

УДК 51-74:556.33(013): 627.5: 69.059.7
DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.26>

ПРОГНОЗ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТА ГІДРОГЕОХІМІЧНОГО РЕЖИМІВ ПІДЗЕМНИХ ВОД В УМОВАХ ПРОЕКТОВАНОГО БУДІВНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ХВОСТОСХОВИЩА

Тимощук В. І. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3266-9828

Загриценко А. М. – доктор технічних наук,
завідувачка кафедри гідрогеології та інженерної геології
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-9405-6675

Шерстюк Є. А. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-1844-1985

Чушкіна І. В. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри будівництва, геотехніки та геомеханіки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1251-6664

Деревягіна Н. І. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-5584-8592

Дослідження виконані в зв'язку з оцінкою умов проектуваного будівництва хвостового господарства Іршанського ГЗК та його впливу на гідродинамічний і гідрогеохімічний режими водоносних горизонтів на прилеглий території.

Об'єкт досліджень – геофільтраційні та геоміграційні процеси в ґрунтовому масиві та огороджувальних спорудах на ділянці проектуваного будівництва хвостосховища Іршанського ГЗК.

Мета роботи – прогнозна оцінка змін гідродинамічного і гідрогеохімічного режимів ділянки будівництва хвостосховища в умовах його експлуатації.

В роботі виконано аналіз і узагальнення даних про геолого-гідрогеологічні та геолого-технічні умови досліджуваної території та ділянки хвостосховища Іршанського ГЗК, розроблено чисельні геофільтраційну та геоміграційну моделі території з використанням програмного забезпечення Modflow. Виконано прогнозу оцінку змін гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів на ділянці огороджувальних споруд хвостосховища в умовах його експлуатації.

Прогнозна оцінка змін гідродинамічного режиму в умовах проектуваного будівництва та подальшої експлуатації хвостосховища із заповненням його до відмітки 190,0 м при висоті огороджувальних дамб 10,5 м свідчить про очікуваний суттєвий, до 2,0 м і більше, підйом рівнів підземних вод безпосередньо навколо хвостосховища, і, як наслідок, підтоплення і затоплення прилеглих до хвостосховища територій на відстані від 500 до 1000 м.

Очікувані зміни в гідрогеохімічному стані прилеглої території характеризуються розвитком ореолів підземних вод з підвищеними мінералізацією і вмістом сульфат-іону SO_4^{2-} , з прориванням їх контурів в напрямку річкової мережі переважно в межах трицинуватой

зони кристалічних порід. При цьому сукупний вміст розчинених речовин і сульфат-іону на контурі річок Добринка, Тростяниця та правого притоку річки Ріхта в абсолютному вираженні не перевищують значень 500,0 і 300,0 мг/л відповідно.

Ключові слова: Іршанський ГЗК, хвостосховище, огорожувальні споруди, гідродинамічний режим, геофільтраційні процеси, геоміграційні процеси.

Tymoshchuk V. I., Zahrytsenko A. M., Sherstiuk Ye. A., Chushkina I. V., Derevyahina N. I. The forecast of the hydrodynamic and hydrogeochemical modes under conditions of designed tailing construction and operation

The research was conducted to assess the conditions of the planned construction of the tailings dump of the Irshansk mining complex and its impact on the hydrodynamic and hydrogeochemical modes of the aquifers in the adjacent territory.

The subject of the study is the groundwater flow and transport processes in the soil massifs and in the enclosing structures at the site of the planned construction of the Irshansky tailings dump.

The purpose of the study is to predict changes in the hydrodynamic and hydrogeochemical modes of the tailing's storage facility construction site in terms of its operation.

The analysis and generalization of data on geological-hydrogeological and geotechnical conditions of the tailings section territory of the Irshansk mining and processing plant were performed, numerical groundwater flow and transport models of the territory were developed using Modflow software.

The forecast of changes in the hydrodynamic and hydrogeochemical modes on the area of tailing containment structures was performed under the conditions of its operation.

In the case of the filling the tailing dump to the level of 190.0 m with the height of the surrounding embankments of 10.5 m, the groundwater level will rise up to 2.0 m or more, directly around the tailing dump, and as a result, will lead to flooding and inundation of the adjacent area at a distance of 500 to 1000 m.

The estimated changes in the hydrogeochemical state of the adjacent territory are characterized by the development of groundwater zones with high salinity and sulfate ion concentration, resulting in the advancement of their contours towards the river system mainly within the fractured zone of crystalline rocks.

At the same time, the total content of dissolved solids and sulfate ion along the contour of the Dobrynka and Trostianyska rivers as well as the Rihta river's right tributary is below, 500.0 and 300.0 mg/l, respectively.

Key words: Irshansk mining and processing plant, tailings, containment structures, hydrodynamic mode, groundwater flow, transport.

Вступ. З будівництвом та експлуатацією хвостосховищ пов'язано багато процесів, що виникають в зоні їх впливу на навколишнє середовище. Зокрема, це зміни у підземній гідросфері, які проявляються в підвищенні рівнів водоносних горизонтів внаслідок фільтраційних втрат, що можуть призвести до підтоплення території, а також до зміни хімічного складу підземних вод та їх забруднення [1–3]. Для достовірного прогнозування змін рівнів ґрунтових вод та кількісної оцінки змін хімічного складу використовуються математичні моделі [4; 5] які дозволяють враховувати в розрахунках складність конфігурації природних об'єктів, нерівномірність розподілу параметрів та мінливість гідродинамічних границь в просторі та в часі, підтвердити достовірність чисельного рішення калібруванням моделі – вирішенням обернених задач для визначених «анкерних» часових періодів з відомими контрольними даними [2; 6–8].

Дослідження виконані в зв'язку з оцінкою умов проектного будівництва хвостового господарства Іршанського ГЗК та його впливу на режим водоносних горизонтів на прилеглий території. Проектується будівництво хвостосховища з огорожувальними дамбами, що складається з 3-х частин відділених одна від одної розподільними дамбами. Для прийняття рішень щодо управління гідрогеологічним режимом під час будівництва та експлуатації необхідним є прогноз підйому рівня ґрунтових вод в результаті створення хвостосховища, прогноз можливого забруднення підземних та поверхневих вод фільтраційними водами.

Таким чином, мета роботи – прогнозна оцінка змін гідродинамічного і гідрогеохімічного режимів ділянки будівництва хвостосховища в умовах його експлуатації досягнута із застосуванням чисельного моделювання, зокрема, методу чисельних різностей.

Загальна частина. Досліджувана територія знаходиться в центральній частині Житомирської області в межах Хорошівського району, між селищами Заброне та Буки. Геологічна будова та гідрогеологічні умови визначаються повсюдним поширенням четвертинних еолово-делювіальних відкладень і відкладень нижньої крейди, що залягають на складно розчленованій поверхні інтрузивних утворень верхнього протерозою.

Гідрогеологічні умови ділянки хвостосховища характеризуються розвитком четвертинного водоносного горизонту, приуроченого до еолово-делювіальних піщано-суглинистих відкладень четвертинного віку, і водоносного горизонту у верхній тріщинуватій частині розрізу верхньопротерозойських відкладень. Гідродинамічний режим в природних умовах формується переважно за рахунок інфільтраційного живлення підземних вод атмосферними опадами і розвантаженням розвинених в межах території проектного будівництва четвертинного і верхньопротерозойського водоносних горизонтів у річкову мережу, яка в межах досліджуваної території представлена річками Ріхта, Добринка і Тростяниця.

При дослідженні гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів території проектного будівництва хвостосховища Іршанського ГЗК використана реалізована у програмному комплексі *Modflow* 2009.1 чисельна модель геофільтрації, яка представляє собою модель тривимірного потоку підземних вод постійної щільності в пористому середовищі і описується частковим диференціальним рівнянням [4; 5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

де k_x , k_y і k_z – гідравлічні провідності у напрямку координатних осей X , Y і Z ; (L^2/T); h – шукана функція напору (L); W – одинична витрата потоку (T^{-1}): для вхідного потоку $W > 0$, для вихідного потоку – $W < 0$; S_s – питома ємність пористого середовища (L^{-1}); t – час (T).

Рівняння (1) разом з граничними і початковими умовами описує тривимірний нестационарний потік підземних вод в гетерогенному і анізотропному середовищі в умовах, коли основні напрямки гідравлічних провідностей співпадають з напрямками координатних осей [4; 5].

Оцінка змін якісного складу підземних вод поширених на досліджуваній території водоносних горизонтів під впливом будівництва та експлуатації хвостосховища виконана за результатами моделювання адвективно-дисперсійного переносу розчинених речовин в потоці підземних вод. Моделювання переносу розчиненої речовини в рухомому потоці виконано з використанням пакета MT3D програмного комплексу *Modflow* [5].

Рівняння, що описує перехід від моделі тривимірного нестационарного потоку підземних вод до моделі переносу розчиненої речовини, має вигляд

$$\frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n, \quad (2)$$

де C^k – концентрація розчиненої речовини k ; θ – ефективна пористість; t – час; x_i – відстань уздовж відповідних осей декартових координат; D_{ij} – тензор коефіцієнтів гідравлічної дисперсії; v_i – швидкість фільтрації, $v = q_i / \theta$; q_s – витрата на одиницю об'єму водоносного горизонту; C_s^k – концентрація джерела або поглиначка розчиненої речовини; $\sum R_n$ – реакція хімічної взаємодії.

Основними параметрами, завдання яких проводиться при описі міграційної моделі, є: початкові концентрації розчиненої речовини в розрахункових шарах, концентрації речовини на гідродинамічних границях гідрогеологічних елементів модельованої області, концентрації по площі живлення і розвантаження (інфільтраційне живлення і випаровування), параметри міграції розчиненої речовини в пористому середовищі.

Гідравлічна дисперсія обчислюється за наступною формулою:

$$D = \alpha_L \cdot \frac{V_L^2}{|v|} + \alpha_H \frac{V_H^2}{|v|} + \alpha_V \cdot \frac{V_V^2}{|v|} + D^*, \quad (3)$$

де D – гідравлічна дисперсія (L² / T); α_L – поздовжня дисперсивність, V_L – поздовжня швидкість потоку вздовж напрямку міграції (L / T); α_H – поперечна горизонтальна дисперсивність (L); V_H – горизонтальна швидкість потоку вздовж напрямку міграції (L / T); α_V – вертикальна дисперсивність (L); V_V – вертикальна швидкість потоку вздовж напрямку міграції (L / T); v – швидкість фільтрації (L / T); D^* – коефіцієнт дифузії (L² / T).

При створенні чисельної моделі розміри розрахункових блоків становили від 100x100 м до 50x50 м на ділянці їх згущення в межах території проектного хвостосховища, що дозволило з достатньою детальністю відобразити конфігурацію секцій хвостосховища та огорожувальних споруд, гіпсометрію геологічних відкладень, контури гідродинамічних границь та рівневі поверхні водоносних горизонтів, площа модельованої області 52,2 км².

Структура моделі відповідно до геологічної будови і залягання водоносних горизонтів апроксимована п'ятьма розрахунковими шарами, враховуючи проектане нарощування огорожувальних дамб хвостосховища. У якості нижньої границі в моделі прийнята умовна поверхня, що відповідає підшві 5-ти метрового інтервалу тріщинуватих кристалічних порід протерозою.

Відповідно до прийнятої структури розрахункові шари в геофільтраційній моделі представлені наступним чином:

1 шар – водоносний – ґрунтово-рослинний шар + товща техногенних відкладень в межах інтервалу планованого складування відходів рудозбагачення, розрахункова потужність від 0,5 до 29,5 м;

2 шар – водоносний – обводнена товща верхньочетвертинних супісків і пісків мілких і середньої крупності, розрахункова потужність 0,5...11,0 м;

3 шар – водоносний – товща верхньо- і середньочетвертинних суглинків і супісків загальною потужністю елювіально-делювіальних суглинків четвертинного віку, розрахункова потужність 0,5..6,0 м;

4 шар – слабопроникний – вторинні та первинні каоліни (глини і суглинки) і каолінізована кора вивітрювання нижньокрейдового віку, розрахункова потужність 2,0...14,0 м;

5 шар – водоносний – тріщинувата зона верхньопротерозойських кристалічних порід – габро-лабрадоритом, розрахункова потужність 5,0 м.

У якості границь на зовнішніх північно-західному і південно-східному контурах моделі задані гідродинамічні границі із забезпеченим живленням ($Q=f(H)$), які встановлені у відповідності до загальної гідродинамічної схеми досліджуваної території і визначаються положенням річок Ріхта, Добринка і Тростяниця. Внутрішньою гідродинамічною границею на ділянці хвостосховища є правий приток річки Ріхта, який в межах модельованої області також заданий граничною умовою $Q=f(H)$.

Інфільтраційне живлення в чисельній геофільтраційній моделі визначено діапазоном 6,1...61,3 мм/рік в залежності від характеру рельєфу та літологічної будови, що відповідає величинам на рівні 1,0...10,0% від загальної кількості атмосферних опадів, рівної згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27: 210 «Будівельна кліматологія» 613,0 мм/рік, і в подальшому корегувалось при вирішенні обернених задач.

Таблиця 1

Балансові складові модельованої області – природний стан

Розрахунковий період	Складові балансу	Живлення, м ³ /добу	Розвантаження, м ³ /добу
Природний стан (серпень – листопад 2018 р.)	Інфільтраційне живлення	914,45	-
	Взаємозв'язок з річками	1,34	-1004,54
	Витрати по контуру	184,31	-88,09
	Випаровування	-	-11,72
	Всього	1100,10	-1104,34
	Похибка		-4,24
	Нев'язка, %		-0,39

За даними калібрування, виконаного за результатами рішення оберненої задачі станом на серпень – листопад 2018 р., відхилення розрахункових відміток рівнів води в четвертинному і нижньокрейдовому горизонтах від фактично встановлених не перевищує 1,59 м (рис. 1).

Методикою моделювання передбачалось вирішення задач з оцінки прогнозованих змін [7; 8] гідродинамічного режиму на ділянці розташування хвостосховища відповідно до прийнятої просторово-часової схеми складування відходів рудозбагачення.

При вирішенні задач нестационарної фільтрації розрахунковий час відповідав періоду від початку експлуатації хвостосховища до його заповнення до відмітки 190,0 м при висоті огорожувальних дамб 10,5 м (абс. відмітка гребеня дамб 190,5 м) становив 50 років (20000 діб). Згідно з часовою схематизацією прогнозних розрахунків значення відміток рівнів води в хвостосховищі відповідали: початкове значення – 179,0 м; 10 років – 180,4 м; 20 років – 182,8 м; 30 років – 185,2 м; 40 років – 187,6 м; 50 років – 190,0 м.

Основним фактором, що визначає формування гідродинамічного режиму на ділянці хвостосховища, є рівень техногенного живлення водоносного горизонту в четвертинних, крейдових і протерозойських відкладеннях в умовах підпертого стану підземних вод за рахунок заповнення чаші хвостосховища. Величина техногенного живлення в межах секцій хвостосховища в геофільтраційній моделі визначалась завданням в його контурах умови забезпеченого живлення $H=Const$.

Показником стану водоносних горизонтів при оцінці впливу будівництва і експлуатації хвостосховища на гідрогеохімічний режим є загальний вміст розчинених

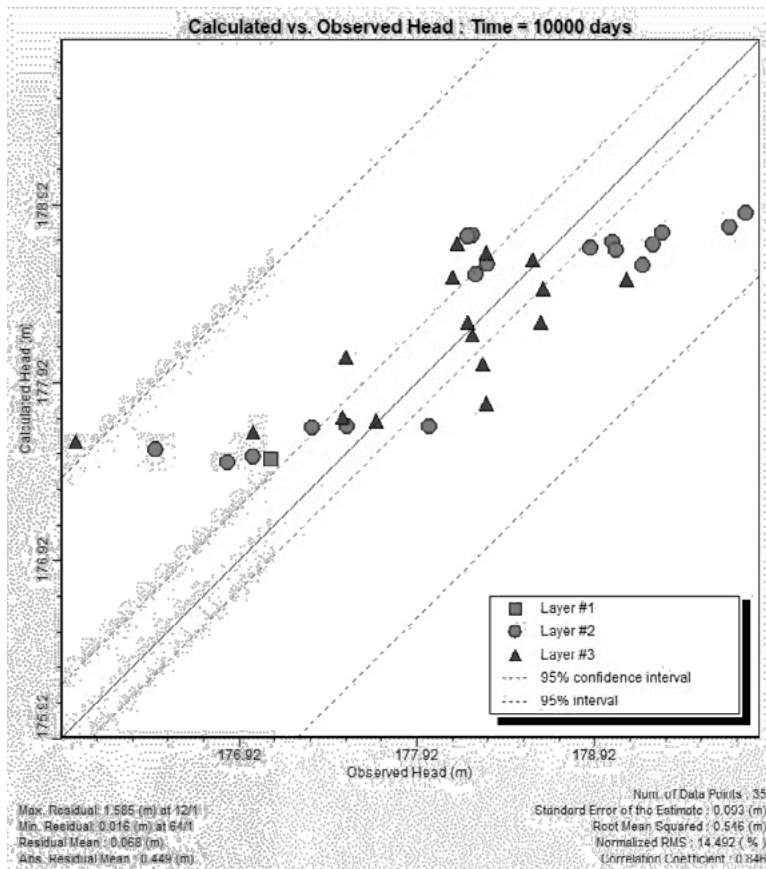


Рис. 1. Калібрування геофільтраційної моделі станом на серпень – листопад 2018 р. – обернена задача, стаціонарний режим фільтрації

речовин [5], який представлений переважно макрокомпонентами. Крім того, у якості показника, що характеризує техногенний вигляд досліджуваної ділянки з урахуванням специфіки об'єкту, прийнятий вміст в підземних водах сульфат-іону SO_4^{2-} .

Природна мінералізація за даними інженерно-геологічних вишукувань підземних вод на ділянці хвостосховища знаходиться в межах 270,0...382,0 мг/л, вміст сульфат-іону (SO_4^{2-}) – 108,8...160,0 мг/л. Ці ж показники у водах хвостів становлять відповідно 1080,0...1116 мг/л і 770,0...788,6 мг/л.

При вирішенні прогнозних міграційних задач зміна гідрогеохімічного режиму модельованих шарів визначалася розсіюванням розчинених речовин, що надходять у складі інфільтраційного живлення в межах площі хвостосховища. Прогнозні розрахунки виконані на часові періоди складування відходів рудозбагачення у чаші хвостосховища, що становлять 10, 20, 30, 40, 50 років ($t = 4000, 8000, 12000, 16000$ і 20000 діб).

Аналіз результатів вирішення прогнозних задач показав, що при проектуваному будівництві і експлуатації хвостосховища в умовах гідравлічної взаємодії

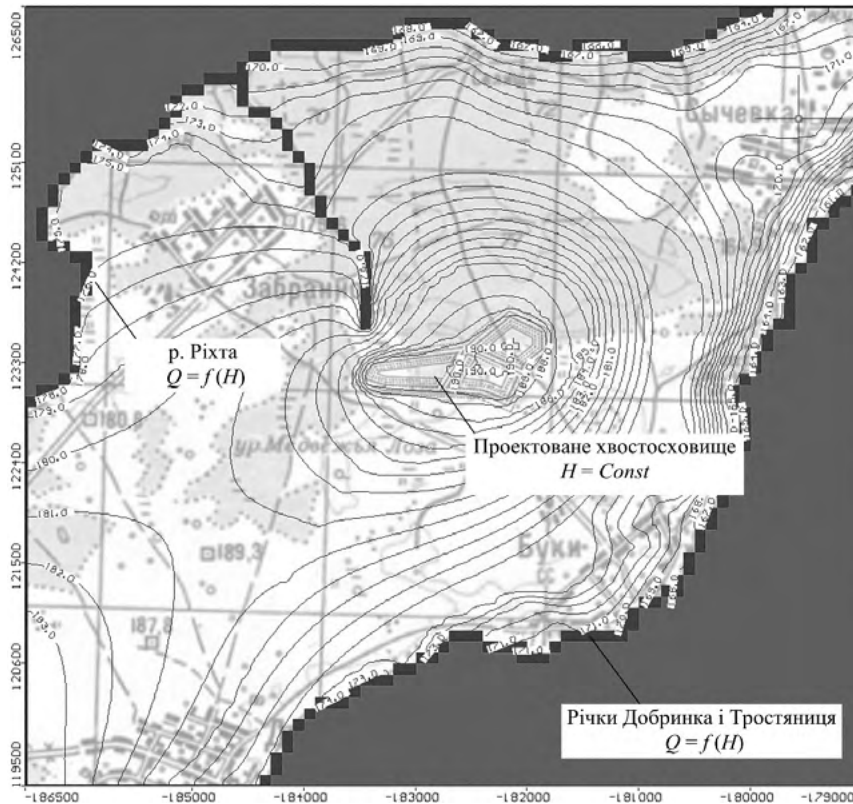


Рис. 2. Прогнозне положення рівнів підземних вод четвертинного водоносного горизонту на кінцевий період експлуатації хвостосховища 50 років ($t = 20000$ діб), м

підземних вод з техногенними відкладеннями (відходами рудозбагачення) на прилеглий території відбувається відповідне рівнів підземних вод, приурочених до порід четвертинного віку та тріщинної зони нижньопротерозойських відкладень.

Зважаючи на те, що досліджувана територія в природних умовах характеризується неглибоким, до 1,0...2,0 м, заляганням рівнів підземних вод, а на деяких ділянках території відзначається заболоченість, прогнозоване підняття рівнів підземних вод буде сприяти подальшим підтопленню і затопленню оточуючої хвостосховища території.

Висновки. Прогноз змін гідродинамічного режиму в умовах проектного будівництва та експлуатації хвостосховища із заповненням його до відмітки 190,0 м при висоті огорожувальних дамб 10,5 м (відмітка гребеня дамб 190,5 м) свідчить про очікуваний суттєвий, до 2,0 м і більше, підйом рівнів підземних вод безпосередньо навколо хвостосховища, і, як наслідок, підтоплення і затоплення прилеглих територій.

Згідно з результатами виконаних розрахунків зміни рівнів підземних вод на прилеглий до хвостосховища території відбуваються впродовж всього розрахункового терміну експлуатації хвостосховища і зумовлюються зростанням абсолютних відміток поверхні складованих до хвостосховища відходів рудозбагачення.

На кінцевий період експлуатації хвостосховища під підтоплення і затоплення підпадають смуги шириною від 500 м на східній і західній ділянках території до 1000 м – на північній і південній ділянках.

Ріст рівнів підземних вод на прилеглих до хвостосховища ділянках визначається величиною фільтраційних втрат, яка у загальному балансі досліджуваної території згідно з даними виконаних розрахунків зростає від 96,31 м³/добу (1,11 л/с) на початку експлуатації хвостосховища до 369,93 і 746,67 м³/добу (4,28 і 8,64 л/с) відповідно на 20 і 50 років (8000 і 20000 діб) експлуатації.

Отримані величини фільтраційних втрат із проєктованого хвостосховища відповідають умовам виконання огорожувальних дамб із місцевого матеріалу з розрахунковим значенням коефіцієнту фільтрації $k = 0,05$ м/добу.

При будівництві та експлуатації хвостосховища очікувані зміни в гідрогеохімічному стані прилеглої території характеризуються розвитком ореолів підземних вод з підвищеними мінералізацією і вмістом сульфат-іону SO_4^{2-} , які характеризуються просуванням їх контурів в напрямку річкової мережі переважно в межах тріщинуватої зони кристалічних порід. При цьому сукупний вміст розчинених речовин і сульфат-іону на контурі річок Добринка, Тростяниця та правого притоку річки Ріхта в абсолютному вираженні не перевищують значень відповідно 500,0 і 300,0 мг/л і знаходяться близько до діапазону концентрацій, встановлених для існуючого стану ділянки проєктованого будівництва.

Для зниження фільтраційних втрат із часті проєктованого хвостосховища і запобігання потрапляння води з підвищеними мінералізацією і вмістом сульфат-іону SO_4^{2-} до водоносних горизонтів доцільно збереження у якості протифільтраційного екрану шару глини і суглинків ПЕ-7,9, а також застосування їх у якості матеріалу верхових укосів огорожувальних дамб.

До інженерних заходів захисного характеру слід віднести зведення по зовнішньому контуру хвостосховища горизонтального дренажу з поверненням дренажних вод в систему оборотного водопостачання проєктованого хвостового господарства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Тарабарова С.Б., Станкевич В.В., Забруднення води підземних водоносних горизонтів при експлуатації хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу. *Гігієна населених місць*. 2018. № 68. С. 70–75.
2. Загриценко А.М. Формування природно-техногенного режиму підземних вод в зоні впливу розробки родовища вапняків. *Екологічні науки*. 2019. № 1 (24). Т. 1. С. 98–103.
3. Садовенко І.О., Загриценко А.М., Деревягіна Н.І. Обґрунтування варіантів екологічного захисту шахтного поля в умовах відновлення рівнів підземних вод. *Збірник наукових праць НГУ*. 2020. № 62–06. С. 65–76.
4. McDonald M.G. and Harbaugh A.W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report. 1984. 83–875. 528 p.
5. Рудаков Д.В. Моделювання в гідрогеології [Текст]: навч. посібник. *Національний гірничий університет*. 2011. 88 с.
6. Sherstuk Y., Perkova T. & Demchenko U., Three-dimensional model creation of ground water seepage in mining zones (Kryvyi Rih iron ore basin). *New Techniques and Technologies in Mining – Bondarenko, Kovalevs'ka & Dychkovs'kyu (eds)*. 2011. P. 181–185.
7. Тимошук В.І., Шерстюк Є.А. Комплексна оцінка стану гідротехнічних споруд Ладжинської ТЕС у зв'язку з їх реконструкцією. *Національний гірничий університет. Збірник наукових праць*. 2022. С. 120–132.

8. Tymoshchuk V., Sherstiuk Y., Morozova T. 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. Ukrainian School of Mining Engineering*. 2018. Vol. 60.

REFERENCES:

1. Tarabarova, S.B., Stankevych, V.V. (2018). Zabrudnennia vody pidzemnykh vodonosnykh horzontiv pry ekspluatatsii khvostos-khovyshch hirnycho-zbahachuvalnykh kombinativ Kryvbasu [Water contamination of underground aquifers during the operation of tailing dumps at mining and processing plants in Kryvbas]. *Hihiiena naselenykh mist – Hygiene of residential areas*. 68. 70–75. [in Ukrainian].

2. Zahrytsenko, A.M. (2019). Formuvannia pryrodno-tekhnohennoho rezhymu pidzemnykh vod v zoni vplyvu rozrobky rodovyshcha vapniakiv [Formation of natural and anthropogenic groundwater mode in the influence zone of mining of limestone deposit]. *Ekolohichni nauky – Environmental sciences*. 1 (24). (1). 98–103. [in Ukrainian].

3. Sadovenko I.O., Zahrytsenko, A.M., Derevyahina N.I. (2020). Obgruntuvannia variantiv ekolohichnoho zakhystu shakhtnoho polia v umovakh vidnovlennia rivniv pidzemnykh vod [Substantiation of variants of environmental protection of a mine field in the context of groundwater level recovery]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU – Collection of scientific works of NMU*. 62–06. 65–76. [in Ukrainian].

4. McDonald M.G. and Harbaugh A.W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report. 83–875. 528 p.

5. Rudakov D.V. (2011). Modeliuvannia v hidroheolohii [Simulation in hydrogeology]. *Natsionalnyi hirnychiy universytet – National Mining University*. P. 88. [in Ukrainian].

6. Sherstuk Y., Perkova T. & Demchenko U. (2011). Three-dimensional model creation of ground water seepage in mining zones (Kryvyi Rih iron ore basin). *New Techniques and Technologies in Mining – Bondarenko, Kovalevs'ka & Dychkovs'kyi (eds)*. 181–185.

7. Tymoshchuk V.I., Sherstiuk Ye.A. (2022). Kompleksna otsinka stanu hidrotekhnichnykh sporud Ladyzhynskoi TES u zv'iazku z yikh rekonstruktsiieiu. [Comprehensive assessment of the conditions of hydrotechnical structures at Ladyzhynska TPP in terms of their reconstruction]. *Natsionalnyi hirnychiy universytet. Zbirnyk naukovykh prats – National Mining University. Collection of scientific papers*. 120–132. [in Ukrainian].

8. 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. Ukrainian School of Mining Engineering*. Vol. 60.