

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237248>
УДК 556.388:(556.332.52:553.5)(477.6)

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

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

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

* Автор для кореспонденції

ОЦІНКА ЗМІН ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ У РЕЗУЛЬТАТІ «МОКРОЇ» КОНСЕРВАЦІЇ КАР'ЄРУ СТИЛЬСЬКИЙ ПрАТ «ДОКУЧАЄВСЬКИЙ ФЛЮСО-ДОЛОМІТНИЙ КОМБІНАТ» МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розробка корисних копалин значним чином впливає на гідрогеологічні умови довкілля. Активний розвиток гірничих робіт у Донбаському регіоні визначив провідний вплив техногенних змін геологічного середовища на сучасне формування екологічних умов регіону. Це стосується не тільки шахтного видобування вугілля, а також сировини для металургійних заводів (доломіти, вапняки), яка розробляється переважно за допомогою кар'єрів. Останнім часом значною екологічною проблемою в регіоні є закриття шахт та кар'єрів, що передбачено програмою реструктуризації вугледобувної галузі України. Закриття шахт або кар'єрів шляхом «микрої» консервації є найменш витратним, але суттєво підвищує техногенне навантаження на оточуюче природне середовище.

Об'єктом досліджень є підземні та поверхневі води в районі кар'єрів Стельський та Східний ПрАТ «Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат», а також водозабори «Кипуча Криниця» і «Шевченківський». Мета роботи полягає у виконанні прогнозу змін гідрогеологічних умов під впливом «микрої» консервації кар'єру Стельський. При цьому застосовано аналіз геолого-гідрогеологічних матеріалів, математичне моделювання, експертні оцінки. В процесі досліджень створено гідрогеологічну модель району досліджень, доведено її функціональну відповідність природно-антропогенним умовам, уточнено розрахункові гідрогеологічні параметри.

Виконано прогноз змін гідрогеологічних умов під впливом «микрої» консервації кар'єру Стельський, а саме визначено: динаміку затоплення кар'єру; вплив цього процесу на зміни водоприпливів до кар'єру Східний, водозаборів «Кипуча Криниця» і «Шевченківський»; можливість підтоплення населених пунктів та заболочування території досліджень; зміни хімічного складу та мінералізації підземних вод; час осушення кар'єру за різної інтенсивності водовідливу для поновлення видобування корисних копалин у разі виникнення такої потреби. Підкреслимо, що виконані прогнозні розробки слід використовувати при розробці проекту часткового або повного затоплення кар'єру Стельський.

Ключові слова: кар'єр; водозабір; фільтрація; «микрої» консервація; підземні та поверхневі води; гідрогеологічна модель; якість; техногенез; прогноз.

Цитування: Руденко Ю.Ф., Шестопалов В.М., Негода Ю.О., Гураль О.В. Оцінка змін гідрогеологічних умов у результаті «микрої» консервації кар'єру Стельський ПрАТ «Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат» методом математичного моделювання. *Геологічний журнал*. 2021. № 3 (376). С. 17—34. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237248>

Citation: Rudenko, Yu.F., Shestopalov, V.M., Negoda, Yu.O., Gural, O.V. (2021). Assessment of changes in the hydrogeological conditions caused by wet-based conservation of the Stylyski quarry operated by “Dokuchaevsk flux and dolomite complex” PJSC using mathematical modelling. *Geologičnij žurnal*, 3 (376), 17-34. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237248>

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

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

Вступ

Розробка корисних копалин суттєво впливає на гідрогеологічні умови довкілля. Донбаський регіон, що охоплює в межах гірничо-промислового освоєння площу до 15 тис. км², є найбільшою техногенною геологічною системою України. Активний розвиток гірничих робіт визначив значний вплив техногенних змін геологічного середовища на сучасне формування екологічних умов регіону.

В Донбасі станом на 1997 р. нараховувалося близько 150 кар'єрів з видобування різноманітних корисних копалин. Найбільші площі та глибини, а як наслідок і вплив на оточуюче середовище, мають кар'єри з видобування флюсової сировини — вапняків та доломітів нижнього карбону (Региональные..., 1997).

Аналіз техногенного впливу кар'єрів, сировина яких використовується на ПрАТ «Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат», на геологічне середовище за період 1940—1992 рр. свідчить про збільшення інтенсивності водообміну в карбонатній товщі порід нижнього карбону вдесьтеро (Региональные..., 1997). Це сприяло посиленню карстових процесів у районі досліджень, вилуговуванню солей та вивезу твердих частинок з масиву порід, що призвело до суттєвих змін динаміки підземних вод та їх якісного складу.

На наш погляд, найбільш перспективним методом прогнозу порушеного режиму підземних вод у гірничо-видобувних районах є метод математичного моделювання, який дозволяє виконувати геофільтраційні розрахунки з більш повним урахуванням гідрогеологічних умов території, що вивчається.

Мета проведених робіт полягає у виконанні прогнозу впливу «мокрої» консервації кар'єру Стильський на гідрогеологічні умови району робіт.

Основні завдання досліджень передбачають визначення:

- часу затоплення кар'єру;
- позначок дзеркала води при повному затопленні кар'єру;
- радіуса впливу в процесі «мокрої» консервації;
- впливу затоплення кар'єру Стильський на водоприплив у кар'єр Східний та до водозаборів «Кипуча Криниця» і «Шевченківський»;

- підтоплення населених пунктів та заболочування прилеглих територій;
- зміни хімічного складу підземних вод;
- часу відкачки води із затопленого кар'єру за умови відновлення гірничодобувних робіт при інтенсивності водовідливу 3500 та 5000 м³/год.

Геологічна будова та гідрогеологічні умови

Район, що вивчається, розташований в зоні зчленування Приазовського кристалічного масиву зі Складчастим Донбасом (Артеменко і др., 1972; Хромов, 2010). Ця територія характеризується широким розповсюдженням різновікових осадових, метаморфічних та магматичних комплексів, що зумовлює багатоярусну будову району, в якій задіяні кристалічні породи протерозою, палеозою, мезозою та кайнозою.

Протерозойські відклади поширені в південній частині району досліджень в межах Приазовського кристалічного масиву і представлені гнейсами, мігматитами, гранітами, сієнітами.

В північній частині району кристалічні породи занурюються на значну глибину. У середній течії р. Мокра Волноваха вони виходять на поверхню, утворюючи Стильський горст.

Девонські відклади розвинені у південно-західній і центральній частинах району у вигляді товщі північно-західного простягання, ширина виходу якої сягає декількох кілометрів. Девонські утворення трансресивно залягають на кристалічних породах докембрію. Характерним є широкий розвиток магматичних порід та інтенсивний прояв розривних дислокацій, що зумовило блокову будову території в цій частині.

В центральній частині району смугою північно-західного простягання розвинена потужна товща кам'яновугільних відкладів турнейського, візейського та серпуховського ярусів, що є основним об'єктом вивчення. Залягають вони моноклінально з падінням на північ та північний схід під кутом 8—20°, трансресивно залягаючи на різних світах девону або кристалічних порід докембрію.

Відклади турнейського ярусу представлені вапняками, глинистими сланцями, доломітами, що перешаровуються, загальною потужністю до 190 м. Візейський ярус складений

тонко-дрібнозернистими вапняками, вуглесто-глинистими, кременистими, піщано-глинистими та глинистими сланцями, пісковиками. Ці породи також перешаровуються. Їх сумарна потужність сягає 690 м.

Породи серпуховського ярусу представлені грабівською та сарматською світами. Відклади грабівської світи у вигляді смуги шириною 2,5—3,0 км облямовують з півночі карбонатну товщу. Літологічно вони представлені в основному глинистими та піщанистими сланцями, що складають не менше 80 % потужності світи. Підпорядковане значення має розповсюдження пісковиків і вапняків. Відслонення порід грабівської світи фіксуються на лівобережжі р. Суха Волноваха на північ від сіл Стила та Кипуча Криниця. Загальна потужність цих відкладів становить 650 м. Вапняки та доломіти значним чином закарстовані. Розміри карстових воронок сягають в діаметрі 100—200 м, їх глибина — до 250 м. Самарська світа складена чергуванням піщаних і глинистих сланців, пісковиків, вапняків. Потужність світи сягає 450 м.

Відклади неогену та палеогену розвинуті спорадично на вододільних ділянках, а також заповнюють карстові воронки в карбонатних породах. Загальна їх потужність не перевищує 10—15 м, за винятком карстових воронок, де вона становить 150—200 м.

Четвертинні відклади розвинені повсюдно. На вододілах це переважно суглинисто-глинисті породи потужністю до 20—25 м. Тераси річок і днищ балок складені суглинками, супісками та глинистими пісками з уламками корінних порід. Характерним є невитриманість і різка зміна літологічного складу алювію, загальна потужність якого сягає до 14 м.

Техногенні відклади представлені відвалами розкривних робіт поблизу кар'єрів, що розробляють карбонатну та керамічну сировину. В їх складі переважають суглинисто-глинисті породи з уламками, щебенем, дресвою корінних порід, а також брили, уламки, щебінь некондиційних порід, відходи збагачувальних фабрик. Відвали біля кар'єрів сягають протяжності 1—2 км, їх потужність — до 100 м.

Відповідно до схеми гідрогеологічного районування південна частина території, що вивчається, відноситься до області тріщинних вод Українського щита, центральна та північна частини розташовані в межах Донецької склад-

частої області. Геологічна будова району, його тектоніка, а також геоморфологічні та кліматичні особливості визначили значну складність гідрогеологічних умов.

В районі досліджень виділяють такі водоносні горизонти та комплекси (Артеменко и др., 1972; Козина, 1993; Моренко и др., 1991):

- сучасних алювіальних та алювіально-делювіальних відкладів (а, адН);
- верхньочетвертинних алювіальних відкладів I—III надзаплавних терас ($a^{1-3}P_{III}$);
- нижньо-верхньочетвертинних еолово-делювіальних відкладів ($vdP_{II}-P_{III}$);
- неоген-палеогенових пісків (N-P_I);
- полтавських пісків (N_Ipl);
- піщано-сланцевої товщі карбону ($C^2_1-C^2_2$);
- карбонатної товщі нижнього карбону (C^1_1);
- верхньодевонської теригенно-ефузивної товщі (D_3);
- середньо-верхньодевонської теригенно-ефузивної товщі (D_{2-3});
- тріщинуватої зони кристалічних порід протерозою (PR).

Водоносний горизонт сучасних алювіальних і алювіально-делювіальних відкладів заплав річок і днищ балок розвинений в долинах річок Суха Волноваха та Мокра Волноваха, численних балках поза межами розповсюдження карбонатної товщі. Літологічний склад водовмісних порід дуже різноманітний. У верхній частині перерізу переважають суглинки та глини, в нижній частині — різнозернисті, інколи глинисті піски з включеннями гравію та гальки. Потужність водоносного горизонту коливається від 3 до 12 м, глибина залягання — 1—5 м. Водоносний горизонт безнапірний. Дебіти колодязів за даними короткочасних відкачок становлять 0,03—0,65 дм³/с. Мінералізація підземних вод коливається від 0,2 до 3,7 г/дм³, загальна жорсткість сягає 25—35 ммоль/дм³. Склад води сульфатний натрієвий, сульфатний кальцієвий, іноді гідрокарбонатно-сульфатний кальцієвий. Живлення водоносного горизонту здійснюється внаслідок інфільтрації атмосферних опадів та поверхневих вод. Розвантаження — шляхом випаровування, дренажу поверхневими водотоками та кар'єрами, а також перетікання в карбонатну товщу. Підземні води використовуються місцевим населенням шляхом каптажу їх побутовими колодязями.

Водоносний горизонт верхньочетвертинних алювіальних відкладів I—III надзаплавних терас розвинений в долині р. Мокра Волноваха. В долині р. Суха Волноваха цей горизонт сдренований. Водозбагачені породи представлені у верхній частині перерізу суглинками та супісками, в нижній — різнозернистими пісками. Потужність горизонту становить 1,0—7,2 м. Глибина залягання дзеркала ґрунтових вод змінюється від 0,2 до 2,7 м. Дебіт свердловин сягає близько 1,0 $\text{дм}^3/\text{с}$ при зниженні 1,3 м. Коефіцієнти фільтрації коливаються в широкому діапазоні — від 0,1 до 6,5 м/добу. Мінералізація підземних вод становить 1,2—4,8 $\text{г}/\text{дм}^3$. Переважають сульфатні води зі змішаним катіонним складом. Живлення водоносного горизонту здійснюється внаслідок інфільтрації атмосферних опадів, розвантаження — в сучасні алювіальні відклади. Водоносний горизонт експлуатується поодинокими колодзями для локального водопостачання.

Водоносний горизонт нижньо-верхньочетвертинних еолово-делювіальних відкладів широко розвинений на вододільних площах на сході району робіт. На захід від р. Кальміус він сдренований.

Водонасичені породи представлені переважно лесоподібними суглинками і глинами з прошарками дрібнозернистих глинистих пісків. Потужність водоносного горизонту змінюється від декількох до 15—20 м. Водозбагаченість горизонту невелика. Дебіти свердловин коливаються від 0,0002 до 0,45 $\text{дм}^3/\text{с}$ при зниженнях відповідно 0,76 та 8,7 м. Коефіцієнти фільтрації коливаються в межах 0,006—2,4 м/добу, коефіцієнти водопровідності — 0,03—11,0 $\text{м}^2/\text{добу}$. За хімічним складом розповсюджені переважно сульфатні води, а серед катіонів — у рівних кількостях присутні натрій, калій та магній. Мінералізація води змінюється від 2,5 до 7,4 $\text{г}/\text{дм}^3$. Живлення водоносного горизонту відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів. Розвантаження — в річкових долинах у вигляді джерел та мочажин, а також у результаті перетікання у нижчезалягаючі водоносні горизонти. Експлуатується водоносний горизонт численними колодзями для господарсько-питних потреб.

Водоносний горизонт неоген-палеогенових пісків розвинений в глибоких карстових воронках тільки на території розповсюдження

водоносного горизонту карбонатної товщі нижнього карбону, утворюючи з останнім єдиний водоносний комплекс. Потужність горизонту не витримана і може сягати декількох десятків метрів. Підземні води безнапірні. За своїм хімічним складом це води сульфатного кальцієво-натрієвого типу.

Водоносний горизонт полтавських пісків поширений в північній та північно-західній частинах району досліджень переважно на вододільних ділянках за межами розвитку карбонатної товщі. Водозбагаченими є різнозернисті каолінові кварцові піски. Потужність водоносного горизонту не перевищує 5—10 м. Води безнапірні або слабонапірні. Глибина залягання водоносного горизонту становить від 2—3 м у тальвегах балок до 20—30 м на вододілах. Коефіцієнти фільтрації не перевищують 0,6—1,0 м/добу. Дебіти свердловин коливаються в межах від часток $\text{дм}^3/\text{с}$ до 5,0 $\text{дм}^3/\text{с}$ при зниженнях близько 10 м. Живлення підземних вод горизонту відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів та перетікання з водоносного горизонту нижньо-верхньочетвертинних відкладів. Розвантаження підземних вод — у поверхневі водотоки. За хімічним складом це води сульфатні натрієві або сульфатні кальцієві.

Водоносний горизонт піщано-сланцевої товщі карбону розповсюджений в північній і північно-східній частинах району робіт. Підземні води приурочені до тріщинуватої зони вивітрювання порід, що складають піщано-сланцеву товщу: глинистих, піщано-глинистих, піщаних сланців, пісковиків, вапняків. Водоносний горизонт безнапірний. Його живлення пов'язано з інфільтрацією атмосферних опадів, а також з перетіканням з вищезалягаючих водоносних горизонтів. Розвантаження водоносного горизонту здійснюється в річково-балкову мережу та в результаті перетікання у водоносний горизонт карбонатної товщі нижнього карбону. Водопровідність пісковиків та піщаних сланців не перевищує 8 $\text{м}^2/\text{добу}$. За хімічним складом переважають води сульфатного та хлоридно-сульфатного типів, мінералізація яких сягає 3—3,5 $\text{г}/\text{дм}^3$.

Водоносний горизонт відкладів вапнякової товщі нижнього карбону розвинутий в центральній частині району досліджень у вигляді смуги північно-західного простягання. Підземні води приурочені до тріщинуватої та за-

карстованої товщі карбонатних порід турнейського ярусу, переважно вапняків (Моренко і др., 1991). Водоносний горизонт, що описується, залягає на обводнених слабопроникних породах девону і протерозою. Він перекритий сдренованими четвертинними відкладами. Потужність горизонту сягає 330 м. Ширина смуги розвитку цього горизонту коливається від 6—7 км у центральній частині району досліджень до 0,7—1,5 км у східній та західній частинах. Підземні води переважно безнапірні. Глибина їх залягання становить 10—25 м у заплавах річок і 80—90 м на вододілах, поблизу кар'єрів та водозаборів — 80—120 м. Дебіти свердловин змінюються від 0,02 до 101,2 дм³/с при зниженнях відповідно 24,6 та 1,1 м. Коефіцієнти фільтрації знаходяться в межах 0,0005—310,0 м/добу. Водопровідність вапняків і доломітів може сягати 10 000 м²/добу (Артеменко і др., 1972). Живлення водоносного горизонту відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів, перетікання підземних вод з вищета нижчезалягаючих водоносних горизонтів, а також залучення поверхневих вод. Остання складова значним чином збільшилась під час експлуатації кар'єрів. Розвантаження підземних вод здійснюється шляхом відкачок із зумпфів кар'єрів та каптажу водозаборами. В якісному відношенні підземні води нижньокарбонатної товщі характеризуються підвищеною мінералізацією (2,0—4,3 г/дм³) та жорсткістю (30—40 ммоль/дм³). Тим не менш, у районі досліджень є п'ять водозаборів, загальна кількість затверджених експлуатаційних запасів по яких становить 65 тис. м³/добу.

Водоносний горизонт відкладів долгинської та роздольненської світи верхнього девону розвинений в південній частині району досліджень і простягається із заходу на схід вузькою смугою завширшки 0,5—1,5 км. Водоносний горизонт залягає на породах антон-тарамської світи верхнього девону. Обводнені відклади представлені аргілітами з шарами пісковиків, гравелітів та туфів. Водоносний горизонт у південній частині площі робіт безнапірний або слабонапірний. При зануренні під карбонатну товщу напори підземних вод сягають 100 м і більше. Глибина залягання рівнів підземних вод змінюється від декількох метрів у балках до 20 м на вододілах. Потужність водоносного горизонту сягає 20—70 м. Дебіти свердловин

коливаються від 0,3 до 2,2 дм³/с при зниженнях 3,1—16,9 м. Коефіцієнти фільтрації становлять 0,05—2,0 м/добу, коефіцієнти водопровідності — 50—100 м²/добу. Живлення підземних вод здійснюється внаслідок інфільтрації атмосферних опадів і перетікання з вищезалягаючих водоносних горизонтів. Розвантаження підземних вод відбувається у водоносний горизонт вапнякової товщі нижнього карбону та у поверхневі водотоки. Мінералізація підземних вод сягає 2,5 г/дм³. Тип води сульфатний кальцієво-натрієвий або магнієво-кальцієвий. Підземні води цього горизонту використовуються для господарсько-питних потреб на південь від району досліджень, де їх якісні характеристики кращі.

Водоносний горизонт тріщинуватої зони ефузивних порід антон-тарамської світи верхнього девону розвинений у західній частині території досліджень переривчастою смугою шириною 0,2—2,0 км і протяжністю 30 км. Підземні води знаходяться в тріщинуватій зоні вивітрювання базальтів та брекчій.

Потужність горизонту зумовлюється глибиною розвитку ефузивної тріщинуватості та становить 20—50 м, значно збільшуючись в зоні розривних порушень. Підземні води мають напірно-безнапірний характер. Глибина їх залягання коливається від часток метра в балках до 20—25 м на вододілах. Фільтраційні властивості водозбагачених порід неоднорідні. Коефіцієнти фільтрації сягають 0,07—1,3 м/добу, водопровідності — 2,6—4,1 м²/добу. Дебіти свердловин незначні (0,24—0,3 дм³/с) при зниженнях 2,4—10,8 м. Підземні води мають підвищену мінералізацію, що становить 4—7 г/дм³. Тип води сульфатний, рідше сульфатно-хлоридний, кальцієвий. Живлення підземних вод здійснюється за рахунок атмосферних опадів і внаслідок припливу із суміжних водоносних горизонтів. Розвантаження відбувається в річкову мережу і балки. Для водопостачання підземні води цього горизонту практично не використовуються.

Водоносний горизонт відкладів миколаївської світи середньо-верхнього девону розвинений вузькою смугою північно-західного простягання шириною 200—800 м. Водовмісними породами є тріщинуваті аркозові та кварцитоподібні пісковики, що залягають в нижній частині миколаївської світи, а також тріщинуваті і закарстовані вапняки та їх брек-

чії верхньої частини перерізу. Загальна потужність водоносного горизонту змінюється від 190 м у південно-західній частині району досліджень до 0—34 м на сході. Занурюючись у північно-східному напрямку, підземні води цього горизонту мають напір, що змінюється від 40—60 до 200—300 м. Дебіти свердловин коливаються від 0,2 дм³/с на самовиливі до 1,7 дм³/с при зниженні близько 6 м. Коефіцієнти фільтрації водозбагачених порід знаходяться в межах 0,003—1,3 м/добу, водопровідності — 1,0—38,0 м²/добу. За хімічним складом води відносяться до сульфатних і сульфатно-хлоридних з різноманітним катіонним складом. Їх мінералізація дорівнює 2,5—3,5 г/дм³. Основним джерелом живлення підземних вод є атмосферні опади. Розвантаження його здійснюється в річкових долинах та балках.

Водоносний горизонт тріщинуватої зони кристалічних порід протерозою розвинений в південній, південно-східній та західній частинах району робіт. Підземні води містяться в тріщинуватих гнейсах, мігматитах, гранітах, утворюючи єдиний водоносний горизонт. Його потужність регламентується глибиною розвитку тріщин вивітрювання і коливається від 10—15 м у долинах річок і балок до 80—90 м та більше на вододілах. Водоносний горизонт характеризується незначною водозбагаченістю. Дебіти свердловин змінюються від 0,001 до 6,9 дм³/с при зниженнях 1,57 та 10,14 м, відповідно. Коефіцієнти фільтрації становлять 0,0045—6,5 м/добу. Живлення підземних вод горизонту відбувається по всій площі його розповсюдження шляхом інфільтрації атмосферних опадів через четвертинні суглинки. Розвантаження підземних вод здійснюється переважно в річкових долинах. За хімічним складом підземні води сульфатні кальцієві та сульфатні натрієві. Мінералізація їх змінюється в межах 1,5—3,0 г/дм³.

Результати

Створення гідрогеологічної моделі

З огляду на заплановану «мокру» консервацію Сильського кар'єру, необхідно виконати прогноз його впливу на гідрогеологічні умови території досліджень.

Практична реалізація цієї задачі, з максимальним урахуванням різноманітних природ-

них і техногенних умов району, що вивчається, проведена із застосуванням методу математичного моделювання. Розв'язання обернених задач, виконання численних обчислювальних експериментів дозволяє уточнити вихідну інформацію, обґрунтувати компетентність розрахункових схем, підвищити достовірність та надійність результатів досліджень.

Для створення геофільтраційної моделі було використано програмний комплекс Processing Modflow for Windows (Processing..., 1998). Автори статті ознайомилися із сучасним досвідом створення гідрогеологічних моделей для розв'язання аналогічних задач (Bagriy et al., 2017; Ybanez et al., 2016; Гайдин, 2009).

Основними вихідними даними для схематизації природно-антропогенних умов на ділянці робіт слугували звіти про виконані раніше дослідження (Артеменко и др., 1972; Шестопалов и др., 1995; Руденко и др., 1997; Хромов, 2010), а також фактичні дані про водоприви́ли у кар'єри, дебіти водозаборів, режимні спостереження за рівнями підземних вод, хімічним складом підземних і поверхневих вод, що надала геологічна служба ПрАТ «Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат».

Обґрунтування фільтраційної схеми виконано на основі визначення загального характеру водообміну в сучасних гідрогеологічних умовах. Воно включало в себе схематизацію: структури та форми області фільтрації, фільтраційної неоднорідності об'єкта, граничних умов та основних джерел формування водообміну.

Спочатку, на базі аналізу вихідних геолого-гідрогеологічних даних, була побудована тривимірна геологічна модель території досліджень. Результатом цього етапу стали цифрові карти контурів розповсюдження різновікових відкладів та числові масиви позначок поверхні землі, покрівлі та підшови водоносних горизонтів, рівнів поверхневих водотоків. Широке використання в роботі сучасних геоінформаційних технологій дозволило оптимізувати та, в деяких випадках, автоматизувати процеси створення та введення масивів вихідних даних у моделюючу систему. Розміри області фільтрації, що моделюється, визначено з урахуванням геологічної будови і техногенного навантаження в межах території, що вивчається. Північна та південна границі моделі були про-

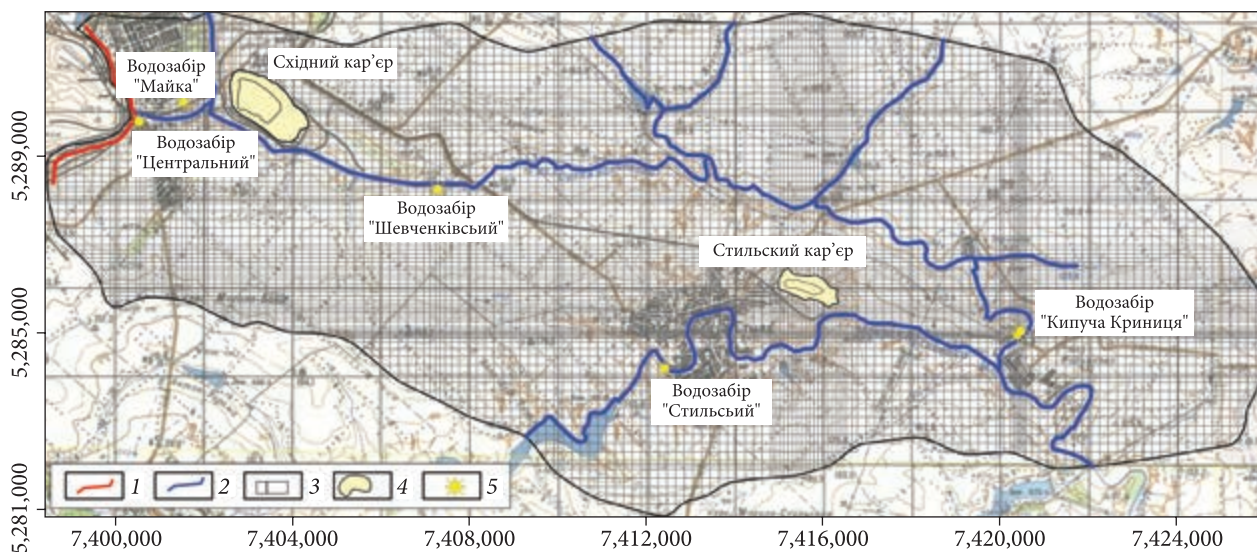


Рис. 1. Карта граничних умов і просторової дискретизації моделі: 1 — гранична умова (ГУ) I роду (фіксований рівень, що змінюється в часі); 2 — гранична умова «річка» (ГУ III роду); 3 — модельні блоки просторової дискретизації області фільтрації; 4 — територія кар'єрів — фіксований рівень, що змінюється в часі, ГУ I роду $H = f(t)$; 5 — водозабори — гранична умова II роду (фіксований дебіт, що змінюється в часі)

Fig. 1. Map of boundary conditions and spatial discretization of model: 1 — boundary condition (BC) of the first kind (fixed level that changes with time); 2 — “river” boundary condition (BC of the third kind); 3 — model cells in spatial discretization of groundwater flow domain; 4 — area occupied by quarries — fixed groundwater level that changes with time, BC of the first kind $H = f(t)$; 5 — water intake wells — boundary condition of the second kind (fixed pumping rate that changes with time)

ведені по геоморфологічних вододілах, що знаходилися далі ніж контур розповсюдження вапнякової товщі нижнього карбону.

По цих границях задавалася гранична умова (ГУ) II роду $Q = 0$. Східна границя моделі задавалася на відстані, яка перевищувала радіус впливу всіх техногенних об'єктів, що вивчалися (ГУ II роду $Q = 0$). Західна границя була задана ГУ I роду $H = f(t)$ у зв'язку з взаємодією з кар'єрами Оленівської ділянки. Дані про абсолютні позначки у спостережних свердловинах, що розташовані на цій границі, та їх зміни у часі були задіяні при реалізації вказаної граничної умови. Загальна площа моделювання становила 220 km^2 . Крок модельної сітки змінювався від 20 до 150 м. Мінімальні його розміри задавалися по кар'єрах, водозаборах, річках та прилеглих до них територіях. Граничні умови та розрахункова сітка моделі представлені на рис. 1.

При схематизації території, що вивчається, в перерізі був врахований один водоносний горизонт, що приурочений до нижньокарбонівих відкладів, тому що четвертинний водоносний горизонт практично сдренований. Нижче залягаючі відклади девону та протерозою

мають низьку водозбагаченість і на моделі також не враховувалися.

Початковий розподіл значень водопровідності нижньокарбонівих порід був запозичений з результатів попереднього моделювання (Шестопапов и др., 1995; Руденко и др., 1997), проведених дослідно-фільтраційних робіт (Козина и др., 1991; Козина и др., 1993; Моренко и др., 1991; Артеменко и др., 1972) та морфоструктурного картування (Шестопапов и др., 1995). Діапазон змін цього параметра дуже значний — від декількох десятків до декількох тисяч $\text{m}^2/\text{добу}$, що пояснюється розвитком карсту в нижньокарбонівих вапняках. Максимальні значення цих параметрів приурочені до найбільш досліджених ділянок геологічного середовища (водозаборів та кар'єрів), а також річкових долин. Значення гравітаційної водовіддачі порід за даними дослідно-фільтраційних робіт змінюється в діапазоні $0,008-0,1$. Як початкове на моделі було задано значення $\mu = 0,01$.

