

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННО СПРОВОКОВАНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТЕРИТОРІЙ КАЛУСЬКОГО ГІРНИЧОПРОМИСЛОВОГО РАЙОНУ ГЕОФІЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Метою досліджень є обґрунтування наукових засад комплексного підходу до вирішення еколого-геологічних проблем, що пов'язані з процесами засолення підземних вод на території Калуського гірничопромислового регіону, кількісної оцінки динаміки такого засолення та його зв'язку з річковою системою на основі отриманих даних геохімічних та геофізичних спостережень. Актуальність робіт визначається необхідністю вирішення наступних задач: 1) виявлення джерел забруднення підземних вод; 2) означення територій засолення, у тому числі населених пунктів, у межах яких горизонти питних вод стають непридатними для безпосереднього використання; 3) характеристика динаміки, тобто ступеня засолення та швидкості його змін у просторі й часі; 4) визначення небезпеки для працездатності водозабірних комплексів водопостачання; 5) визначення небезпеки забруднення річкового басейну. Методика полягає у встановленні кореляційного зв'язку між гідрогеохімічними та електрометричними спостереженнями та визначенні закономірності переходу від вимірів електричного опору до мінералізації підземних вод, у створенні просторово-часових моделей динаміки мінералізації підземних вод та оцінці ризиків забруднення поверхневих водотоків з урахуванням основних джерел забруднення і в наданні вихідних даних для прийняття управлінських рішень. За допомогою гідрогеохімічних спостережень (мінералізація ґрунтових вод) та електророзвідувальних робіт (виміри електричного опору) встановлені кореляційні зв'язки між геофізичними характеристиками, притаманними водоносному горизонту, та мінералізацією ґрунтових вод, що в результаті дозволило за даними площинних геофізичних досліджень конкретизувати джерела та окреслити площу та ступінь засолення. За режимними спостереженнями встановлено напрям руху фронту засолення та його швидкість. За отриманими кількісними характеристиками динаміки засолення водоносного горизонту наведено розрахунок ризиків забруднення річок Лімниця та Дністер. Наукова новизна полягає у подальшому розвитку способу оцінки мінералізації підземних вод за результатами геофізичних досліджень, зокрема, методом електророзвідки. Вперше створено просторово-часові моделі динаміки мінералізації підземних вод на території Калуського гірничопромислового району (КГПР). Вперше наведена оцінка ризиків забруднення поверхневих водотоків (рр. Лімниця, Дністер) з урахуванням основних джерел забруднення в межах КГПР. Застосування одержаних результатів дає можливість у стислі терміни дослідити ділянки, що пов'язані з можливими забрудненнями території, надати вихідні дані для подальшого планування та прийняття управлінських дій. Надійний прогноз дозволяє передбачити заходи по зменшенню екологічного навантаження на водоносний горизонт, що є єдиним питним горизонтом для м. Калущ.

Ключові слова: засолення, електричний опір, водоносний горизонт, мінералізація, спостережні свердловини, джерела забруднення, водозабір.

Вступ

Проблема забруднення підземних і поверхневих вод практично завжди повстає на територіях діючих чи відпрацьованих родовищ корисних копалин. У значній мірі це стосується соляних родовищ, де забруднення підземних водоносних горизонтів та поверхневих ландшафтних елементів і морфологічних форм інтенсифікується за рахунок розчинення кам'яної або калійної солі. У якості забруднювачів можуть розглядатись розсоли підземних виробок і кар'єрів, солевідвали, хвостосховища, акумулюючі ємності та інше. Тривіальним методом оцінки забруднення підземних вод є відбір проб із спостережних свердловин, водойм, водотоків з подальшим лабораторним визначенням

загальної мінералізації та поелементним аналізом. Режимні спостереження рівнів підземних вод дозволяють при цьому встановлювати шляхи та швидкість міграції забруднюючих речовин.

Останнім часом у якості методів визначення засолення підземних вод активно залучаються геофізичні дослідження. Завдяки останнім виконується оперативна експертна оцінка ступеня засолення з деталізацією його диференціації завдяки можливості використання щільної сітки геофізичних спостережень при наявності окремих параметричних свердловин.

У цілому автори статті ставлять перед собою задачу обґрунтування наукових засад комплексного підходу до визначення ділянок засолення підземних вод на конкретному об'єкті, кількісної

оцінки динаміки такого засолення та його зв'язку з річною системою на основі аналізу та узагальнення літературних даних і результатів власних спостережень авторів. При цьому акцентується доцільність залучення до комплексу геофізичних досліджень. З практичної точки зору актуальність робіт визначається необхідністю вирішення наступних задач: 1) виявлення джерел забруднення підземних вод; 2) означення територій засолення, у тому числі населених пунктів, у межах яких горизонти питних вод стають непридатними для безпосереднього використання; 3) характеристика динаміки, тобто ступеня засолення та швидкості його змін у просторі й часі; 4) визначення небезпеки для працездатності водозабірних комплексів водопостачання; 5) визначення небезпеки забруднення річкового басейну.

Огляд літературних джерел за напрямком досліджень (стан проблеми)

Розгляд еколого-геологічних питань експлуатації соляних родовищ у Світі в основному пов'язаний з особливостями розвитку й активізації карстових процесів на ділянках видобування. Усього у світовій практиці за весь період діяльності підземного солевидобування зафіксовано більше 80 випадків аварійної загибелі рудників [Павлюк, 2011; Гайдін, