

УДК 622.33(477.6):628.394:628.16

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-24>

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ ШАХТНИХ ВОД ДОНБАСУ ЯК ДЖЕРЕЛА ПИТНО-ГОСПОДАРСЬКОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ

Єрмаков В. М.¹, Яковлєв Є. О.², Чумаченко С. М.³,
Гончаренко І. О.⁴, Соколов Є. В.⁵

¹Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

³Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ

⁴Сумський державний університет, м. Суми

⁵Державна установа «Інститут морської біології НАН України»

sergiy23.chumachenko@gmail.com, evn54@ukr.net

ihorhoncharenko@gmail.com, sokolovev87@gmail.com

Анотація

Метою дослідження є наукове обґрунтування потенціалу використання шахтних вод Донбасу, що відкачуються під час депресії вугільних родовищ, як альтернативного джерела питно-господарського водопостачання в умовах критичного дефіциту водних ресурсів та загострення екологічної ситуації, спричиненої воєнними діями. Методологічна база ґрунтується на комплексному підході, що поєднує гідрогеохімічний аналіз, моделювання гідрогеологічних процесів, екологічну оцінку та технологічний аудит сучасних методів водопідготовки, включно з мембранними технологіями (зворотний осмос, електродіаліз). Проаналізовано світові практики опріснення шахтних вод для адаптації до специфічних умов Донбасу.

Результати свідчать, що попри високий рівень мінералізації та специфічний іонний склад, зна-

чна частина шахтних вод регіону може бути доведена до нормативних показників питної води за допомогою комбінованих технологічних схем, що включають попереднє знезалізнення, пом'якшення та мембранне розділення. Економічна оцінка підтвердила конкурентоспроможність підготовленої шахтної води, особливо з урахуванням логістичних обмежень у регіонах з дефіцитом води.

Отримані результати створюють наукове підґрунтя для розробки регіональної стратегії сталого водопостачання Донбасу та демонструють можливість трансформації екологічно небезпечних шахтних скидів у стратегічно важливий ресурс для післявоєнного відновлення та підвищення стійкості критичної інфраструктури.

Ключові слова: шахтні води, Донбас, питне водопостачання, опріснення, мембранні технології, водний дефіцит, екологічні ризики, резильєнтність водопостачання.

SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF THE POTENTIAL USE OF DONBAS MINE WATER AS A SOURCE OF DRINKING AND HOUSEHOLD WATER SUPPLY UNDER CONDITIONS OF ARMED CONFLICT

Ermakov Viktor, Yevhenii Yakovliev, Chumachenko Serhii,
Honcharenko Ihor, Sokolov Yevhen

Abstract

The aim of this study is to provide a scientific justification for the potential use of mine water in the Donbas region - pumped during the depressurization of coal deposits - as an alternative source of domestic and drinking water supply under conditions of severe water scarcity and environmental degradation intensified by ongoing hostilities.

The methodology is based on an integrated approach combining hydrogeochemical analysis, hydrogeological process modelling, environmental assessment, and technological auditing of modern water treatment methods, including membrane-based processes such as reverse osmosis and electrodialysis. Global practices of mine-water desalination were reviewed to identify technologies suitable for adaptation to regional conditions.

The results indicate that despite high mineralization and specific ionic composition, a substantial share of mine water in Donbas can be treated to potable standards using combined technological schemes involving preliminary de-ferroisation, softening, and membrane separation. Economic analysis demonstrated the competitiveness of treated mine water, particularly in water-deficient or logistically constrained areas.

The findings provide a scientific foundation for developing a regional strategy for sustainable water supply in Donbas and highlight the potential to transform environmentally hazardous mine-water discharges into a valuable resource that supports post-war recovery and enhances the resilience of critical infrastructure.

Keywords: mine water; Donbas; drinking water supply; desalination; membrane technologies; hydrogeochemistry; water scarcity; environmental risks; water infrastructure resilience.

Вступ

Донбас історично належить до регіонів із найвищим рівнем техногенного навантаження в Україні. Ще з радянських часів територія характеризувалася значними обсягами викидів забруднювальних речовин в атмосферу, скидів неочищених стічних вод у поверхневі водні об'єкти та масштабним накопиченням промислових відходів. Такі умови були зумовлені поєднанням природно-ресурсних чинників і структурою регіональної економіки, що базувалася на вугільній та хімічній промисловості, гірничо-металургійному комплексі та машинобудуванні. Протягом понад 200 років на території площею близько 15 тис. км² інтенсивно розробляли вугільні родовища: із надр було вилучено близько 20 млрд т порід, з яких 15 млрд т – вугілля. Унаслідок цього на площі близько 8 тис. км² зафіксовано середнє просідання земної поверхні на 1,5–2 м, а об'єм деформованого породного масиву оцінюється у 600 км³.

Висока концентрація потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) значною мірою визначає рівень техногенної небезпеки регіону. Зокрема, станом на 2009 р. у Донецькій області функціонували 157 вугільних шахт, 108 гідротехнічних споруд, 537 автозаправних станцій, 12 кар'єрів, 11 залізничних станцій, 115 мостів і шляхопроводів,

1 тунель та 13 магістральних трубопроводів. У Луганській області діяли 69 шахт, 66 гідротехнічних об'єктів, 247 автозаправних станцій, 3 кар'єри, 2 залізничні станції, 13 мостів і 5 магістральних трубопроводів.

На початок 2013 р. у Донецькій області було зареєстровано 3020 ПНО (13 % від загальної кількості по Україні), що становить у середньому 114 об'єктів на 1000 км². У Луганській області налічувалося 1220 ПНО (5 % загальної кількості), або 46 об'єктів на 1000 км². Значна частина цих об'єктів відносилася до вибухо-, пожежо-, гідродинамічно та хімічно небезпечних.

Сьогодні однією з найгостріших екологічних загроз регіону є масове затоплення шахт, спричинене бойовими діями та зупинкою систем водовідливу. Припинення відкачування води на низці шахт, особливо на тимчасово непідконтрольних територіях, призвело до стрімких змін у гідрогеологічному режимі, зростання мінералізації та токсичності шахтних вод, просідання поверхні, підтоплення населених пунктів і транспортної інфраструктури, а також деградації ґрунтів та екосистем.

Негативний вплив затоплених шахт проявляється у кількох ключових компонентах довкілля:

1. Гідросфера: підняття рівня ґрунтових вод, забруднення водоносних горизонтів сульфатами, важкими металами, фенолами та потенційними радіонуклідами.

2. Літосфера: локальні просідання земної поверхні (у деяких районах – до 60 см), які призводять до пошкодження будівель та інженерних споруд.

3. Атмосфера: ризик вторинних хімічних викидів унаслідок руйнування промислових об'єктів та складів реагентів, зокрема хлору.

4. Біота: деградація ґрунтів, зниження біорізноманіття, погіршення умов ведення сільського господарства.

Таким чином, екологічний стан Донбасу значною мірою визначається критичною ситуацією з шахтними водами, що становлять як значну загрозу для довкілля, так і потенційний ресурс у разі впровадження сучасних технологій водопідготовки. У цьому контексті актуальним є наукове дослідження можливостей використання шахтних вод як альтернативного джерела питно-гос-

подарського водопостачання, особливо з огляду на загострення водного дефіциту в умовах воєнних дій.

Аналіз попередніх досліджень

Проблематика використання шахтних вод як потенційного ресурсу для питно-господарського водопостачання досліджувалася у світовій практиці і частково – у контексті Донбасу до 2014 року. Однак безпрецедентні зміни, спричинені повномасштабною війною з 2022 року, докорінно трансформували характер викликів, пов'язаних із шахтними водами, включно з їхнім обсягом, режимом накопичення, хімічними властивостями та впливом на довкілля.

Сучасна наукова література фактично не містить комплексних рішень, які б одночасно враховували екологічні, технологічні, безпекові, інфраструктурні та економічні аспекти використання шахтних вод в умовах воєнних дій.

Це формує нагальну потребу в оновленому науковому підході, що виходить за межі традиційних інженерних та екологічних завдань і орієнтується на забезпечення резильєнтності, автономності та життєстійкості систем водопостачання у період тривалої нестабільності, руйнувань та гібридних загроз. Ключові не вирішені науково-практичні проблеми водопостачання Донбасу в умовах воєнних дій:

1. Непередбачувана динаміка гідрохімічного режиму

Масове та неконтрольоване затоплення шахт унаслідок бойових дій призвело до різких змін у гідрогеологічних системах.

Порушення водовідливу спричинило інтенсифікацію процесів вилуговування порід, перемішування водоносних горизонтів, накопичення токсичних сполук і потенційне забруднення вод військовими відходами.

Брак актуального моніторингу призводить до значних прогалин у даних про мінералізацію, хімічний склад і об'єми шахтних вод.

Стандартні моделі водопідготовки не враховують таких різких коливань якості води, що потребує розробки адаптивних технологічних схем.

2. Деградація централізованої інфраструктури та проблема резильєнтності

Систематичні атаки на інфраструктуру – водогони, насосні станції, електромережі – зробили централізовані системи водопостачання ненадійними та вразливими. Наявні наукові підходи не містять модернізованих концепцій проєктування систем водопідготовки, здатних забезпечувати автономність, мобільність, стійкість до фізичних пошкоджень та швидке відновлення. Традиційні стаціонарні очисні споруди не відповідають вимогам часу, а тому потрібне обґрунтування доцільності використання децентралізованих, модульних установок, поєднаних із автономними джерелами енергії.

3. Оцінка техніко-економічної доцільності в умовах гібридних ризиків

Звичайні моделі техніко-економічного аналізу є недостатніми для умов війни. Методологія має враховувати непрямі, приховані та довгострокові витрати: критичний дефіцит водних ресурсів, логістичні витрати на доставку води, регулярні витрати на відновлення зруйнованої інфраструктури, гуманітарні втрати через нестачу води, стратегічну цінність забезпечення життєдіяльності населення.

Без переосмислення економічних критеріїв інвестиції в автономні системи можуть здаватися необґрунтованими, хоча в умовах війни вони є єдино життєздатними.

4. Екологічні ризики поводження з концентратами в умовах бойових дій

Очищення високомінералізованих шахтних вод неминуче супроводжується утворенням концентратів (розсолів). У мирний час їх утилізація вже є складним завданням, а під час війни – ще більш небезпечним. Обмежений доступ до полігонів, ризик руйнування інфраструктури, мінна небезпека та загроза потрапляння концентратів у довкілля потребують розробки мобільних, екологічно безпечних та енергоефективних рішень, спрямованих на мінімізацію об'ємів відходів та безпечне поводження з ними.

Аналіз останніх наукових досліджень та публікацій

Проблематика використання шахтних вод як потенційного ресурсу для питно-господарського водопостачання протягом останніх десятиліть привертала увагу світової наукової спільноти, особливо в регіонах, що характеризуються поєднанням інтенсивного гірничодобувного виробництва та дефіциту водних ресурсів. У міжнародній практиці значний досвід накопичено в Південній Африці, де кислі шахтні води з високою мінералізацією та вмістом важких металів очищуються до рівня питних стандартів за допомогою комбінованих технологій нейтралізації, коагуляції та мембранного розділення. Зокрема, системи, реалізовані у Witwatersrand Gold Fields, демонструють високий рівень ефективності мембранних технологій, зворотного осмосу та інтегрованих схем попередньої обробки [1, с. 579–583]. Подібні тенденції простежуються і у США, де в штатах Пенсільванія та Західна Вірджинія створені пілотні системи очищення шахтних вод для технічних потреб, зрошення та підтримки локальних екосистем. Окремі дослідження, зокрема J. Brady та ін., присвячені застосуванню електрохімічних технологій, що дозволяють зменшити обсяг утворення концентратів та забезпечити гнучкість систем водопідготовки в умовах коливання якості вихідної води [8, с. 112–119].

Зростаючий інтерес до використання шахтних вод як альтернативного ресурсу спостерігається і в Китаї, найбільшому видобувачі кам'яного вугілля у світі. Дослідження X. Wang і співавторів підкреслюють ефективність комбінованих технологічних схем, що включають біологічну очистку, коагуляцію, ультрафільтрацію та зворотний осмос для повторного використання шахтних вод у промислових та сільськогосподарських цілях [6, с. 5–9]. У зазначених роботах наголошується, що мембранні технології залишаються ключовим елементом системи очищення, але їх успішне застосування можливе лише за умови ретельно спроектованої попередньої обробки з метою зниження жорсткості, видалення завислих речовин і металів. Це підтверджують й оглядові праці M. El-Din та ін., які підкреслюють універсальність мембранних процесів для вилучення солей та

важких металів, однак одночасно наголошують на їхній енергоємності та чутливості до забруднення мембранного полотна [2, с. 36155–36158].

Важливим напрямом розвитку технологій очищення шахтних вод є електродіаліз. Результати досліджень J. Van der Bruggen та ін. показують, що електродіаліз є ефективним та енергоощадним методом для видалення солей з вод низької та середньої мінералізації, особливо коли повне опріснення не є обов'язковим, а необхідне лише часткове зниження загальної мінералізації до нормативних значень [5, с. 8–13].

Крім того, технології попередньої обробки, такі як коагуляція-флокуляція, осадження та сорбційні методи, розглянуті у дослідженнях L. Li та ін., відіграють критичну роль у забезпеченні стабільності роботи мембранних систем, зменшенні ризику їхнього забруднення та подовженні експлуатаційного ресурсу [7, с. 2–6].

У контексті Донбасу проблема шахтних вод досліджувалася українськими науковцями ще до 2014 року. У роботах І. Заболоцької, В. Сенаторова, О. Донця, В. Савенка та інших детально аналізуються екологічні наслідки затоплення шахт, зміна гідрогеологічного режиму та ризику забруднення водоносних горизонтів важкими металами і сульфатами [3, с. 68–72; 4, с. 178–182]. Праці Є. Яковлева, Є. Анпілової, О. Трофимчука та ін. визначають довгострокові ризики хімічного та радіологічного забруднення, пов'язані з неконтрольованим підтопленням гірничих виробок, а також моделюють можливі сценарії змішування шахтних вод із підземними водоносними горизонтами [9, с. 44–51; 10, с. 23–31].

Проте повномасштабне вторгнення РФ у 2022 році кардинально змінило параметри гідрогеологічних систем Донбасу. Масове зупинення водовідливу, руйнування гідротехнічної інфраструктури та ускладнений доступ до більшості шахт призвели до формування нових водно-хімічних систем, параметри яких досі не піддавалися систематичному науковому аналізу.

Накопичення шахтних вод, їхня зміна мінералізації, можливе потрапляння військових токсикантів та паливно-мастильних матеріалів створюють принципово новий набір загроз, який не був властивий довоєнному періоду. Таким чином, наявні дослідження частково втратили актуальність, оскільки базуються на довоєнних даних і

не враховують різку зміну гідрохімічних процесів, спричинену бойовими діями [11, с. 102–109].

Сучасна міжнародна література з військової гідрогеології також надає важливі орієнтири. У роботах A. Szymański та ін. описано моделі забруднення підземних вод у зонах бойових дій та наголошено на необхідності адаптивного підходу до оцінки якості води в умовах військових ризиків [12, с. 204–210]. Публікації R. Gutiérrez-Álvarez та ін. також підкреслюють, що конфлікти призводять до важко прогнозованих змін у геохімії підземних вод, що потребує створення мобільних систем моніторингу та швидких технологій очищення [13, с. 511–518].

Варто відзначити і нові підходи до техніко-економічної оцінки систем очищення води в умовах гібридних загроз. Дослідження J. Han та ін. аналізують вплив факторів нестабільності, перебоїв в енергопостачанні та руйнування інфраструктури на вартість та ефективність автономних систем водопідготовки, що є релевантним для Донбасу [14, с. 139–147].

Окремі праці S. Patel та ін. розглядають питання мінімізації утворення концентратів та безпечної утилізації високомінералізованих розсолів у кризових умовах, що має особливе значення з урахуванням мінної небезпеки на сході України [15, с. 223–229].

Таким чином, аналіз сучасних наукових досліджень виявляє значну кількість напрацювань у сфері очищення шахтних вод та водопостачання у складних умовах, але водночас демонструє *відсутність комплексних рішень*, які б інтегрували технологічні, екологічні, економічні та безпекові аспекти, релевантні ситуації на Донбасі після 2022 року. Це визначає необхідність розвитку адаптованих, резильєнтних і економічно доцільних технологічних схем, здатних перетворити шахтні води з джерела екологічної небезпеки на важливий елемент системи сталого водопостачання у воєнний та післявоєнний період.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Регіональна характеристика структурно-геологічних, гідрогеологічних та еколого-геологічних умов Донбасу.

Гідрогеологічні умови регіону Донбасу достатньо повно описані у виданій літературі та

фондових роботах, тому вони були використані при характеристиці території обстеження резервних джерел питно-господарчого водопостачання (ПГВ). У зв'язку з цим у розділі приводяться тільки ті особливості геологічної будови басейну та його гідрогеологічних умов, які пов'язані з переважаючим впливом на геологічне середовище гірничих (вугледобувних) робіт, іншої господарчої діяльності та військових дій.

Особливості геолого-гідрогеологічних умов Донбасу для визначення особливостей формування ресурсів прісних підземних вод та водоприпливів до вугільних шахт прийнято визначати трьома типами гідрогеологічної розкритості комплексу кам'яновугільних відкладів.

Природні та техногенно-порушені умови у вугледобувних районах Донбасу на сучасному етапі функціонування гірничо-добувних районів, промислово-міських агломерацій, об'єктів критичної інфраструктури, в т.ч. систем питно-господарчого водопостачання (ПГВ), мають певні особливості, які переважно формуються переважно під впливом факторів затоплення чичленних шахт.

До **особливостей природних умов** території Донбасу відносяться:

1) геолого – структурні: різноманітність форм та розмірів складчастих структур басейну (по формі це синклінальні та антиклінальні споруди від лінійних до брахіскладок із заляганням верств порід від горизонтального до майже вертикального); приналежність шахт до певних геоморфологічних елементів та ступінь розчленування рельєфу в зонах формування водозбору над шахтними полями; анізотропність кам'яновугільних відкладів у просторі і часі;

2) гідрогеологічні: залежність площ підземних прісних та слабо- мінералізованих вод від простягання порід та перешарування добре- і слабопроникних порід, що складають водоносні горизонти кам'яновугільних відкладів; скорочення кількості їх ділянок та площ з початком процесу затоплення нерентабельних шахт та кар'єрів.

До **особливостей техногенно-порушених умов** Донбасу можна віднести:

1) способи і система розробки родовищ кам'яного вугілля: наявність дуже складної системи гірничих виробок у широкому діапазоні глибин

з великою кількістю закритих і затоплених шахт; розширення фронту робіт у плані; тривалість експлуатації шахт;

2) гідрогеодинамічні: просторовий і несталий характер руху підземних вод в межах діючих і закритих шахт; наявність регіональних депресійних воронок, що поширюються далеко за межі шахтних полів, і локальних, що переміщуються разом з очисними виробками шахт; посилення інфільтраційного живлення атмосферними опадами над шахтними полями за рахунок зростання тріщинуватості після обрушення покрівлі над відпрацьованими очисними спорудами; збільшення проникності порід у зонах обрушення над покрівлею гірничих виробок; поглинання поверхневих вод і проникнення їх у гірничі виробки на ділянках порушених гірських масивів під водотоками та водоймищами;

3) інженерно-геологічні: формування мульд просідання земної поверхні над шахтними полями (величина просідання часом досягає 3-4 м), в яких утворились ділянки підтоплених і заболочених земель; ущільнення порід через деякий час після їх обвалення (в залежності від літологічного складу і ступеня метаморфізму кам'яновугільних відкладів); гідростатичне та дегідраційне стискання ґрунтів під час утворення депресійних воронок; щільне промислово – селітебне навантаження над більшістю вугледобувних комплексів з додатковим техногенним живленням ґрунтових вод.

2. Еколого-ресурсний стан поверхневих вод Донбасу.

На якості поверхневих вод та режимі поверхневих водотоків край негативно позначилася довгострокова (більше 200 років) гірничодобувна діяльність в Донбасі.

Загальний ресурс поверхневих вод Донбасу формується басейнами річок Дніпра, Сіверського Дінця та малих річок Приазов'я (див. рис. 1).

У природних умовах основне живлення річки Донбасу отримують за рахунок атмосферних опадів і, перш за все, за рахунок весіннього танення снігів, яке забезпечує 40-80 % їх стоку.

Живлення з підземних вод є значним лише в межах Донецького кряжу, де за рахунок глибокого врізу долини річок дренують водоносні горизонти у кам'яновугільних і покривних відкладах.

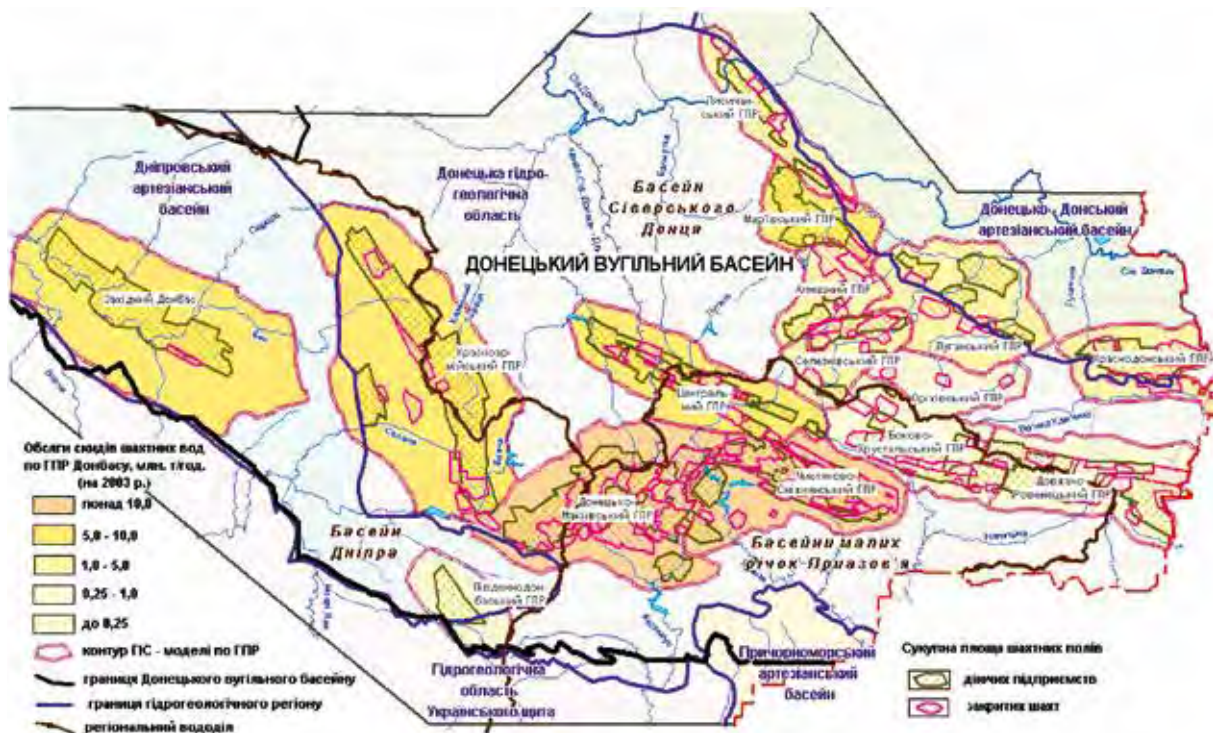


Рисунок 1. Схема розташування басейнів річок Донбасу, що формують ресурс поверхневих вод та прогнольні обсяги скиду в них шахтних вод

Досить значну роль у живленні річкового стоку відіграють дренажні (шахтні) води. Загальна кількість скидів цих вод у поверхневі водотоки за станом на 1995 р. складала біля 25 м³/с [4, с. 178–182], а на сучасний період (за розрахунками авторів) – 24,2 м³/с або 87,0 тис.м³/год. (табл. 1).

Слід зазначити, що промислові об'єкти, розташовані у Донбасі, скидають в річки близько 70 м³/с (252 м³/год.). При цьому для житлово-побутового і промислового використання з річок забирається відповідно біля 39 м³/с (140 м³/год.) за даними [3, с. 68–72].

Визначення впливу вугледобувних підприємств на формування еколого-ресурсних параметрів поверхневого стоку базувалося на зіставленні природних показників режиму річок в не порушеному стані з такими показниками в умовах техногенного впливу.

Проте вирішення цього завдання ускладнювалося такими обставинами:

1. Розробка вугільних родовищ в Донбасі, яка супроводжувалася осушенням гірничого масиву і масштабним скидом дренажних вод у поверхневі водотоки, почалася понад 130 років тому. Водночас системне вивчення гідрологічного режиму річок Донбасу започатковано лише у другій поло-

вині 40-х років минулого сторіччя, тобто на той час техногенна складова вже існувала і жодних спроб виділити і оцінити її не було зроблено.

2. Відсутні багаторічні системні дані щодо обсягів скидів шахтних вод у річки. Для річок Донбасу характерний надзвичайно великий діапазон значень витрат у різні періоди року. При такому діапазоні витрат питання зіставлення є досить складним, оскільки в період повені вплив скиду шахтних вод може бути незначним, а в межений – визначальним. Тому для зіставлень можуть бути використані лише середньобаторічні витрати річок, або витрати 50% забезпеченості.

3. Для річок Донбасу, особливо Приазов'я, характерний природний широкий діапазон вмісту розчинних солей.

Мінералізація води в них змінюється від (0,2-0,3) г/дм³ в період водопілля до (3,5-5,0) г/дм³ в межень. При мінералізації шахтних вод переважно (2,0-4,0) г/дм³ їх скид у поверхневі водотоки може мати як негативний, так і позитивний ефект.

У Донбасі є велика кількість підприємств з водомісткими технологіями і значними обсягами скидів, що втричі перевищує обсяги скидів шахтних вод (з промислово-міських агломерацій скидалося до 70 м³/с або 252 тис. м³/год.).

Масштаби вугледобувних робіт по основних річкових басейнах Донбасу (станом на 2012-2013 рр.)

Річкові басейни Донбасу I порядку		Площа впливу шахтних полів, тис. км ²	Обсяги скиду шахтних вод (за 2012 р.), тис. м ³ /год.	Видобуток вугілля р. (за 2013 р.), млн млн. т/рік	Всього шахт з водовідливом: діючих/закритих	Модуль скиду шахтних вод, м ³ /год.на км ²
Басейн р.Дніпро-Самара		1,59	14,70	18,17	31 / 4	0,8
Басейн р.Сіверський Донець		2,29	30,18	18,09	65 / 29	1,1
Малі річки Приазов'я	Кальміус	0,64	11,63	6,04	18 / 9	1,7
	Міус	1,50	30,46	9,67	69 / 18	1,8
Загалом по Донбасу		6,02	86,97	51,96	183 / 61	1,3

Для забезпечення житлово-комунальних потреб з 1958 року каналом Сіверський Донець – Донбас подавалося до 35 м³/с води, а з початку вісімдесятих років минулого століття – до 45 м³/с води каналом Дніпро-Донбас.

Після використання цієї води і незворотних технологічних втрат значна її кількість скидається у річки, цілком змінюючи витратну частину річкового стоку. На жаль, всі існуючі гідрологічні довідники не враховують цих обставин [13, с. 511–518]. В них наведені лише результати обробки багаторічних матеріалів без вилучення техногенної складової живлення.

Зазначені обставини дещо знижують достовірність проведених оцінок, проте навіть на тлі їх прояву у багатьох випадках вплив підприємств вугледобувного комплексу на формування поверхневого стоку є показовим.

3. Еколого-ресурсний стан підземних вод Донбасу.

В регіональному плані умови накопичення ресурсів і формування якості підземних вод Донбасу є складними і різноманітними.

Специфіка гідрогеологічних умов різних зон Донецької і Луганської областей на сучасному етапі формування є результатом складної взаємодії геологічних (склад водоносних порід, їх розчинність та ін.), фізико-географічних (кількість опадів, розвиток річкової мережі, клімат та ін.)

та, в останні десятиріччя техногенних (дренування шахтами, кар'єрами, водозаборами, інфільтрація техногенних забруднень та ін.) чинників.

В той же час слід відмітити окремі регіональні закономірності у розповсюдженні підземних вод, їх ресурсів та якості.

Так в зонах неглибокого і відкритого залягання вугленосних порід («відкритий Донбас – центральна і східна частини Донецької та південно-західна частина Луганської областей») характерними є розвиток тріщинувато-пористих вод з достатньою промитістю водоносних порід до глибини 100-200 м.