За вихідне результуюче значення інфільтраційного живлення (інфільтрація та конденсація атмосферної вологи за вилученням випаровування та транспірації ґрунтової води) було прийнято значення, що дорівнює 60 mm/рік

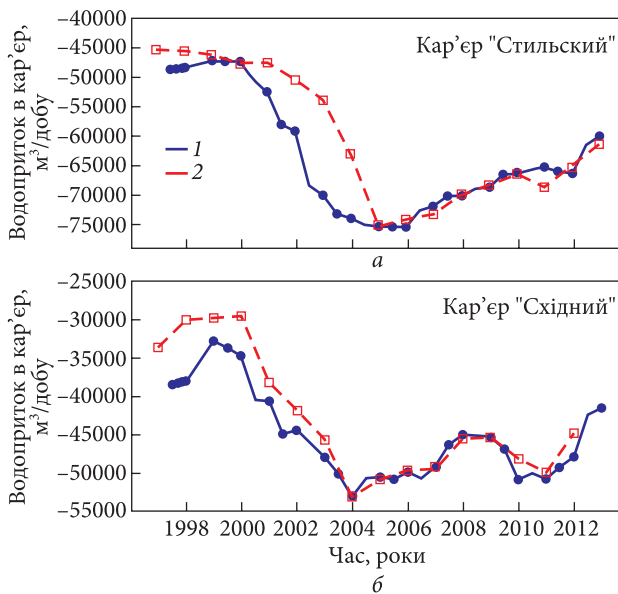


Рис. 2. Динаміка зміни водоприпливів у кар'єри Стил-ський (а) і Східний (б) за модельними і натурними даними: 1 — модельні значення водоприпливів (м³/добу); 2 — натурні значення водоприпливів (м³/добу)
Fig. 2. Dynamics of changes in water inflow to Stylyskiy (a) and Skhidnyi (b) quarries according to model and actual (measured) data: 1 — model values of water inflow (m³/day); 2 — actual values of water inflow (m³/day)

по всій площі моделювання. Таке значення було запозичене зі «Схеми розподілення витрат і модулів середньорічного річкового стоку 90 % забезпеченості території України» м-бу 1:1 000 000 (Лютий та ін., 2003). Відповідно до цих даних коефіцієнт інфільтрації атмосферних опадів дорівнював для району робіт $K_w = 0,13$. Тобто на моделі фактично задавалась змінна інфільтрація, що складала 13 % від реальних атмосферних опадів.

Взаємозв'язок нижньокарбонового водоносного горизонту з річками здійснено шляхом реалізації умови III роду $q = F(\Delta H)$. Позначки рівнів води в річках знімали з топографічних карт. Розрахунок проникності відкладів, що залягають під річищем, виконано за залежністю:

$$K_n = \frac{K_0 b l}{m_0},$$

де K_n — проникність відкладів, що залягають під річищем, м²/добу; K_0 — коефіцієнт фільтрації підруслоних відкладів, м/добу; m_0 — потужність відкладів, що залягають під річищем, м; b — ширина річки, м; l — довжина річки в межах розрахункового модельного блоку, м.

Обчислені значення цього параметра склали $3,2 \cdot 10^2 - 2,5 \cdot 10^3$ м²/добу (значення $K_0 = 0,1 - 0,01$ м/добу).

Дебіти свердловин відображалися на моделі ГУ II роду $Q = f(t)$, кар'єри — ГУ I роду $H = const$ на їх забої. Контроль достовірності застосування такого підходу здійснювався шляхом порівняння модельних та натурних водоприпливів у кар'єри та рівнів підземних вод у спостережних свердловинах і на моделі.

Наступним етапом створення гідрологічної моделі району досліджень було розв'язання обернених задач з метою уточнення гідрологічних параметрів та граничних умов. На раніше створених моделях (Шестопалов и др., 1992; Руденко и др., 1997) було проведено епігнозне

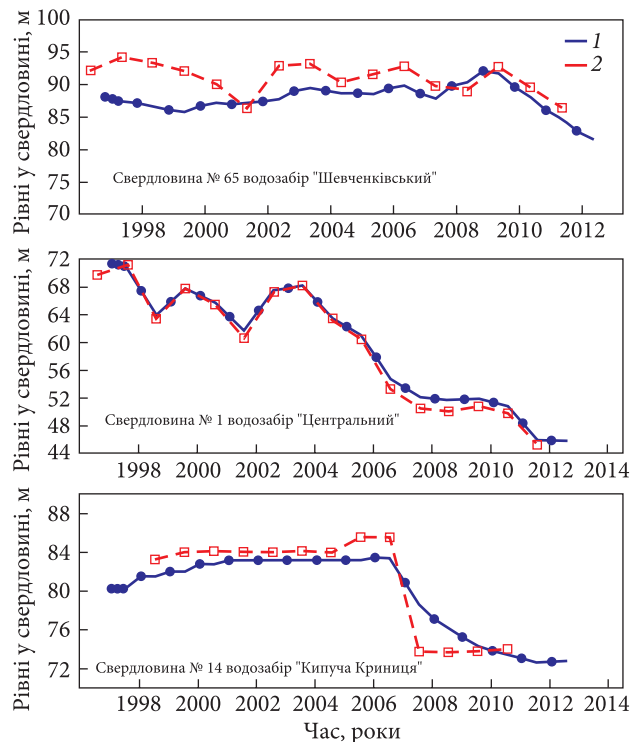


Рис. 3. Графіки натурних та модельних рівнів підземних вод по спостережних (св. 65, 1н) та експлуатаційній (св. 14) свердловинах водозаборів «Шевченківський», «Центральний», «Кипуча Криниця», відповідно: 1 — модельні значення рівнів (м); 2 — натурні значення рівнів (м). Примітка: заміри рівнів підземних вод по св. 14 виконано під час її зупинки

Fig. 3. Graphs of actual (measured) and model groundwater levels in observation (No. 65, 1n) and operational (No. 14) wells of “Shevchenkivskiy”, “Tsentralnyi” and “Kipucha Krynytsya” water intake structures, respectively: 1 — model values of levels (m); 2 — actual values of levels (m). Note: groundwater levels in well No. 14 were measured during well shutdown

моделювання станом на 1992 та 1997 рр. У зв'язку з цим за початкові умови було використано результати останнього з них. Період епігнозу з 1997 по 2013 р. цілком репрезентативний. Річ у тому, що гідрологічна ситуація у порівнянні з 1997 р. суттєво змінилася. Наприклад, приплив в кар'єр Стильський виріс з 45,4 тис. м³/добу у 1997 р. до 75,0 тис. м³/добу у 2005 р. Дебіт водозабору «Кипуча Криниця» за цей час впав з 31 тис. м³/добу до 1,0 тис. м³/добу. При цьому рівневий режим на водозаборі залежить не тільки від водовідбору, а реагує і на зміну витрати р. Суха Волноваха.

На моделі були задані вихідні параметри і граничні умови, що описані вище. Задача розв'язувалася в нестационарній постановці. Розв'язання оберненої задачі практично звелось до підбору параметра взаємозв'язку між поверхневими та підземними водами. Це пояснюється тим, що зміна ніяких інших фільтраційних параметрів (коефіцієнтів водопровідності карбонатних порід, водовіддачі, інфільтраційного живлення) не дала змоги забезпечити «революційних» змін у гідрогеологічній ситуації на території досліджень, до яких автори відносять зміни водоприпливів у кар'єри (наприклад, за один тільки 2005 р. водоприплив в кар'єр Стильський зріс на 12 тис. м³/добу) і зниження рівня підземних вод на водозаборі «Кипуча Криниця» на 10 м у 2008 р. при постійному на той час водовідборі.

Результати, які були отримані під час розв'язання оберненої нестационарної задачі, відображені на рис. 2—3 та в табл. 1. Як видно з наведених даних, водоприпливи в кар'єри Стильський та Східний, а також динаміка зміни рівнів по режимних свердловинах на моделі та в природі досить адекватні. Відновлення рівнів підземних вод у межах водозаборів насамперед було пов'язано зі зменшенням водовідбору, а збільшення водоприпливів у кар'єри на початку 2000-х років — із заглибленням останніх та інколи катастрофічними проривами підземних вод.

Аналіз складових водного балансу території досліджень дав такі результати. Формування водоприпливів в кар'єри та експлуатаційних запасів підземних вод у межах радіуса впливу водозаборів відбувається за рахунок залучених ресурсів (поглинання річкового стоку) на 42 %, перехоплення природного потоку під-

Таблиця 1. Зіставлення натурних та модельних рівнів підземних вод по контрольних свердловинах станом на 2010 р.

Table 1. Comparison of actual (measured) groundwater levels in reference wells with model data for 2010

Номер свердловини	Натурний рівень (H _{нат.}), м	Модельний рівень, (H _{мод.}), м	Відхилення (ΔH = H _{нат.} - H _{мод.}), м
315г	51,1	49,1	2,0
1н	50,3	51,4	-1,1
4а	91,2	89,7	1,5
65г	90,2	89,8	0,4
14	73,9	73,9	0,0
509г	114,7	115,9	-1,2
304г	89,3	90,5	-1,2
303г	87,8	84,8	3,0
510г	94,6	92,4	2,2
511г	135,7	136,4	-0,7
502г	76,0	72,6	3,4

земних вод — на 22 %, інфільтрації атмосферних опадів — на 31 %, спрацювання ємнісних запасів — на 5 %.

Існуюча гідрогеологічна ситуація в районі досліджень, як було зазначено раніше (Региональные..., 1997) і підтверджено проведеним моделюванням, обумовлює багаторазову геофільтрацію водних ресурсів у системі «кар'ерна вода — річка — зона дренажування — кар'ерна вода». На це чітко вказує динаміка формування балансу підземних вод у районі досліджень. Головними і взаємопов'язаними складовими водного балансу є водоприпливи в кар'єри та фільтрація з річок.

Відкалібрована та збалансована гідрогеологічна модель району досліджень функціонально відповідає існуючим природно-антропогенним умовам і підготовлена для розв'язання прогностичних задач, пов'язаних з впливом «мокрої» консервації кар'єру Стильський на довкілля.

