стельського кар'єру і водозабору Кипуча Криниця і простяглася на захід на 14 км. З огляду на низьку водопроникність відкладень, що граничать з карбонатною товщею, депресійна воронка за межі границь водоносного горизонту не розповсюджується. Мінералізація підземних вод змінюється у межах 1,9...3,5 г/л, складає у середньому 2,0...2,5 г/л, переважаюча жорсткість 14,0...22,0 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Слід відзначити, що вказані горизонти мають, в основному, низькі фільтраційні властивості, підвищену мінералізацію і жорсткість підземних вод, і не мають практичного значення для централізованого водопостачання.

Для оцінки впливу засипки затопленого виробленого простору Західно-доломітного кар'єру № 3 на підземну гідросферу використана реалізована у програмному комплексі Visual MODFLOW чисельна модель геофільтрації, яка представляє собою модель тривимірного потоку підземних вод постійної щільності в пористому середовищі [11].

Основним об'єктом досліджень в чисельній моделі є зона вільного водообміну, що містить водоносні горизонти четвертинних відкладень, вапнякових і теригенних відкладень нижнього карбону і верхнього девону, ускладнених ефузивними утвореннями різного віку, а також тріщинуватої зони кори вивітрювання кристалічного масиву.

При підготовці гідрогеологічної моделі і обґрунтуванні гідродинамічної схеми використані дані щодо геологічної будови і геоструктурних особливостей досліджуваного району і безпосередньо території Новотроїцького родовища.

У якості північної і південної границь модельованої області прийняті контури вододільних ділянок долини р. Суха Волноваха та її притоків, східної границі – ділянка Оленівського родовища з розташованими в його межах відпрацьованими кар'єрами, західної – границя Новотроїцького родовища на західному контурі досліджуваної території.

Важливою особливістю ділянки Західно-доломітного кар'єру № 3 (ЗДК-3) є характер її північно-східної границі, що проходить вздовж Північно-Барсуковського розлому. На північний схід від розлому припідняте положення покрівлі девонських відкладень створює екрануючий вплив для потоку підземних вод, що формується в південній частині родовища, при цьому, східна частина ділянки повністю екранується слабопроникними породами девону, а західна, де девонські відкладення підняті до відміток  $\pm 0,0 \dots -20,0$  м – частково.

До техногенних елементів, що ускладнюють природний рельєф в межах досліджуваної території, відносяться діючий кар'єр Вапняковий, відпрацьовані Західно-доломітний кар'єр № 3 та кар'єри Оленівського родовища, а також відвали розкривних порід та порідні відвали ДОФ.

З урахуванням просторового положення зазначених меж геофільтраційна модель визначена в прямокутних координатах відповідно у широтному напрямку 7386000...7400000 м і меридіональному 5283000...5292000 м і має загальну площу 126,0 км<sup>2</sup> (рис. 1).

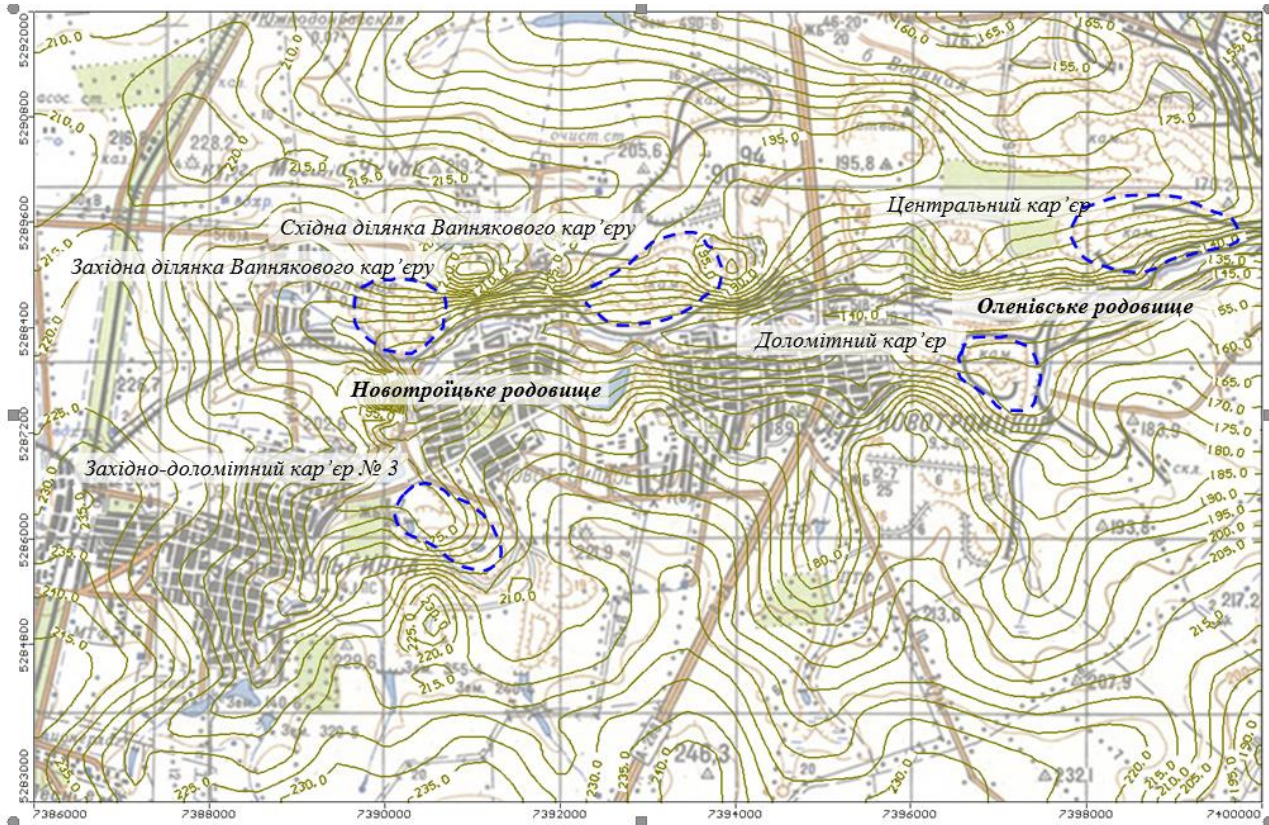


Рис. 1. Геофільтраційна модель досліджуваної території, рельєф денної поверхні

Площа модельованої області дискретизована розрахунковими блоками 100×100 м, що дозволило з достатньою детальністю відобразити як геометрію модельованих об'єктів, так і гіпсометрію поверхонь розрахункових породних шарів, контури внутрішніх і зовнішніх гідродинамічних границь та рівневі поверхні водоносних горизонтів. Структура геофільтраційної моделі приведена до тришарової товщі, представленій відкладами нижнього карбону, верхнього і середнього девону та докембрію. Прийняті до розрахунку гідродинамічні параметри, та їх зональність в межах розрахункових шарів уточнені за даними вирішення обернених задач.

У якості гідродинамічних границь на зовнішніх контурах моделі до розрахунку прийняті граничні умови третього роду ( $Q = f(H)$ ), що відповідають умовним віддаленим контурам із забезпеченим живленням.

Величини напорів на зовнішніх контурах моделі визначені виходячи із характеру залягання поверхні підземних вод та напрямку їх руху, який в природних умовах відбувається із заходу на схід у вигляді потоку вздовж р. Суха Волноваха. За даними матеріалів гідрогеологічних досліджень абсолютні відмітки поверхні



підземних вод в межах досліджуваної території змінюються від 220,0 м біля західної і південної границь території до 135,0...145,0 м – на сході.

Водопровідність на зовнішніх контурах розрахункових шарів визначена з усереднених значень їх фільтраційної проникності в межах модельованої області. Розрахункові величини напорів і відповідні їм значення водопровідностей на зовнішніх границях модельованої області наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункові параметри гідродинамічних границь на зовнішніх контурах модельованої області

Зовнішні контури модельованої області	Абсолютні відмітки рівня, м	Водопровідність, м <sup>2</sup> /добу
Східний контур	140,0...185,0	13,733...21,352
Західний контур	200,0...210,0	20,518...24,946
Північний контур	155,0...210,0	15,989...21,466
Південний контур	195,0...230,0	22,164...24,263

При моделюванні процесу затоплення Західно-доломітного кар'єру № 3 і кар'єрів Оленівського родовища задання інфільтраційного живлення в межах затоплених ділянок кар'єрів виконувалось з урахуванням величини випаровування з водної поверхні, яка для кліматичних умов досліджуваного району складає близько 700...800 мм/рік.

Методикою моделювання передбачалось вирішення обернених (епігнозних) задач в нестационарній постановці, в процесі якого була встановлена адекватність відображення в геофільтраційній моделі гідродинамічних умов досліджуваної території для подальшого отримання прогнозного положення рівнів води у виробленому просторі Західно-доломітного кар'єру та на прилеглий території при його засипці розкритими і відвальними породами.

Зміни гідродинамічного стану в геофільтраційній моделі при вирішенні обернених задач визначались послідовним зниженням розрахункових відміток контурів дренажу на ділянках діючих кар'єрів, значення яких для періоду спостережень 2000–2019 рр.

У якості критеріїв збіжності геофільтраційної моделі використані балансові складові підземних вод – кар'єрний водовідлив на діючих кар'єрах, розташованих у межах модельованої області, та витрати річкового стоку, а також рівневий режим дзеркала води у виробленому просторі Західно-доломітного кар'єру № 3, встановлений у відповідності до динаміки його затоплення.

Задачі вирішувались у нестационарній постановці, що дозволило врахувати зміни гідродинамічного режиму в часі під впливом розвитку гірничих робіт на Новотроїцькому родовищі та їх припинення на ділянках Оленівського родовища.

Отримані за результатами виконаних розрахунків модельні дані щодо величин кар'єрного водовідливу та динаміки рівневого режиму при затопленні ЗДК-3 наведені у порівняльній таблиці фактичних і розрахункових даних на

відповідні розрахункові періоди – табл. 2. Згідно з даними моделювання розрахункові значення величин кар’єрного водовідливу практично не виходять за межі їх фактичних значень, а відхилення відміток рівня води на період затоплення кар’єру ЗДК-3 не перевищують значень природних коливань рівнів підземних вод 1,5...2,6 м.

Таблиця 2

Фактичні і розрахункові величини кар’єрного водовідливу і рівнів води при затопленні Західно-доломітного кар’єру № 3

Розрахунковий період	Західно-доломітний кар’єр № 3				Західна ділянка Вапнякового кар’єру			Східна ділянка Вапнякового кар’єру			Річкові витрати на ділянці кар’єрів, м <sup>3</sup> /добу
	Відмітка дна, м	Водовідлив модель м <sup>3</sup> /год	Відмітка води, м		Відмітка дна, м	Водовідлив, м <sup>3</sup> /год		Відмітка дна, м	Водовідлив, м <sup>3</sup> /год		
			факт	модель		факт	модель		факт	модель	
Епігноз (2000–2020 рр.) – затоплення ЗДК-3											
2000	45,0	540	–	45,29	67,0	554...641	432	45,0	511...611	558	13208
2001	45,0	520	–	45,28	67,0	554...919	418	30,0	434...666	639	13208
2002	45,0	506	–	45,27	60,0	560...689	455	30,0	544...668	625	13208
2003			–	66,11	60,0	425...640	486	30,0	454...611	617	13208
2010			128,30	128,24	60,0	–	530	30,0	–	579	13208
2013			–	132,16	49,0	–	562	30,0	–	586	13208
2014			–	133,06	49,0	548...641	571	20,0	255...271	422	13208
2017			134,60	134,67	39,0	435...637	543	20,0	215...330	449	13208
2018			–	135,06	29,0	379...812	602	13,0	215...363	482	13208
2019			135,10	135,35	19,0	494...637	658	13,0	308...462	484	13208
2020			135,50	135,57	8,0	–	656	2,0		486	13208

Положення рівнів води у плані та вертикальному перерізі на розрахункові періоди, що відповідають початку затоплення кар’єру ЗДК-3 (станом на 2002 р.) та існуючому на момент досліджень положенню (станом на 2019–20 рр.), отримані за результатами вирішення обернених задач, приведені на рис. 2, 3 і рис. 4, 5. Наведені дані дають підстави вважати задовільною досягнуту збіжність результатів геофільтраційного моделювання, зважаючи на складність геолого-гідрологічних і гірничотехнічних умов родовища та суттєву неоднорідність фільтраційних властивостей водовмісних відкладень.

Аналіз балансових складових модельованої області станом на 2002 р. показує, що визначальними у формуванні гідродинамічного вигляду території Ново-троїцького родовища є боковий притік із прилеглих масивів (56,8 %) і живлення за рахунок поверхневого стоку р. Суха Волноваха та її притоків (28,1 %), підпорядковане значення – інфільтраційне живлення по площі модельованої області (4,6 %).

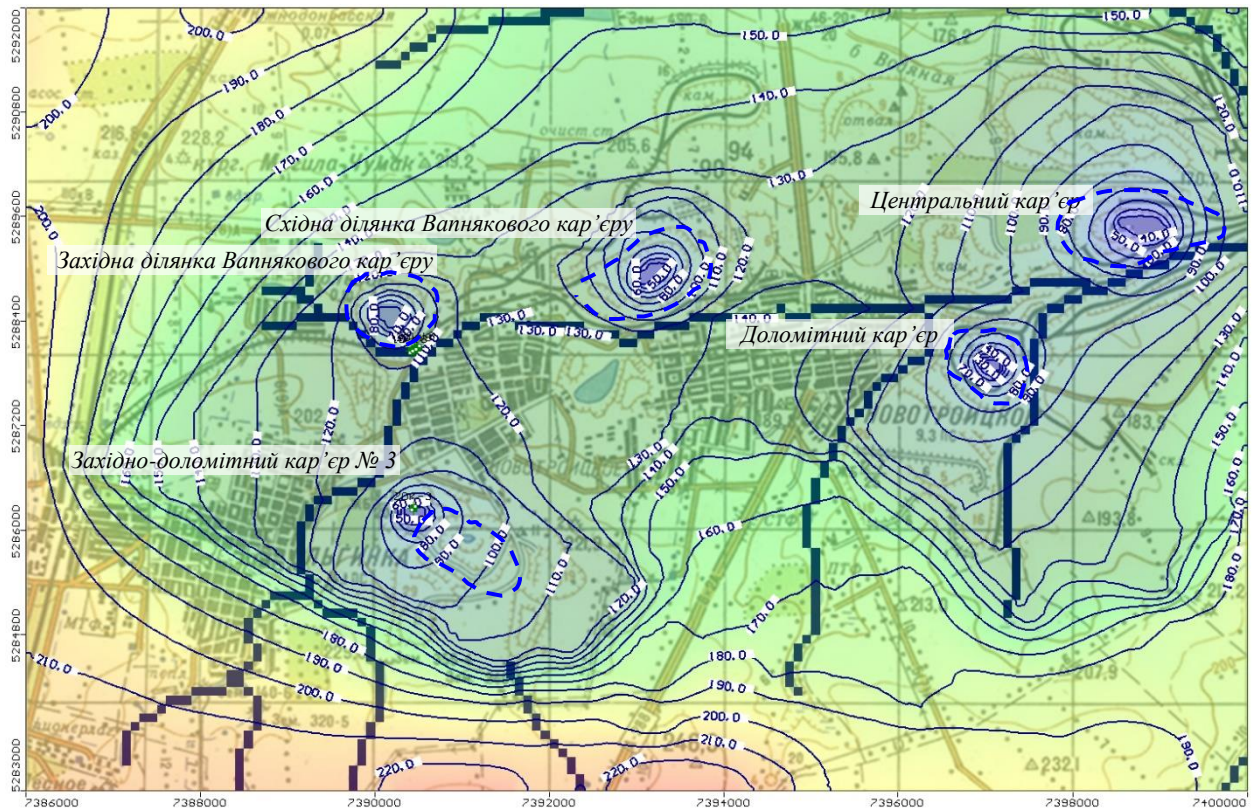


Рис. 2. Розрахункова рівнева поверхня підземних вод дочетвертинних відкладень станом на 2002 р. (епігноз) – перед початком затоплення кар'єру ЗДК-3, м

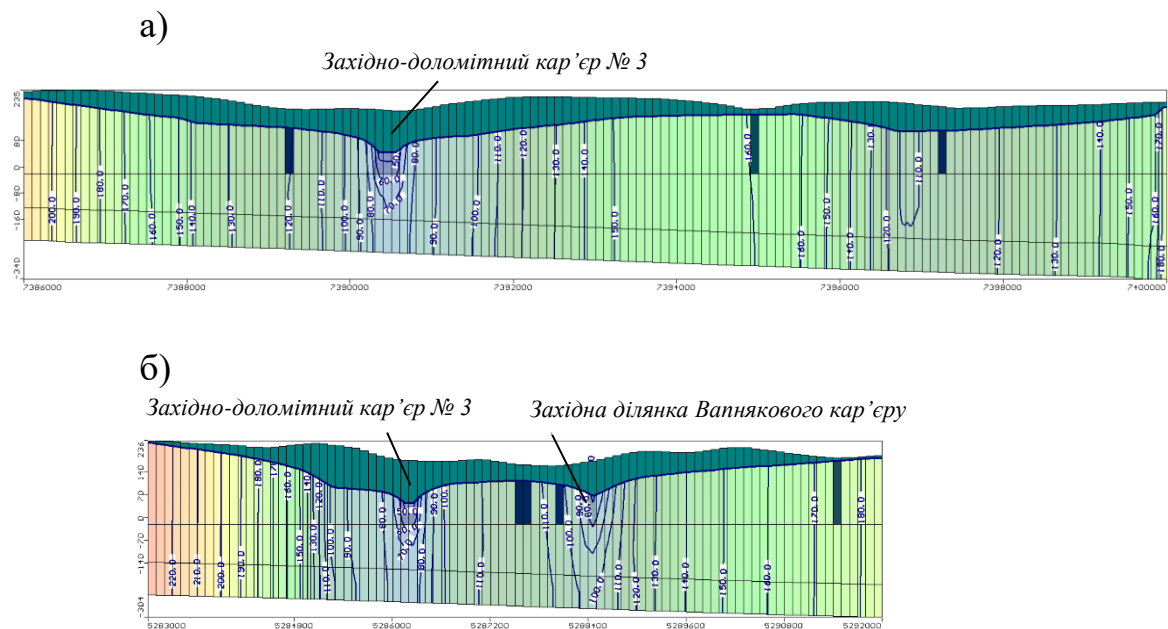


Рис. 3. Гідродинамічні профілі території Новотроїцького родовища станом на 2002 р. (епігноз), м:  
а – широтний напрямок; б – меридіональний напрямок



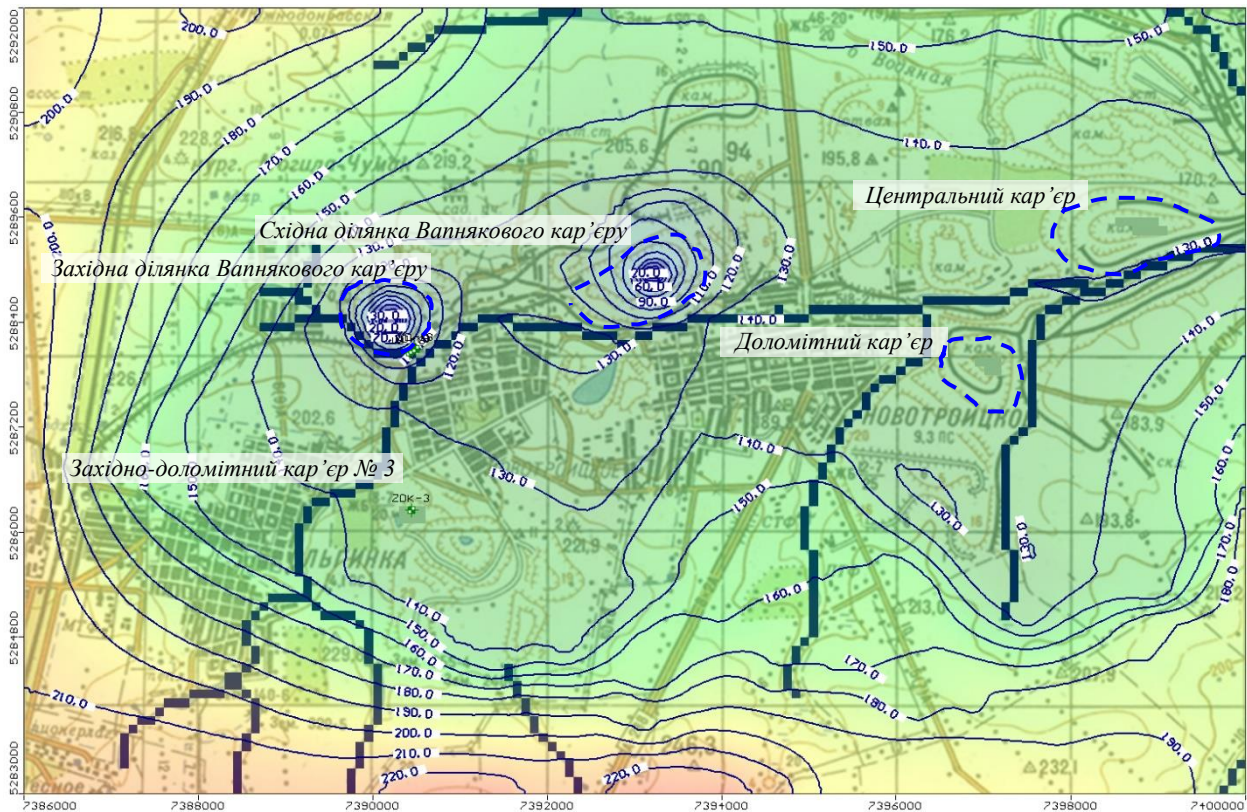


Рис. 4. Розрахункова рівнева поверхня підземних вод дочетвертинних відкладень станом на 2020 р. (епігноз), м