Північні регіони Донецької і Луганської областей мають гідрогеологічну структуру артезіанського басейну з поверховим розвитком водоносних горизонтів у пухких осадових породах.

При цьому нижні горизонти (3-й, 4-й від поверхні) вміщують мінералізовані (солоні) води, які обумовлюють підвищений вміст солей у шахтних водах і їх забруднюючий вплив на річки, джерела, колодязі та перший від поверхні ґрунтовий водоносний горизонт.

Підземні води зустрічаються у всіх стратиграфічних комплексах порід. Дніпровський та Дніпровсько-Донецький (з Донецько-Донським) артезіанські басейни багаті на прісні підземні води, які формуються у мезо-кайнозойських відкладах. У Донецькій гідрогеологічній складчастій області

Таблиця 2

Сукупні дані про вугледобувне навантаження по гідрогеологічних областяхі басейнах (на 1.01.2014 р.)

Гідрогеологічні області, артезіанські басейни (АБ)	Площа, км ²			
	регіону	шахтних полів	міст, смт	міст, смт на шахтах
Донецька складчаста область	22 963	4 219	2272	963,9
Дніпровський АБ	8 743	649	114,9	14,3
Дніпровсько-Донський АБ	311	-	-	-
Донецько-Донський АБ	4 343	28	281,5	21,9
Гідрогеологічна область УЩ	3 931	-	48,5	-
Причорноморський АБ	789	-	12,2	-
Всього	41 080	4 896	2729	1 000,1

в межах поширення палеозойського складчастого комплексу метаморфізованих осадових порід (від девону до початку мезозою) запаси підземних вод приурочені до водоносних комплексів юрських, тріасових, нижньопермських і кам'яновугільних відкладів (див. рис. 1., табл. 2).

Головними природно-техногенними факторами формування ресурсів прісних підземних вод в межах басейнів підземних вод Донбасу та їх взаємодії з поверхневим стоком у сучасних природно-техногенних умовах є специфіка структурно-тектонічної будови, розчленування рельєфу для зон активного водообміну з урахуванням водозбірних площ і границь геологічних структур для зон уповільненого водообміну та вплив шахтного водовідливу на формування депресійних лійок і скидів у річковий стік р.р. Сіверського Донцю, Лугані, Кальміусу та ін.

Прогнозні ресурси підземних вод питної якості у Донецькій області дорівнюють 2,4 млн. м³/добу, в т.ч. розвіданих із затвердженням запасів 1,1 млн.м³/добу (115 ділянок); на сучасний період загальний підземний водовідбір сягає 0,34 млн.м³/добу або 14% від загальної кількості прогнозних ресурсів.

Епізодичні забруднення природними сполуками відмічалось у 2015 році на 34 водозаборах (збільшення сухого залишку, жорсткості, сульфатів, хлоридів, заліза, марганцю).

Луганська область відноситься до найбільш забезпечених прогнозними ресурсами прісних підземних вод (4,8 млн.м³/добу) та їх розвіданістю (98 ділянок із запасами 1,9 млн.м³/добу або 40%). Забруднення відмічалось у 2015 р. на 12 водозаборах (сухий залишок, жорсткість, залізо, марганець, нітрати, феноли, амоній).

Зменшення забруднення обумовлено більшою захищеністю внаслідок наявності регіональних водотривів (слабо проникних шарів).

В цілому більшість районів Донецької і Луганської областей мають значний резерв розвіданих і перспективних ділянок підземних вод питної якості, які доцільно підготувати для експлуатації як резервні або базові водопункти на період порушення водоподачі комплексом «ВД» переважно незахищених від забруднення поверхневих вод внаслідок негативної дії:

- чинників БД;
- витоків забруднених вод із численних шахт що затоплюються;
- можливих надходжень забруднень з ділянок підтоплення та затоплення полігонів відходів, при повенях, підвищених опадах, не санкціонованих скидах у питно-господарські водосховища та інші поверхневі водні об'єкти у басейні р. Сіверський Донець та його притоків.

У більшості вуглепромислових районів Донбасу постійно відчувався гострий дефіцит у во-

допостачанні (господарсько-питному, технічному та для інших цілей) при одночасному скиданні великої кількості шахтних вод у річки та водойми.

В регіональному плані в той же час Донбас загалом забезпечений ресурсами та експлуатаційними запасами підземних вод. Так, за даними ДНВП «Геоінформ» до початку військових дій в межах Східного Донбасу (Луганська область) з експлуатаційних запасів підземних вод (ЕЗПВ) в обсязі 1832 тис. м³/добу в даний час використовується для водопостачання близько 27%, а в межах Південно-Західного Донбасу для цих цілей використовувалось близько 12%. При цьому цьому прогнозі ресурси підземних вод використовують відповідно на 25 і 36%.

Водно-ресурсна ситуація в регіоні ускладнюється внаслідок того, що експлуатаційні водоносні горизонти із зазначеними ресурсами та експлуатаційними запасами підземних вод розташовані по периферії вуглепромислової частини Донбасу, що практично виключає ризик їх забруднення внаслідок затоплення шахт та регіонального підйому рівня мінералізованих шахтних вод. Тому споживачам з числа розосереджених у вуглепромисловій зоні Донбасу, що потребують питної води, у ряді вуглепромислових районів Донбасу у сучасних умовах бойових дій представляється нереальним підключитись до них через істотні фінансові та матеріальні витрати. У зв'язку з цим уявляється можливим використання окремих шахт з невисокою мінералізацією шахтних вод як індивідуальних місцевих джерел водопостачання, особливо промисловими підприємствами. Попередній виконаний експертний аналіз, що це може стосуватися значної частини міст і селищ вуглепромислової зони Донбасу, які мають дефіцит у водопостачанні.

До початку бойових дій для вирішення цих актуальних питань на Донбасі проводились окремі роботи (іноді до відповідних обласних соціальних програм) До цих робіт на договірних засадах залучались територіальні геологічні організації, що функціонували у Донбасі. Зокрема, ДРГП «Донбасгеологія» у 2002 р. підготувало Кадастр шахт із шахтною водою, придатною для господарсько-питного водопостачання без попередньої демінералізації по Центральному та Чистяково-Сніжнянському вуглепромислових районах Донецької області, але у цих матеріалах не

враховано сучасний вплив затоплення більшої частини шахт. Схід ДРГП Луганськгеологія проводило, починаючи з 2005 р., роботи по південних районах Луганської області з метою оцінки можливості використання шахтних вод, що відкачуються із закритих шахт, як перспективного джерела господарсько-питного водопостачання низки міст (Брянка, Кіровськ, Свердловськ, Ровеньки), які за довоєнних часів мали гострий дефіцит у питно-господарському водопостачанні. У результаті проведення першого етапу робіт було виділено як перспективні закриті шахти ім. Войкова. «Ворошилівська» та інші, води яких, що відкачувалися, після доочищення та відповідної технологічної підготовки могли бути використані для покриття дефіциту питного водопостачання міст Свердловськ, Ровеньки та прилеглих населених пунктів.

Сумарний обсяг шахтних вод, що відкачувалися на поверхню, по всіх водовідливних системах шахт (станом на 2008 р.) орієнтовно становив 71,2 тис. м³/год (1709 тис. м³/добу).

Для шахт басейну у період інтенсивного видобутку вугілля (до 1995 р.) характерні такі були такі водопритоки (м³/год): менше 100 – 59%; 100-300 – 37%; 300-500 – 37%; 500-1000 – 20%; понад 1000 – 6% шахт [14, с. 139–147].

Ці показники водопритоку значно зменшилися у міру виведення з експлуатації шахт та інших причин як з окремих вуглепромислових районів, так і в межах більшості міст та селищ регіону. Необхідно відмітити, що до початку бойових дій водопритоки у шахти змінювалися у великому інтервалі від від 20 до 40 разів.

В регіональному плані скидні шахтні води у басейні на період початку масового затоплення шахт та бойових дій мали різноманітний хімічний склад. Вміст розчинних солей у цих водах змінюється в широких межах, що підтверджується мінералізацією вод (від 1 до 30,0–35,5 г/дм³). Відповідно до діючих на той час галузевих стандартів ці води за величиною мінералізації поділялися на три групи: прісні, солонуваті та солоні. При цьому в Донбасі переважали підгрупи слабо- і помірно солонуватих вод, території розповсюдження яких за умови масового затоплення шахт і бойових дій знаходяться в умовах активної зміни, щовимагає відповідних оцінок та прогнозу на повоєнний період.

Загалом на Донеччині через дефіцит прісних вод для різних споживачів довгий період широко використовувалися поверхневі, підземні, а іноді й шахтні води з мінералізацією до 3 г/дм³. Виконаний попередній аналіз свідчать про те, що шахтні води, що відкачуються останні десятиріччя на поверхню, з мінералізацією до 3 г/дм³ в басейні формували більшу частину (близько 75%) від загального їх обсягу, рівну 1530 тис. м³/добу. Це свідчить про істотні резерви і можливості їх використання для водопостачання шахтних вод, які в умовах затоплення шахт та зменшення глибин будуть знижувати свою мінералізацію значною мірою це може бути пов'язано з водонасиченням природної і техногенної тріщинуватості (150-250 метрів) та регіональним формуванням техногенного водоносного горизонту в зоні техногенного водообміну.

Слід зазначити, що частка цих вод у загальному обсязі шахтних вод, що відкачувалося на поверхню, в різних частинах басейну були суттєво неоднакові. Так, для Східного Донбасу (Луганська область) вона становить понад 80% (520 тис. м³/добу), Південно-Західного Донбасу (Донецька область) – 72% (700 тис. м³/добу).

В повоєнних умовах на нашу думку основними критеріями придатності шахтних вод у якості джерел для господарсько-питного водопостачання повинні бути удосконалені нормативні документами з розширеними показниками: мінералізація (сухий залишок), жорсткість (загальна), вміст сульфатів, хлоридів, забруднюючих речовин (хімічних, органічних), рН, санітарно-епідеміологічні, а також оцінки забруднюючих продуктів бойових дій (хімічні, радіаційні, біологічні та інші). Також потрібне буде удосконалення методики організації зон санітарної охорони водних об'єктів шахт, використання технологій очищення, знезараження, водопідготовки шахтних вод та апаратного забезпечення відповідно до вимог стандартів на рівні розвинутих країн ЄС.

На нашу думку особливу цінність для водопостачання окремих районів Донбасу можуть становити шахтні води з мінералізацією до 1,5 г/дм³, а за їх відсутності також із мінералізацією від 1,5 до 2,0 г/дм³. Ці води після доочищення, знезараження та відповідної технологічної підготовки, а з мінералізацією 1,5–2,0 г/дм³ та незначного доопреснення, можуть бути успішно використані

для покриття дефіциту господарсько-питного водопостачання значної кількості населених пунктів та промислових підприємств.

Про це свідчить виконаний аналіз даних щодо початку БД становив сумарний обсяг скидних шахтних вод у басейні становив: з мінералізацією до 1,5 г/дм³ ~ 120,3 тис. м³/добу (в т. ч. по Луганській області 77,2 та Донецькій – 43,0 тис. м³/добу), а з мінералізацією 1,5-5,3 г/дм³. (У т. ч. по Луганській області 101,5 та Донецькій – 253,5 тис. м³/добу).

У Донецькій області цими водами найбільш забезпечені Чистяково-Сніжнянський, Центральний та частково Донецько-Макиївський, а в Луганській – Должанно-Ровенецький, Алмазно-Маріївський та Боково-Кришталевий вуглепромислові райони. Досить високе практичне значення для повоєнного покриття дефіциту водопостачання в Донбасі можуть мати також великі резерви (близько 800 тис. м³/добу) шахтні води з мінералізацією 2–3 г/дм³. Ці води, після спеціальної водопідготовки та знезараження, розведення чистою водою питної якості до мінералізації 1,0–1,5 г/дм³ або після їх демінералізації, можуть бути використані не тільки для технічного, а й господарсько-питного водопостачання.

За попередніми даними, шахтні води з усіх водовідливних систем вугільних шахт на Донбасі вимагали доочищення, хоча й різною мірою. Здебільшого вони не лише за сумарним змістом солей, а й за іншими нормованими показниками (після відповідної доочищення та технологічної підготовки) придатні для господарсько-питних цілей, хоча в ряді випадків і вимагають доочищення хоча й різною мірою.

На сучасному етапі активного затоплення шахт та регіонального підйому рівнів шахтних вод ефективним додатковим джерелом водопостачання на Донбасі можуть бути функціонуючі та закриті шахти з водовідливом, що постійно діє, а в окремих випадках і закриті на «мокру» консервацію шахти за умови забезпечення ними необхідного постійного дебіту води необхідної якості. Зазначені вугільні шахти можуть бути альтернативними джерелами водопостачання. Останні можуть бути приурочені як до одиночних відокремлених шахт, так і до шахт, що мають гідродинамічний та гідравлічний зв'язок із сусідніми (суміжними) шахтами.

Шахти як джерела водопостачання доцільно вибирати з тих, які задовольняють діючим вимогам санітарного стану місць розташування водозабірних споруд та прилеглих територій, якості шахтної води та дебіту альтернативного джерела водопостачання.

На вибраних шахтах, перспективних як джерело водопостачання, необхідне проведення комплексних гідрогеологічних обстежень з метою оцінки екологічної обстановки та вирішення питань створення зон санітарної охорони водних басейнів шахт, а також організація та проведення моніторингових спостережень за зміною техногенної обстановки та зміною кількості та якості шахтних вод на полях шахт та в зоні їх.

При цьому для досліджень якості шахтних вод доцільно використовувати сучасні високоточні методи та прилади з метою виявлення в цих водах високотоксичних мікроелементів та забруднюючих продуктів БД (талій, берилій, кадмій, уран, радій, нафтопродукти та ін.).

При оцінці можливості використання шахтних вод для технічних і технологічних потреб у повоєнний період необхідно буде керуватися удосконаленими вимогами до оцінки ресурсів і якості води до оцінки умов формування, експлуатаційних ресурсів, еколого-гігієнічних параметрів води залежно від характеру її використання на виробництві та в побуті.

Шахтні води Донбасу у довоєнний період характеризувалися незадовільною технічною характеристикою за цілим рядом показників, кількість яких значно збільшилась після регіонального затоплення шахт і початку бойових дій.

Однак виконані попередні оцінки при доочищенні та технологічній підготовці з доведенням до відповідних кондицій можуть бути успішно використані для питно-господарських і технологічних цілей.

При вирішенні проблеми очищення шахтних вод слід враховувати накопичений на Донеччині у довоєнні часи певний досвід використання цих вод, розведених до потрібних кондицій умовно чистими природними водами, для різних технологічних, технічних та побутових потреб. Безперечною економією дефіцитних на Донбасі питних вод може принести заміна їх у повоєнні часи кондиційними шахтними водами для цих потреб. За орієнтовними даними ДРГП «Донецькгеологія»

у період активного шахтного водовідливу загальні витрати питної води на шахтах тільки в Донецькій області, могли бути замінені кондиційною шахтною водою для цих цілей в об'ємі близько 1,9 млн м³/рік (5,2 тис. м³/добу).

При цьому основну економію питної та свіжої технічної води (близько 70 % від загального обсягу) можна отримати при використанні кондиційної шахтної води в системах теплопостачання.

Оцінка перспективності використання шахтних вод для водопостачання, і в першу чергу для господарсько-питних цілей як свідчать виконані оцінки може бути здійснена на основі удосконалених техніко-економічних обґрунтувань різних варіантів очищення та кондиціювання шахтних вод, а також у порівнянні з іншими передбачуваними джерелами водопостачання, при цьому доцільним буде використання досвіду водопостачання у вуглепромислових регіонах розвинутих країн ЄС (Німеччина, Англія, Франція).

Виконаний аналіз свідчить, що на регіональному рівні скидні шахтні води Донбасу можуть становити практичний інтерес і як джерело можливого зрошення.

В цілому позитивне вирішення питання використання шахтних вод в ряді дефіцитних у водопостачанні районів Донбасу може бути досягнуто як за рахунок активного використання шахтних вод разом з резервами експлуатаційних і прогнозних запасів.

Враховуючи недостатню та нерівноцінну вичерненість еколого-гідрогеологічних умов шахтних полів та шахтних вод шахтних вод по території Донбасу, першочерговим завданням є цілеспрямоване довивчення динаміки затоплення шахт в цілому по басейну з першочерговим виділенням вугільних шахт (з числа діючих та закритих), найбільш перспективних як альтернативні джерела водопостачання, з подальшим проведенням на них детальних водно-екологічних досліджень.

В цілому на наш погляд необхідна розробка державної програми забезпечення еколого-ресурсної безпеки Донбасу та прилеглих територій на повоєнний період, в тому числі за фінансової підтримки відповідних установ ЄС.

4. Опис топографо-гідрологічної карти затоплення шахт Донецької та Луганської області.

Загальна характеристика

Представлена карта (див. рис. 2) є комплексним топографо-гідрологічним зображенням території Східної України, з фокусом на Донецьку та Луганську області.

Карта охоплює території Донецької та Луганської областей, з особливим акцентом на гідрогеологічні, топографічні та вугледобуваючі особливості регіону.

Вона інтегрує географічні, гідрогеологічні та геополітичні дані, що дозволяє здійснювати міждисциплінарний аналіз екологічної та техногенної безпеки регіону в умовах військового конфлікту на території розвинутого вуглепромислового регіону.

Основні складові компоненти карти:

I. Гідрологічна мережа:

Річки та притоки: позначені синіми лініями, з чіткою диференціацією основних водних артерій.

Гідрологічні пости (станції): позначені синіми точками, з нумерацією від 1 до 20.

Вказані назви населених пунктів, де розташовані станції моніторингу.

Водокористувачі позначені синіми і фіолетовими кружками: водозабір і водоскид.

Цифри означають номери шахт для яких є інформація станом на червень 2025 року з відмітками висот рівня устя: 1 – Краснокутська;

2 – Княгининська; 3 – Хрустальна; 4 – Краснолучська; 5 – Партизанська; 6 – Центральна-Ірміно; 7 – Голубовська; 8 – Артема; 9 – Перевальська; 10 – Золотое; 11 – Карбоніт; 12 – Горська; 13 – Первомайська; 14 – Родіна; 15 – Кірова; 16 – Словяно-сербська; 17 – Вергелевська; 18 – Ломоватська; 19 – Ніканор-Нова; 20 – Черкаська.

II. Типи землекористування:

Лісові масиви: зелені ділянки.

Сільськогосподарські угіддя: позначені жовтуватими або світло-коричневими тонами.

Урбанізовані зони: сірі або темні ділянки, що вказують на міста та селища.

III. Геополітична ситуація:

Зони військового конфлікту: чітко розмежовані території, контрольовані Україною та російськими угрупованнями (станом на 2014 рік).

Легенда: містить умовні позначення для всіх типів територій, включно з конфліктними зонами.

Наукове та прикладне значення для екологічної безпеки:

Карта є основою для оцінки впливу військових дій на водні ресурси, включно з ризиками забруднення, деградації водозаборів та порушенням гідрологічного режиму річкової мережі, рівневого режиму підземних вод та інженерно-геотехнічної безпеки промагломераций.

Наукове та прикладне значення для техногенної безпеки:

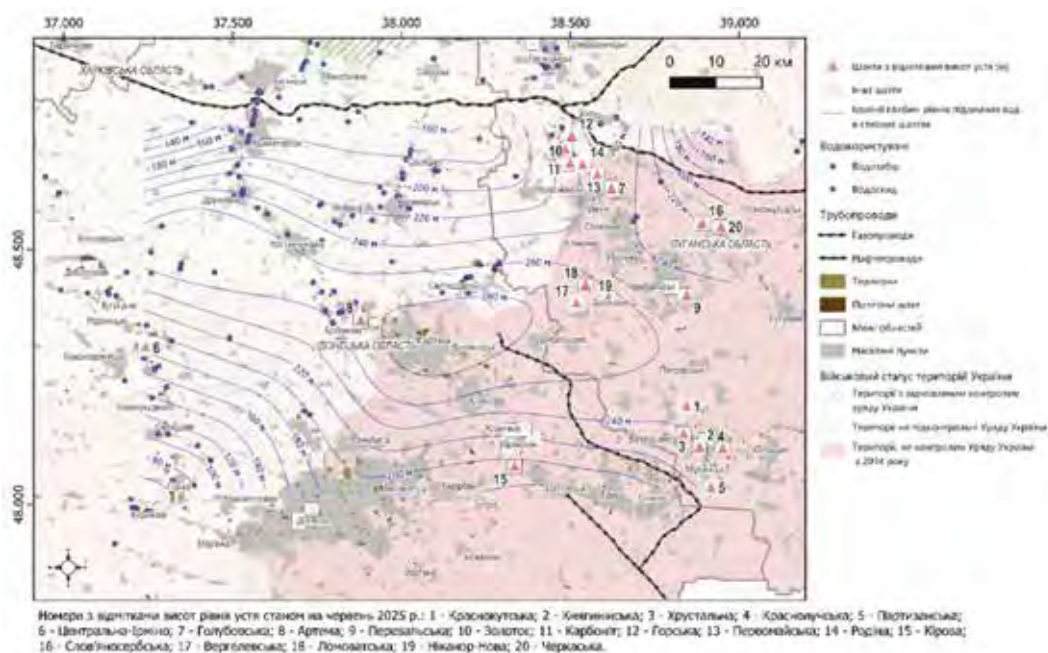


Рисунок 2. Топографо-гідрологічна карта затоплення шахт Донбасу

Додаткові функції

Компонент	Опис
Часова шкала	Перегляд змін висот/стану води у динаміці (за роками, сезонами)
Інтеграція з сенсорами	Підключення до реальних даних (дрони, IoT, метеостанції)
Сценарне моделювання	Побудова моделей підтоплення, забруднення, аварійних ситуацій
Аналітичні панелі	Дашборди з графіками, таблицями, порівняльними матрицями
Експорт та API	Можливість інтеграції з зовнішніми платформами та науковими системами

1. Можливість моделювання сценаріїв аварій на шахтах і водогосподарських об'єктах.

2. Інтеграція з сенсорами, дронами та геоаналітичними платформами для реального часу.

3. Прогнозування підтоплення.

4. Порівняльний аналіз гідрологічних змін у контексті конфлікту.

Потенційні гідрологічні ризики:

Зниження контролю над нижньою течією.

- Нижнє, Ломоватка, Слов'яносербськ – критичні точки нижнього басейну, де можливе накопичення забруднень, порушення режиму стоку та втрати даних.

- Втрата моніторингу: обмежений доступ до гідропостів у зоні конфлікту унеможливує оперативне реагування на гідрологічні зміни.

Ризики забруднення:

- Індустріальні зони (Красний Луч, Первомайськ, Кіровськ) – потенційні джерела техногенного навантаження на водні об'єкти.

- Відсутність екологічного контролю: ускладнює оцінку якості води, особливо в умовах бойових дій.

Порушення гідродинаміки:

- Зміна рельєфу через обстріли/інфраструктурні руйнування може призвести до локальних змін напрямку течії, підтоплень або деградації русел.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведене дослідження підтверджує, що використання шахтних вод Донбасу як альтернативного джерела питно-господарського водопостачання є науково обґрунтованим, технічно здійсненним та перспективним у контексті сучас-

них викликів регіону. Отримані результати дають підстави стверджувати, що трансформація шахтних вод із джерела екологічної небезпеки на стратегічно важливий ресурс здатна суттєво зміцнити водну резильєнтність територій, які перебувають під впливом наслідків військових дій.

Одним із ключових висновків є те, що впровадження багатостадійних технологічних схем водопідготовки – із обов'язковими етапами попереднього очищення та застосування мембранних процесів, таких як зворотний осмос або електродіаліз – забезпечує можливість доведення шахтних вод до показників, що відповідають нормативним вимогам питної води. Технологічна здійсненність таких рішень підтверджується як світовим досвідом, так і результатами аналізу їх потенційної ефективності у специфічних умовах Донбасу.

Економічна оцінка також засвідчує доцільність використання шахтних вод: попри високі початкові витрати на розгортання систем очищення, кінцева вартість підготовленої води виявляється конкурентоспроможною на тлі значних логістичних витрат та ризиків, пов'язаних з іншими джерелами води у воєнний і післявоєнний періоди. Таким чином, запропонований підхід сприяє не лише забезпеченню стійкого водопостачання, а й зменшенню екологічного навантаження на регіон, що відповідає принципам сталого розвитку та екологічної безпеки.

Для повної реалізації потенціалу використання шахтних вод необхідне продовження наукових та практичних робіт за кількома ключовими напрямками. По-перше, потребує розвитку система актуального гідрохімічного моніторингу шахтних вод на контрольованих територіях Донбасу.

Створення детальної бази даних, що відображає зміну складу та обсягів вод у часі, дозволить здійснювати моделювання сценаріїв та оцінювати ризики, зумовлені гідрогеологічними трансформаціями.

По-друге, доцільним є впровадження пілотних модульних установок водопідготовки на базі конкретних шахт. Реальна експлуатація таких систем дасть змогу уточнити технологічні параметри, оцінити довговічність обладнання, оптимізувати витрати та перевірити ефективність теоретично обґрунтованих рішень.

Третім перспективним напрямом є оптимізація методів утилізації високомінералізованих концентратів, що утворюються після мембранного очищення. Особливу цінність має дослідження можливостей вилучення корисних компонентів (зокрема, літію та магнію), що може суттєво зменшити шкідливий вплив на довкілля та підвищити економічну ефективність процесів.

Окремої уваги заслуговує інтеграція систем водопідготовки з відновлюваними джерелами енергії. Дослідження енергоефективності, а також можливостей використання сонячних або вітрових установок для забезпечення автономної роботи модулів очищення, є перспективним кроком до підвищення енергетичної незалежності і стійкості критичної інфраструктури.

У підсумку, подальший розвиток наукових підходів та практичних рішень у сфері використання шахтних вод може стати основою для формування довгострокової, життєстійкої та екологічно безпечної системи водопостачання Донбасу, адаптованої до умов військових загроз та післявоєнної відбудови.

Список використаної літератури

1. Hobbs D., Murray S., Naidoo D. The management of mine water in South Africa: From pollution to a usable resource. *Water SA*. 2018. Vol. 44, No. 4. P. 579–588.
2. El-Din M.S., Al-Ghamdi A., Farahat M. Reverse osmosis membrane technology for water desalination: A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26(36). P. 36153–36173.
3. Заболоцька І.П., Сенаторов В.А. Екологічні аспекти підтоплення вугільних шахт Донбасу. *Екологія і промисловість*. 2010. № 3(50). С. 68–72.
4. Донець О.В., Савенко В.С. Гідрогеологічні та екологічні наслідки затоплення шахт Донбасу. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2014. № 1(225). С. 177–184.
5. Van der Bruggen J.R., Van der Bruggen L., Van der Bruggen J. Electrodialysis for desalination: History, current status, and future trends. *Membranes*. 2020. Vol. 10(7). 164.
6. Wang X., Xu X., Gao W., Gao D. Treatment of coal mine water for reuse: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 290. Article 125191.
7. Li L., Zhang J., Wu Y., Li Y. Pre-treatment technologies for reverse osmosis membrane in wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 45. Article 102462.
8. Brady J., Stewart B., Rosenbaum E. Mine water reuse in Pennsylvania: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 255. 109897.
9. Mishra S., Rout P., Patel P. Treatment and management of mine water in Australian coalfields: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017. Vol. 5(5). P. 5169–5183.
10. Qureshi T., Yasar A. Sustainable management of mine drainage using hybrid membrane processes. *Desalination*. 2020. Vol. 495. 114677.
11. Liu Z., Chen S., Li H. Mine water chemistry evolution in deep mining zones of China. *Hydrogeology Journal*. 2019. Vol. 27(4). P. 1335–1348.
12. Yadav R., Tiwari M. Integrated treatment of mine wastewater using biological and membrane systems. *Water Environment Research*. 2021. Vol. 93(10). P. 2299–2310.
13. Яковлев Є.О., Анпілова Є.С. Еколого-гідрогеологічні особливості шахтних вод Донбасу. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2013. № 3. С. 48–57.
14. Трофимчук О.М., Сплодитель А.І. Гідрохімічний режим шахтних вод Донбасу в умовах техногенних змін. *Екологічна безпека*. 2012. № 1. С. 22–30.
15. USEPA. *Mine Water Treatment Technologies*. U.S. Environmental Protection Agency. 2018. 112 p.