Прогнозне моделювання

При збереженні без змін усіх гідрогеологічних параметрів (за винятком гравітаційної водовіддачі в межах периметра частини кар'єру, що затоплюється) і граничних умов, що були задіяні станом на 01.01.2013 р., на заборі кар'єру Стильський була знята ГУ I роду H = const, що призвело до відновлення рівнів підземних вод у району досліджень.

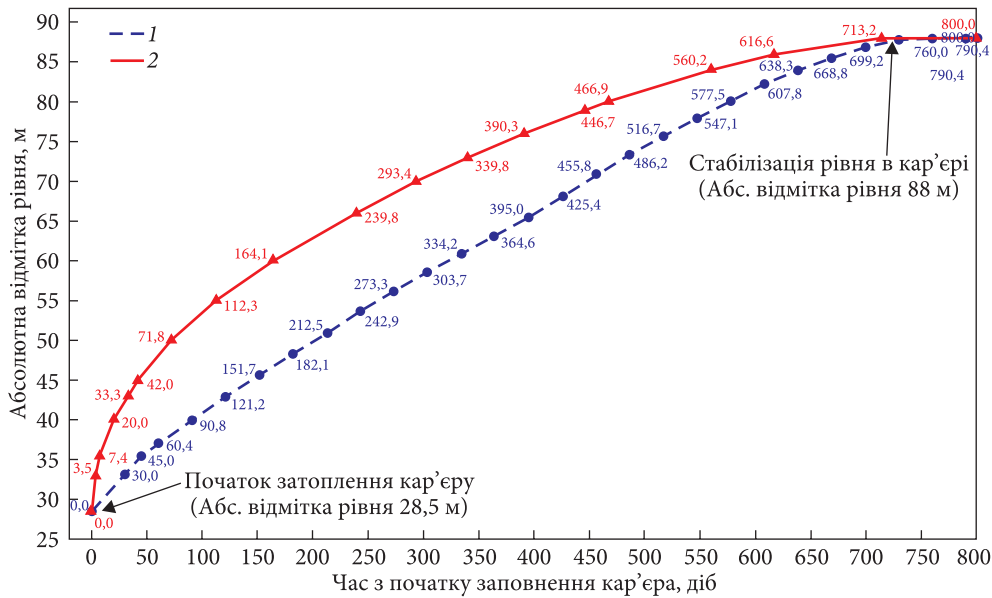


Рис. 4. Динаміка підйому рівнів води в кар'єрі Стильський під час його «мокрій» консервації за даними моделювання: 1 — графік підйому рівнів води в кар'єрі Стильський за схемою «великого колодязя» без перерахунку для реальної геометрії кар'єру; 2 — графік підйому рівнів води в кар'єрі Стильський з урахуванням реальної геометрії кар'єру (приведені значення)

Fig. 4. Dynamics of water level increase in the Stylskyi quarry during its wet-based conservation according to modelling data: 1 — graph of water level rise in the Stylskyi quarry according to the scheme of the “virtual large” diameter well without recalculation to the real geometry of the quarry; 2 — graph of water level increase in the Stylskyi quarry taking into account the real geometry of the quarry (values are given)

Відзначимо одну особливість розрахунку динаміки підйому рівня підземних вод при затопленні цього кар'єру. При схематизації території, що вивчається, в перерізі був врахований один водоносний горизонт, приурочений до нижньокарбонівих відкладів. Це викликало певні обмеження щодо можливості детального врахування геометричної форми кар'єру, що був заданий на моделі у вигляді «великого колодязя». Периметр кар'єру задавався за матеріалами супутникових зйомок Землі, його глибина — відповідно за даними положення зумпфа при водовідливі.

Таким чином, врахувати складну геометрію уступів при такій постановці задачі неможливо. Для її врахування необхідно було б виділити на моделі стільки водоносних шарів, скільки було уступів у кар'єрі при його відпрацюванні. Це значним чином ускладнило б розрахункову схему та збільшило час розв'язання задачі.

Разом з тим реалізація спрощеної схеми («великий колодязь»), як правило, забезпечує цілком прийнятну достовірність отриманих рішень за умови перерахунку модельних даних з урахуванням реальних об'ємів, що затоплю-

ються при «мокрій» консервації кар'єру («приведений» модельний час). Такі дані з перетином через кожні 1,5 м від позначки +26,5 м були одержані від геологічної служби ПрАТ «Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат». У подальшому було виконано покроковий перерахунок часу підняття рівня води в кар'єрі шляхом застосування поправочного та реального об'ємів частини кар'єру, що затоплюється, до певних абсолютних позначок на кожному кроці. Динаміка підйому рівня води в кар'єрі наведена на рис. 4 і в табл. 2. Прогнозна карта підйому рівнів підземних вод в районі досліджень відображена на рис. 5.

Як видно з наведених даних, затоплення кар'єру буде відбуватися протягом двох років. Рівень в ньому досягне абсолютної позначки +88 м.

Дуже важливим репером слугує досягнення абсолютної позначки +66 м. При досягненні цієї позначки (через вісім місяців після початку затоплення кар'єру) зберігаються: напрямок руху потоку підземних вод (зокрема від водозабору «Кипуча Криниця» до кар'єру Стильський); вододіл між кар'єрами Стильський та

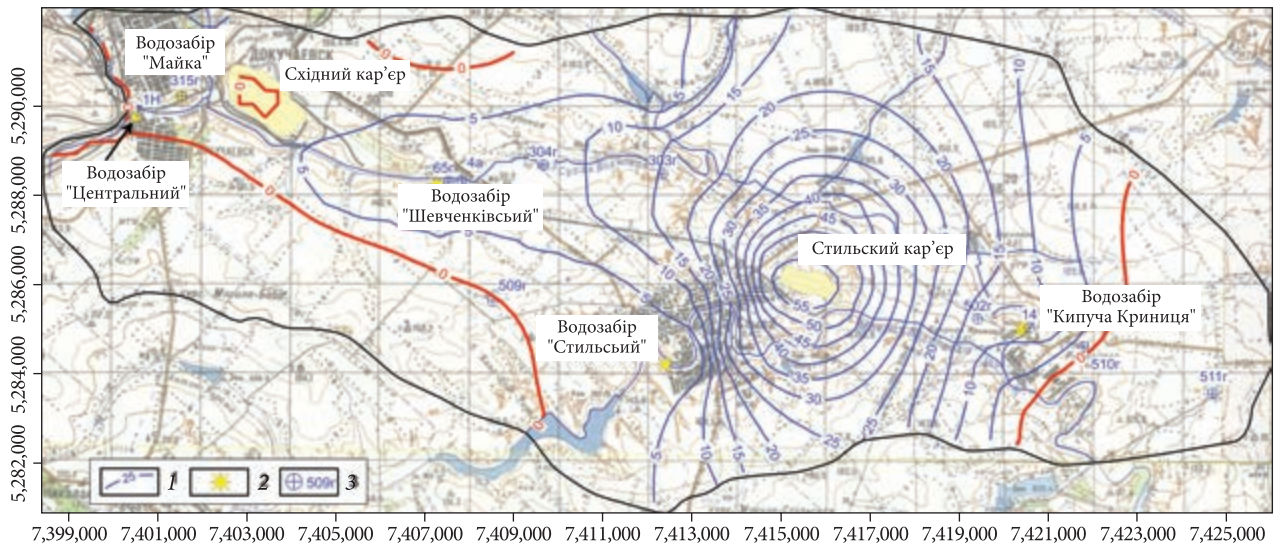


Рис. 5. Ізолінії підвищення рівнів підземних вод нижньокарбонового водоносного горизонту в результаті «мокрої» консервації кар'єру Стильський (абсолютна відмітка води в кар'єрі +88 м): 1 — ізолінії прогнозованого підвищення рівнів підземних вод нижньокарбонового водоносного горизонту на момент стабілізації за даними моделювання; 2 — водозабори; 3 — свердловини, що були використані в якості базових контрольних точок

Fig. 5. The isolines of increase in groundwater level of the Lower Carboniferous aquifer as a result of wet-based conservation of the Stylyski quarry (the absolute water level in the quarry is +88 m): 1 — isolines of the forecasted increase in groundwater level of the Lower Carboniferous aquifer at the time of stabilization, according to modelling data; 2 — water intake structures; 3 — wells that were used as basic reference points

Таблиця 2. Затоплення кар'єру Стильський під час «мокрої» консервації

Table 2. Flooding of the Stylyski quarry during wet-based conservation

Абсолютна відмітка підйому рівня (м)	Сумарний реальний об'єм кар'єру за висотними відмітками (м ³)	Сумарний модельний об'єм «великого колодязя» за висотними відмітками (м ³)	Відношення модельного об'єму «великого колодязя» до реального об'єму кар'єру	Модельний час досягнення відмітки рівня затоплення (доба)	«Приведений» модельний час досягнення відмітки рівня затоплення (доба)
33,0	177920	1210005,9	6,8	24,0	3,5
35,5	308821	1882231,4	6,1	45,0	7,4
40,0	686054	3092237,3	4,5	90,0	20,0
43,0	1040023	3898907,9	3,7	125,0	33,3
45,0	1310735	4520399,4	3,4	145,0	42,0
50,0	2113562	5890217,4	2,8	200,0	71,8
55,0	3136163	7260035,4	2,3	260,0	112,3
60,0	4397677	862853,4	2,0	322,0	164,1
66,0	6158423	10273635,0	1,7	400,0	239,8
70,0	7497125	11369489,4	1,5	445,0	293,4
73,0	8594594	12191380,2	1,4	482,0	339,8
76,0	9768033	13013271,0	1,3	520,0	390,3
79,0	11035996	13835161,8	1,3	560,0	446,7
80,0	11476877	14109125,4	1,2	574,0	466,9
84,0	13310146	15204979,8	1,1	640,0	560,2
86,0	14283028	15752907,0	1,1	680,0	616,6
88,0	15297903	16300834,2	1,1	760,0	713,2

Східний, що забезпечує відсутність додаткового припливу до останнього; явища підтоплення та заболочування будуть відсутні.