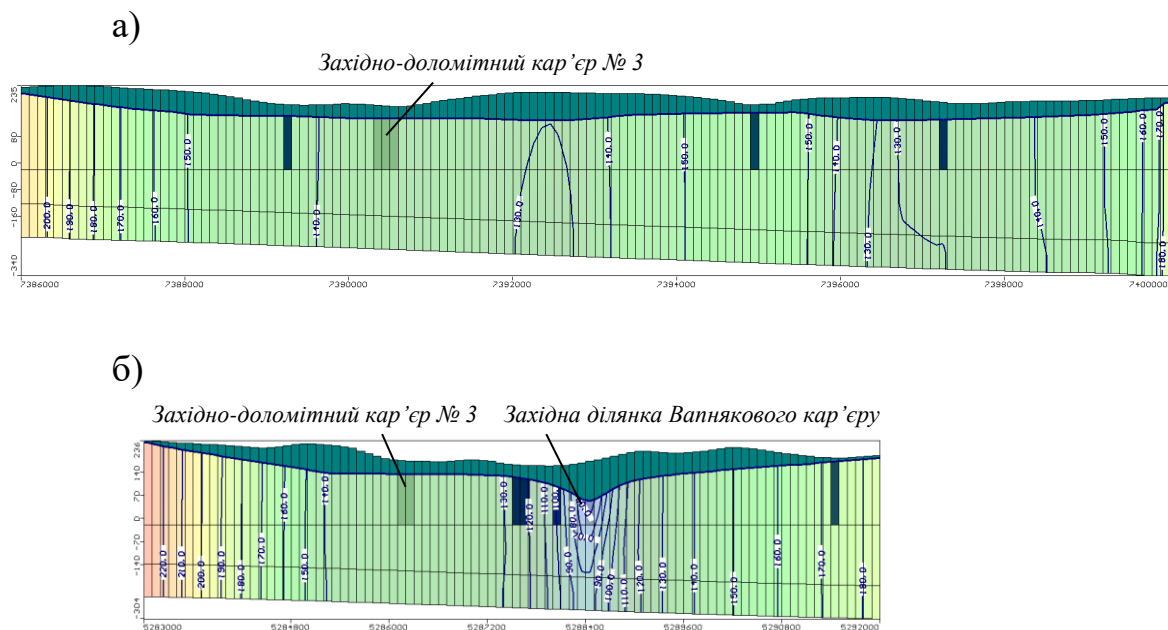


Рис. 5. Гідродинамічні профілі території Новотроїцького родовища станом на 2020 р. (епігноз), м: а – широтний напрямок; б – меридіональний напрямок

У розвантаженні підземних вод майже повністю переважає водозабір з водовідливів вапнякових і доломітних кар'єрів Новотроїцького і Оленівського кар'єрів, який досягає 98,6 %.



Станом на 2020 р, в умовах затоплення Західно-доломітного кар'єру № 3 і виведення із експлуатації кар'єрів Оленівського родовища відбувається зменшення загального балансу моделі (на 51,8 %) при приблизному збереженні співвідношення балансових складових у живленні модельованої області – бокового притоку (59,2 %), витрат поверхневих вод (31,6 %) і інфільтрації атмосферних опадів (8,9 %) і зменшенні величини водовідбору з кар'єрного водовідливу (52,7 %) – у розвантаженні.

**Висновки.** В умовах порушеного гідродинамічного режиму рівневий режим підземних вод в межах Новотроїцького родовища визначається, з одного боку, наявністю ґрунтового водоносного горизонту, приуроченого до четвертинних алювіальних і еолово-делювіальних відкладень, з іншого – потужного водоносного комплексу відкладень нижнього карбону і верхнього девону, а також водовмісних утворень Приазовського кристалічного масиву, що знаходяться під дренаючим впливом кар'єрного водовідливу.

За результатами вивчення геолого-гідрогеологічних умов розроблена просторова чисельна геофільтраційна модель території Новотроїцького родовища та виконана її верифікація з використанням результатів вирішення обернених задач та оцінки збіжності фактичних та розрахункових даних щодо рівневого режиму підземних вод та балансових складових модельованої області.

Отримані за результатами виконаних розрахунків модельні дані щодо величин кар'єрного водовідливу та динаміки рівневого режиму при затопленні Західно-доломітного кар'єру № 3 дають підстави вважати задовільною досягнуту збіжність результатів геофільтраційного моделювання, зважаючи на складність геолого-гідрогеологічних і гірничотехнічних умов родовища та суттєву неоднорідність фільтраційних властивостей водовмісних відкладень.

Отримані результати досліджень дозволять обґрунтувати рекомендації щодо можливості складування розкривних і відвальних порід до виробленого простору кар'єру та визначити умови організації їх складування шляхом виконання варіантних прогностичних розрахунків гідродинамічного режиму в межах родовища та на прилеглих ділянках. Такий підхід дозволить передбачити та уникнути підтоплення на прилеглих до виробленого простору ділянках, а також врахувати планові обсяги складування відвальних та розкривних порід, що є важливим в умовах розробки ефективних стратегій ліквідації гірничих підприємств та збереження навколишнього середовища.

#### Перелік посилань

1. Сивий, М. Я. (2017). Ресурсна база нерудної сировини для металургії в Україні: сучасний стан, перспективи. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, 22(2 (31)), 118–130.
2. Novitskyi, R., Masiuk, O., Napich, H., Pavlychenko, A., & Kovalenko, V. (2023). Assessment of coal mining impact on the geocological transformation of the Emerald network ecosystem. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 107–112.  
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/107>

3. Закон України «Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року». № 4731-VI від 17.05.2012 р. (2012). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#Text>
4. Bozan, C., Wallis, I., Cook, P. G., & Dogramaci, S. (2022). Groundwater-level recovery following closure of open-pit mines. *Hydrogeology Journal*, 30(6), 1819–1832. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02508-2>
5. Johnson, B., & Carroll, K. C. (2007). Waste rock backfill of open pits: design, optimisation, and modelling considerations. In *Conference: mine closure 2007, Conference Proceedings, Santiago, Chile* (pp. 701-708).
6. Волкова, Т. П. & Боярська, А. Д. (2018). Закономірності розподілу якості сировини Новотроїцького родовища вапняків. *Технології і процеси у гірництві та будівництві: збірник наукових праць*, 200–212.
7. Дриженко, А. Ю., Адамчук, А. А., Тамуя, С. А., & Тельнов, В. Г. (2018). Дослідження параметрів внутрішніх відвалів у виробленому просторі відпрацьованих глибоких кар'єрів. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (53), 56–65.
8. Cook, P.G., Miller, A.D., Wallis, I., & Dogramaci, S. (2022), Facilitating Open Pit Mine Closure with Managed Aquifer Recharge. *Groundwater*, 60, 477–487. <https://doi.org/10.1111/gwat.13178>
9. Sadovenko, I., Tymoshchuk, V., Zahrytsenko, A., Rodriguez, F., Sherstiuk, Y., Vlasov, V., & Chushkina, I. (2024). Hydrotechnical and ecological principles of water resources management for a mined-out mine field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012069>
10. Tymoshchuk, V., Sherstiuk, Y., & Morozova, T. (2018). Analysis of patterns of the open-pit mine water influx formation in the conditions of the Inhulets iron ore deposit using a three-dimensional geofiltration model. *E3S Web of Conferences*, 60, 00030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000030>
11. McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr83875>

### ABSTRACT

**The purpose** of study is to analyze the current hydrodynamic mode of the Novotroitske deposit territory and to develop and verify the spatial groundwater flow model of the deposit.

**The methods.** A spatial model of the deposit was created using Modflow software, initial data arrays created based on the analysis of geological, hydrogeological and mining-technical characteristics of the deposit area. The adequacy of approximation the hydrodynamic conditions of the studied territory by the numerical model was approached during the stage of inverse problem solving (epignosis) in a transient flow on the stage of pit flooding.

**Findings.** In this study, the main factors that rule the hydrodynamic mode of groundwater flow within the area of Western-Dolomite and Limestone quarries are determined based on the analysis of data on the geological-hydrogeological and mining-geological conditions of the studied territory. General hydrodynamic layout of the studied territory is justified. Based on the conducted studies, a groundwater flow model that takes into account the specifics of the geological structure and hydrogeological conditions of the Novotroitske deposit was developed and verified.

**The originality.** The water balance component distribution of the groundwater flow mode of the Novotroitsky flux limestone deposit was defined based on the numerical simulation on the stage of pit flooding.

**Practical implementation.** Obtained data will make it possible to develop an optimal pit filling scheme considering hydrogeological conditions that minimizes the negative impact on the

environment. Additionally, it will allow us to assess the risks of flooding of areas adjacent to the mining areas and to develop measures to prevent them. The results can be used to predict changes in hydrogeological conditions during the further development (or closure) of mining operations and be used as a scientific basis for the regulatory development in the field of environmental protection, for monitoring the environmental conditions and detecting violations of environmental legislation, which contributes to ensuring balanced development of the mining industry and environmental protection.

**Keywords:** *Novotroitske deposit, flooded quarry, groundwater flow mode, numerical modeling, quarry backfilling.*