За умови підйому рівня води в кар'єрі до позначки його стабілізації (+88,0 м) зміна гідрогеологічних умов позначиться на водозаборах «Кипуча Криниця» та «Шевченківський», кар'єрі Східний, в населеному пункті Стила. На водозаборі «Кипуча Криниця» рівні підземних вод зростуть на 10 м за умови збереження сучасного дебіту. Причому від початку затоплення кар'єру Стильський протягом майже 13 місяців напрямок руху підземних вод буде від водозабору до кар'єру, після чого відбудеться інверсія потоку підземних вод і кар'єрні води почнуть живити водозабір. В свою чергу, на водозаборі «Шевченківський» зміни рівнів підземних вод будуть незначними (в межах 1,0—1,5 м), що не позначиться ані на їх динаміці, ані на якості.

На моделі було розглянуто також варіант водовідбору на водозаборах «Центральний», «Майка», «Шевченківський», «Стильський» та «Кипуча Криниця» всіх затверджених експлуатаційних запасів підземних вод за категоріями В+С₁, а саме 65,2 тис. м³/добу. Одночасно з цим моделювалось затоплення кар'єру Стильський. В результаті прогнозні рівні підземних вод не перевищували гранично допустимих знижень. Тобто, за умов необхідності можна нарощувати дебіти водозаборів до величини затверджених запасів, враховуючи, безперечно, необхідність проведення спеціальної водопідготовки перед передачею води споживачам.

Що стосується можливої зміни водоприпливу в кар'єр Східний, то його можна очікувати після досягнення в кар'єрі Стильський максимальних абсолютних позначок при його затопленні. Це пов'язано з наявністю підземного вододілу між цими кар'єрами і поступовим його зміщенням, що спричинено явищем підпору підземних вод у районі кар'єру Стильський при його затопленні; збільшення водоприпливу до кар'єру Східний сягне близько 10 % по відношенню до існуючого. Зауважимо також, що у зв'язку з «мокрою» консервацією кар'єру Стильський відновиться водоприплив по р. Суха Волноваха.

Зміни в балансових складових формування водообміну під впливом затоплення кар'єру Стильський передусім торкнулися взаємоді-

ношення між поверхневими та підземними водами (приплив з річок зменшився на 12 тис. м³/добу, а розвантаження в річки зросло на 27 тис. м³/добу). Приплив у кар'єр Стильський після його затоплення припинився.

Підйом рівня підземних вод міг призвести до підтоплення населених пунктів та заболочування долин річок. У зв'язку з цим було зіставлено позначки рельєфу місцевості та прогнозного положення п'єзометричних рівнів першого від поверхні водоносного горизонту.

В радіусі впливу кар'єру Стильський після його «мокрої» консервації, що була запланована, виявився тільки один населений пункт — Стила.

Мінімальні абсолютні позначки земної поверхні спостерігаються на правому березі р. Мокра Волноваха і становлять 105—110 м, а максимальні на лівому березі — до 149,0 м (переважно 120—140 м). У той же час прогнозні рівні підземних вод на правому березі сягають 95—100 м, а на лівому — 100—105 м. Отже, можна констатувати, що на території цього населеного пункту явище підтоплення спостерігатися не буде.

Таким же чином було проаналізовано взаємовідношення абсолютних позначок рельєфу місцевості та прогнозних значень рівнів підземних вод першого від поверхні водоносного горизонту. Були визначені невеличкі площі біля кар'єру Стильський, а також у заплаві р. Мокра Волноваха, де можливо заболочування.

Останній прогноз, який виконувався, стосувався питання поновлення видобування корисних копалин з кар'єру Стильський. Для цього визначався час осушення кар'єру до позначки +28,5 м при відкачуванні води з дебітами 3500 і 5000 м³/добу. В першому випадку безперервне відкачування повинно проводитися впродовж 13 місяців, у другому — 7 місяців.

Зауважимо, що останнє спілкування з представниками геологічної служби ПрАТ «Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат» було у вересні 2014 р. на 250-й день після початку затоплення кар'єру (пізніше, у зв'язку з відомими військово-політичними причинами, воно перервалося). На той час позначка відновленого рівня води в кар'єрі становила +66,3 м, що практично збігається з нашим прогнозом (див. рис. 4).

Прогноз якості підземних вод

Хімічний склад підземних вод нижньокарбонатних вапняків у районі досліджень визначається загальними геологічними та геоморфологічними особливостями його будови (Артеменко и др., 1972; Моренко и др., 1991; Хромов, 2010). Однак важливою особливістю району є те, що тут інтенсивно відбуваються процеси зміни природних гідрохімічних умов під впливом діяльності людини: розробка кар'єрів, що супроводжується значними водовідливами; експлуатація водоносного горизонту водозаборами; зарегульованість річкового стоку, що постійно підвищується. Все це призвело до значних змін природних умов формування хімічного складу підземних вод, що особливо різко проявилось практично з початку 50-х років минулого століття.

Тому виникла необхідність оцінки різноманітних штучних факторів, що впливають на зміну якості підземних вод. З'ясування основних тенденцій розвитку гідрохімічних умов основного водоносного горизонту (C_1) дає можливість прогнозувати подальші зміни якості підземних вод. Нижче наводиться опис якості та загальних умов формування підземних і поверхневих вод району робіт, які тісно пов'язані між собою.

Річка Суха Волноваха майже на всьому своєму простяганні проходить в межах товщі нижньокарбонатних вапняків. У своєму верхів'ї ця річка прорізає кристалічні породи докембрію та ефузивно-осадові породи девону. Води усіх приток р. Суха Волноваха в межений період мають сульфатний, рідше хлоридно-сульфатний склад і мінералізацію 3,12—5,82 г/дм³. Винятком є права притока річки — балка Барсукова, води якої мають мінералізацію 2 г/дм³. Підвищена мінералізація та сульфатний склад вод, що характерні для інших приток річки, пояснюються головним чином зарегульованістю поверхневого стоку численними ставками, що підвищує величину випаровування і сприяє інтенсивному накопиченню натрію та сульфатів. Таким чином, водотоки балок, що впадають в р. Суха Волноваха, відіграють негативну роль у формуванні хімічного складу річкових вод (Козина, 1993).

Однак основним джерелом формування водотоку річки та його хімічного складу є водо-

відлив з кар'єрів, що розробляються. Водовідлив із Західно-Доломітного рудника утримується ставками у с. Ольгинка, а водовідлив з кар'єру Вапняковий відбувається в кар'єр Доломітний. Тому в районі с. Новотроїцьке водотік річки малопотужний і живиться за рахунок атмосферних опадів і періодичних скидів Ольгинського ставка. Від балки Вовчої до гирла балки Мокра Мандриківка води річки в межений період мають хлоридно-сульфатний склад і мінералізацію 2,4—2,5 г/дм³.

Водовідлив з кар'єрів Центральний та Доломітний, води яких мають також хлоридно-сульфатний склад і мінералізацію 2,2—2,3 г/дм³, не змінює типу води і тільки незначним чином знижує її мінералізацію (до 2,3—2,4 г/дм³).

Після впадіння в р. Суха Волноваха балок Першинова та Долин-Тарама, води яких характеризуються мінералізацією 3,7—4,3 г/дм³, річкові води у створі перед кар'єром Східний мають мінералізацію 2,6—2,7 г/дм³. Води, що відкачуються з кар'єру Східний і скидаються в річку, мають сухий залишок на рівні 2,5 г/дм³ та практично не впливають на якість води в останній.

Униз за течією від кар'єру Східний відбувається поступове підвищення мінералізації води — до 3 г/дм³ у гирлі р. Суха Волноваха. Причина підвищення мінералізації річкової води на відрізу кар'єр Східний—водозабір «Кипуча Криниця» полягає в тому, що з лівобережжя впадають водотоки балок Єфремова, Сар'яр, Старшин-Тарама та Плекатиш-Тарама з мінералізацією від 4,2 до 5,8 г/дм³. Скид води із кар'єру Стильський незначним чином (на 0,1—0,3 г/дм³) знижує мінералізацію в річці. Зауважимо, що починаючи з 2007 р. водотік р. Суха Волноваха від св. 502 (посередині між кар'єром Стильський та водозабором «Кипуча Криниця») практично не існує.

Річка Мокра Волноваха протікає переважно в межах площі розвитку кристалічних порід докембрію та осадово-ефузивних відкладів девону. Тільки у своїй пригирловій частині вона пересікає нижньокарбонатні вапняки в межах Стильської ділянки та водозбору «Кипуча Криниця».

Стік р. Мокра Волноваха зарегульовано Стильським ставком, гребля якого розташована в межах карбонатної товщі. Тому хімічний склад річкових вод нижче греблі формується

здебільшого під впливом скиду води із ставка. Нижче греблі вода в річці характеризується сульфатним складом і мінералізацією $2,5 \text{ г/дм}^3$. Існування Стильського ставка, що перехоплює паводковий стік басейну річки, призвело до різкого погіршення якості води в її пригирлової частині. Це пояснюється тим, що у живленні водотоку річки різко підвищилась роль підземних вод алювію, які формуються в межах площі розвитку девонських та докембрійських порід Стильського горсту і відзначаються відносно підвищеною мінералізацією. Зарегульованість стоку річки Стильським ставком негативно впливає на формування підземних вод основного водоносного горизонту (C_1^1), в тому числі і на водозабір «Кипуча Криниця».

Роль поверхневих вод річок Суха Волноваха та Мокра Волноваха у формуванні хімічного складу підземних вод нижньокарбонічних вапняків майже однакова (Артеменко и др., 1972). Мінералізація води в р. Суха Волноваха на декілька десятків г/дм^3 вища, ніж у р. Мокра Волноваха. У меженний період водотік у цих річках існує переважно за рахунок скиду кар'єрних вод з мінералізацією $2,5 \text{ г/дм}^3$ в межах Новотроїцької, Оленівської та Шевченківської ділянок і $2,5\text{—}3,0 \text{ г/дм}^3$ на ділянці Кипуча Криниця.

Щодо підземних вод, приурочених до закарстованих вапняків нижнього карбону, то вони характеризуються дуже складними гідрохімічними умовами, зумовленими великою різноманітністю факторів, що впливають на формування їх хімічного складу.

В природних умовах живлення водоносного горизонту в межах відкритої частини карбонатної товщі відбувалось здебільшого внаслідок інфільтрації атмосферних опадів та поглинання поверхневих вод.

Після початку експлуатації водозаборів та здійснення водовідливу з кар'єрів у районі досліджень виникли взаємодіючі депресійні воронки. В результаті цього роль смуги закарстованих вапняків як дрени значним чином зросла. Крім того, інтенсивне будівництво ставків у 60-х роках минулого століття сприяло регулюванню поверхневого стоку і, як наслідок, значному підвищенню мінералізації води в поверхневих водотоках, що живлять нижньокарбонічні вапняки.

До того ж, можливе розвантаження підземних вод з підвищеною мінералізацією з нижче-

залягаючих водоносних горизонтів — докембрійського та девонського.

Підземні води закарстованих нижньокарбонічних вапняків мають переважно хлоридно-сульфатний склад, а серед катіонів превалює натрій. Однак, у залежності від умов живлення, склад підземних вод змінюється в широких межах — від гідрокарбонатно-сульфатного до сульфатно-хлоридного.

Нижче наведені особливості формування мінералізації підземних вод карбонатної товщі всього району.

Зростання мінералізації від $0,4$ до $1,4 \text{ г/дм}^3$ відбувається при постійному відносному вмісті сульфатів. Відносний вміст хлоридів збільшується, а такий гідрокарбонатів — зменшується (хоча абсолютний вміст останніх залишається постійним).

Серед катіонів відбувається зростання іонів магнію за рахунок відносного зменшення ролі кальцію.

В інтервалі $1,4\text{—}3,4 \text{ г/дм}^3$ збільшення мінералізації відбувається здебільшого за рахунок підвищення вмісту сульфатів. Роль хлор-іона залишається практично постійною. Співвідношення катіонів змінюється мало. При досягненні мінералізації $4\text{—}5 \text{ г/дм}^3$ зростання вмісту сульфатів припиняється, і подальше підвищення величини сухого залишку пов'язано з інтенсивним накопиченням у воді хлор-іона.

Вказаний характер накопичення солей дозволяє вважати, що підземні води з мінералізацією $0,4\text{—}1,4 \text{ г/дм}^3$ являють собою води атмосферних опадів та паводків, що інфільтруються в нижньокарбонічні вапняки і поступово збагачуються солями, насамперед хлоридами, зростання вмісту яких з підвищенням мінералізації досить витримано. Починаючи з мінералізації $1,4\text{—}1,5 \text{ г/дм}^3$ відносне накопичення у воді хлору припиняється, а сульфатів — різко зростає. Це свідчить про те, що у формуванні сольового складу води з мінералізацією $2\text{—}4 \text{ г/дм}^3$ основну роль відіграють водотоки балок та річок із зарегульованим стоком, що вирізняються переважно сульфатним складом, а також підземні води, приурочені до відносно слабопроникних порід різного віку.

Інтенсивне зростання вмісту у воді іона хлору, що спостерігається при мінералізації $4\text{—}5 \text{ г/дм}^3$, характеризує перехід до зони утрудненого водообміну.

Зупинімося більш детально на гідрохімічних особливостях водозабору «Кипуча Криниця», що відігравав свого часу певну роль у питному водопостачанні м. Донецьк і досі має значні не використані затверджені експлуатаційні запаси підземних вод, що приурочені до нижньокарбонівих вапняків.

Відмінною рисою ділянки водозабору є значна площа області живлення, в межах якої відбувається інфільтрація атмосферних опадів та поглинання паводкових вод, чому сприяє відсутність неоген-палеогенових відкладів.

У природних умовах підземні води нижньокарбонівих вапняків мали хлоридно-сульфатний склад та мінералізацію 1,3—1,6 г/дм³. Води підвищеної мінералізації (2,4—4,9 г/дм³) були характерні тільки для південно-західної частини ділянки водозабору «Кипуча Криниця», де нижньокарбоніві відклади перекриті потужною товщею піщано-глинистих палеогенових відкладів. Це пов'язано з поганими умовами живлення та малою проникністю нижньокарбонівих вапняків на цій площі (Артеменко и др., 1972).

Починаючи з 50-х років минулого століття спостерігалось поступове підвищення мінералізації підземних вод на водозаборі «Кипуча Криниця». Основними факторами, що сприяли погіршенню якості води, були такі:

- існування постійного водотоку р. Суха Волноваха за рахунок водовідливів з кар'єрів, що характеризується мінералізацією води (в межень) 2,5—3,0 г/дм³;

- зарегульованість стоків лівих приток р. Суха Волноваха (балки Єфремова, Жовта, Сар'ян та ін.), в результаті чого їх водотоки мають сульфатний склад і мінералізацію 4,2—5,8 г/дм³;

- зарегульованість поверхневого стоку басейну р. Мокра Волноваха, в результаті чого мінералізація води в межень збільшилась до 2—2,5 г/дм³ в межах ділянки водозабору.

Зупинімося на умовах формування підземних вод нижньої закарстованої зони, що значним чином впливає на живлення водозабору «Кипуча Криниця».

Формування хімічного складу підземних вод цієї зони в природних умовах починається на площі Шевченківської ділянки, де підземні води характеризуються середньою мінералізацією 2,0 г/дм³ та вмістом іона хлору 8,25 мг-екв/

дм³. Донизу за потоком підземних вод у напрямку водозабору «Кипуча Криниця» ці показники зменшуються до 1,4 г/дм³ та 6,06 мг-екв/дм³, відповідно (Артеменко и др., 1972). Такий характер зміни хімічного складу підземних вод можна пояснити наявністю додаткових джерел живлення, якими були тимчасові поводкові водотоки невеликих, але глибоко врізаних балок, що впадають у р. Суха Волноваха. Ці балки були не зарегульовані та відзначалися добре проникним ложем, тому що тут відсутні піщано-глинисті полтавські відклади. Практично всі свердловини, що були закладені у тальвегах дрібних приток річок, розкрили гідрокарбонатно-сульфатні води з мінералізацією 0,4—1,4 г/дм³.

Починаючи з 50-х років минулого століття природні умови формування підземних вод були значним чином порушені, що відбилосся на їх якісному складі. У свердловинах на північ від Північного скиду за період їх експлуатації спостерігалось підвищення сухого залишку з 1,25—1,35 до 2,10—2,70 г/дм³. При цьому характер змін хімічного складу не залежить від глибини свердловин. Приплив до них формується як за рахунок вод нижньої водозбагаченої зони, так і за рахунок верхньої закарстованої зони. Води нижньої зони характеризуються глибокою циркуляцією, їх склад досить стабільний. Підземні води верхньої зони є водами місцевого формування. Їх хімічний склад багато в чому залежить від характеру поверхневого стоку. Тому поглинання в районі водозабору водотоків балок Єфремова, Плекатиш-Тарама, Старшин-Тарама, води яких мають сульфатний склад та мінералізацією 4—5 г/дм³, сприяє підвищенню мінералізації та сульфатності підземних вод закарстованої зони. Викладене вище стосується насамперед групи свердловин (св. 13—17, 19), які знаходяться біля р. Суха Волноваха.

Ще одна група свердловин (св. 1, 6—8) розташована трохи на південь в басейні р. Мокра Волноваха та обмежується Північно-Стильським скидом. Всі свердловини цієї групи, за винятком св. 8, розкривають верхню частину карбоніві товщі. Варто зазначити, що зарегульованість р. Мокра Волноваха негативно впливає на формування якості підземних вод. Мінералізація по цих свердловинах під час їх експлуатації збільшилась вдвічі — з 1,25—1,32

до 2,5—2,6 г/дм³. При цьому хімічний склад підземних вод відповідає хімічному складу річкової води, який змінився після будівництва Стильського ставка.

Насамкінець варто зазначити, що основний негативний вплив на зміну хімічного складу і мінералізації підземних вод у межах водозабору «Кипуча Криниця» має зарегульованість поверхневого стоку басейнів річок Суха Волноваха та Мокра Волноваха. Разом з тим станом на 2013 р. у районі досліджень склалася врівноважена гідрохімічна система (мінералізація підземних і поверхневих вод у районі ідентична), і тому якість підземних вод зараз і на майбутнє досить стабільна, а «мокра» консервація кар'єру Стильський не змінить цієї ситуації.

Висновки

1. Вперше створено гідрогеологічну модель району досліджень, яка вдвічі перевищує площу попередніх моделей (Руденко і др., 1997; Шестопалов і др., 1995) та має значно менший крок розбиття області моделювання. Останнє дозволило більш детально врахувати гідрогеологічні особливості водоносної системи, що моделюється. В ході розв'язання обернених задач доведена її функціональна відповідність природно-антропогенним умовам об'єкта досліджень, а також уточнені розрахункові гідрогеологічні параметри.

2. Охарактеризовано якісний склад поверхневих і підземних вод території, що вивчається. Встановлені основні причини погіршення їх якості по відношенню до природних умов. Перш за все вони пов'язані із зарегульованістю поверхневого стоку та зростанням мінералізації у річках району (переважно на їх притоках). Крім того, це розвантаження підземних вод підвищеної мінералізації з нижчезалягаючих водоносних горизонтів — девонського та докембрійського. В підземних водах, приурочених до нижньокарбонівих вапняків, спостерігається зростання вмісту сульфатів та хлоридів.

3. Прогноз гідродинамічного впливу «мокрої» консервації кар'єру Стильський на гідрогеологічні умови району досліджень показав таке:

- підйом рівня підземних вод у районі кар'єру буде спостерігатися протягом двох років, поки не досягне сталої позначки +88,0 м;

- радіус впливу «мокрої» консервації кар'єру після стабілізації рівня води в ньому буде сягати 6,5—7,5 км. При цьому підземний вододіл між кар'єрами Стильський та Східний частково збережеться, і тому збільшення водоприпливу в останній буде незначним (до 10 % по відношенню до існуючого);

- за 13 місяців після початку «мокрої» консервації кар'єру Стильський він стане додатковим джерелом живлення для водозабору «Кипуча Криниця» (відбувається інверсія напрямку потоку підземних вод). Максимальне перевищення рівня підземних вод у районі кар'єру Стильський над їх рівнем на водозаборі «Кипуча Криниця» (за умови збереження його дебіту) сягне близько 5 м. На водозаборі «Шевченківський» прогнозується відсутність будь-яких змін (це стосується як динаміки підземних вод, так і їх якісного складу);

- у зв'язку з підвищенням рівня підземних вод, що буде викликано затопленням кар'єру Стильський, виділені незначні ділянки можливого заболочування територій, що прилягають до кар'єру і в заплаві р. Мокра Волноваха. Підтоплення населеного пункту Стила не станеться;

- після затоплення кар'єру Стильський відновиться постійний водотік по р. Суха Волноваха.

4. Гідрохімічна ситуація (мінералізація та хімічний склад підземних вод) у районі досліджень залишиться стабільною.

5. За умови необхідності відновлення видобування корисних копалин з кар'єру Стильський необхідно проводити його осушення з дебітом 5000 м³/год протягом семи місяців для досягнення позначки +28,5 м. При цьому збереження корисних копалин у надрах після затоплення кар'єру Стильський буде забезпечене, тому що в природних умовах упродовж геологічного часу вони знаходилися в обводненому середовищі. Однак, з точки зору авторів статті, такий сценарій розвитку подій малоймовірний.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Артеменко А.Е., Киселев Н.П., Бобылева Л.С., Суярко А.В. Отчет о гидрогеологических исследованиях карбонатной толщи C_1^1 с целью водоснабжения г. Докучаевск и других объектов с разработкой оптимальных условий эксплуатации водозаборов и карьеров. Артемовск: ДНВП «Геоинформ України», 1972.
- Гайдин А.М. Затопление карьеров. *Геозкология. Инж. геология, гидрогеология, геокриология*. 2009. № 4. С. 371—374.
- Козина Е.Д. Отчет по изучению экзогенных геологических процессов в зоне сочленения Донбасса с Приазовским кристаллическим массивом (Донецкая обл.) в 1986—1991 гг. Волноваха: ДНВП «Геоинформ України», 1991.
- Козина Е.Д. Отчет по изучению экзогенных геологических процессов в зоне сочленения Донбасса с Приазовским кристаллическим массивом (Донецкая обл.) в 1991—1993 гг. Волноваха: ДНВП «Геоинформ України», 1993.
- Лютый Г.Г., Древіна Т.А., Саніна І.В. Звіт: Розробка методики оцінки стану експлуатаційних запасів і прогнозних ресурсів питних підземних вод України. Київ: ДНВП «Геоинформ України», 2003.
- Моренко Ю.И., Козина Е.Д., Лисянская Л.А. Отчет о работах по изучению режима подземных вод, оценке их состояния, Государственному учету и Государственному водному кадастру Донецкой области на 1988—1990 гг. Артемовск: ДНВП «Геоинформ України», 1991.
- Региональные техногенные изменения геологической среды Донбасса под влиянием горных работ: Галецкий Л.С. (отв. ред.). Киев: О-во «Знание» Украины, 1997. 67 с.
- Руденко Ю.Ф., Пархоменко А.Н., Малютин Н.А. Отчет о НИР «Исследование воздействия «мокрой» консервации Стильского карьера на запасы и качество подземных вод действующих водозаборов». Киев: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 1997. 39 с.
- Хромов А.М. Звіт: Геолого-економічна оцінка Західної ділянки Стильського родовища доломітів. Донецьк: ДНВП «Геоинформ України», 2010.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Гураль О.В., Малютин Н.А. Отчет о НИР «Влияние Стильского и Восточного карьеров Докучаевского флюсо-доломитного комбината с учетом перспектив их развития на состояние водозабора «Кипучая Криница» и меры по его защите от истощения и загрязнения». Киев: Архив НИЦ РПИ НАН Украины, 1995. 145 с.
- Bagriy S.M., Davybyda L.I., Kuzmenko E.D. Spatial modelling and prediction of environmental situation when filling Dombrowski quarry: GIS approach. *Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту*. 2017. № 2. С. 106—111. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_2_18
- Ballesteros, C., Ybañez, R., Baldago, M.C., Arcilla, C. Flood Mitigating Effects of Open-Pit Quarrying in Rizal, Philippines. Poster presented at the American Geophysical Union Fall Meeting. 2016. San Francisco, U.S.A.
- Processing Modflow. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution Wen-Hsing Chiang and Wolfgang Kinzelbach December Users Manual. 1998. (<http://www.pmwint.net/pmwint5.htm>)

Надійшла до редакції 13.07.2021

Надійшла у ревізованій формі 01.08.2021

Прийнята 11.08.2021

REFERENCES

- Artemenko, A.E., Kiselev, N.P. Bobyleva L.S., Suyarko A.V. (1972). Report on hydrogeological investigations of the C_1^1 carbonate formations for the purpose of water supply to Dokuchaevsk and other objects with formulation of optimal conditions for operation of water intake structures and quarries. Artemovsk: Geoinform of Ukraine (in Russian).
- Bagriy, S.M., Davybyda, L.I., Kuzmenko, E.D. (2017). Spatial modelling and prediction of environmental situation when filling Dombrowski quarry: GIS approach. *Naukovyy visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 2, 106-111. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_2_18
- Ballesteros, C., Ybañez, R., Baldago, M.C., Arcilla, C. (2016). Flood Mitigating Effects of Open-Pit Quarrying in Rizal, Philippines. Poster presented at the American Geophysical Union Fall Meeting 2016, San Francisco, U.S.A.
- Gaidin, A.M. (2009). Flooding of quarries. *Geologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya*, 4, 371-374 (in Russian).
- Galetsky, L.S. (Ed.) (1997). Regional anthropogenic changes in geological environment of the Donbass under the influence of mining works. Kyiv: "Znanie" Society of Ukraine (in Russian).
- Khromov, A.M. (2010). Report: Geological and economic evaluation of the Zakhidna section of the Stylske deposit of dolomites. Donetsk: Geoinform of Ukraine (in Ukrainian).
- Kozina, E.D. (1991). Report on study of exogenous geological processes in the junction zone of Donbass with the Pre-Azov crystalline massif (Donetsk region) in 1986-1991. Volnovakha: Geoinform of Ukraine (in Russian).
- Kozina, E.D. (1993). Report on study of exogenous geological processes in the junction zone of Donbass with the Pre-Azov crystalline massif (Donetsk region) in 1991-1993. Volnovakha: Geoinform of Ukraine (in Russian).
- Lyutyi, G.G., Drevina, T.A., Sanina I.V. (2003). Report: Development of methodology to assess the state of operational reserves and forecast resources for drinking groundwater in Ukraine. Kyiv: Geoinform of Ukraine (in Ukrainian).

- Morenko, Y.I., Kozina, E.D., Lisyanskaya L.A (1991). Report on the studies of groundwater regime, its state assessment, State accounting and State water cadastre for the Donetsk region in 1988-1990. Artemovsk: Geoinform of Ukraine (in Russian).
- Processing Modflow (1998). A Simulation System for Modelling Groundwater Flow and Pollution Wen-Hsing Chiang and Wolfgang Kinzelbach December Users Manual (<http://www.pmwin.net/pmwin5.htm>)
- Rudenko, Yu.F., Parkhomenko, A.N., Malyutina, N.A. (1997). Report on the research "Study of impact of wet-based conservation of the Stylskyi quarry on groundwater reserves and quality within the operating water intake structures". Kyiv: Archives of Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Rudenko, Yu.F., Gural, O.V., Malyutina, N.A. (1995). Report on the research "Influence of Stylskyi and Vostochnyi (Skhidnyi) quarries of Dokuchaevsk flux-dolomite complex in view of their further development on the status of the Kipucha Krynytsa water intake structure and measures to protect it against depletion and contamination". Kyiv: Archives of Radioenvironmental Centre of NAS of Ukraine (in Russian).

Received 13.07.2021

Received in revised form 01.08.2021

Accepted 11.08.2021

Yu.F. Rudenko¹, V.M. Shestopalov¹, Yu.A. Negoda^{2*}, O.V. Gural¹

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

E-mail: rud@hydrosafe.kiev.ua

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

E-mail: negoda@nas.gov.ua

* Corresponding author

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE HYDROGEOLOGICAL
CONDITIONS CAUSED BY WET-BASED CONSERVATION OF THE STYLSKYI
QUARRY OPERATED BY "DOKUCHAEVSK FLUX AND DOLOMITE COMPLEX"
PJSC USING MATHEMATICAL MODELLING

Extraction of minerals significantly affects the hydrogeological conditions of the environment. Active development of mining operations in the Donbas region determined the dominant influence of technogenic changes in geological environment on the formation of modern ecological conditions in the region. This applies not only to coal mining but also raw materials extraction (dolomites, limestone) for metallurgical plants mostly by quarrying. Recently, a significant environmental problem in the region has been the mines and quarries closure, envisaged by the program for restructuring the coal industry of Ukraine. Closure of mines or quarries through wet-based conservation is the least financially expensive, although it significantly increases the technogenic load on the natural environment.

The object of research involved groundwater and surface water within the area of the Stylskyi and Skhidnyi (Vostochnyi) quarries of the "Dokuchaevsk flux-dolomite complex" PJSC, as well as Kipucha Krynytsa and Shevchenkivskyi water intake structures. The goal of research was to forecast changes in the hydrogeological conditions under the influence of wet-based conservation of the Stylskyi quarry. To achieve this goal, hydrogeological methods, mathematical modelling, and expert assessments were used. Consequently, a hydrogeological model of the research area was created, its functional correspondence to the natural-anthropogenic conditions was confirmed, and calculation hydrogeological parameters were specified.

As a result, the forecast of changes in the hydrogeological conditions under the influence of wet-based conservation of the Stylskyi quarry was made. In particular, the following issues were determined: the dynamics of quarry flooding; the influence of this process on changes in water inflows to the Skhidnyi (Vostochnyi) quarry, Kipucha Krynytsa and Shevchenkivskyi water intake structures; possible flooding of settlements and swamping of the research area; changes in chemical composition and groundwater salinity; time of quarry draining at various intensity of water outflow to resume mineral production in case of need. We would like to emphasize that the forecasts made should be used when designing partial or full flooding of the Stylskyi quarry.

Keywords: quarry; water intake structure; groundwater flow; wet-based conservation; ground- and surface water; hydrogeological model; quality; technogenesis; forecast.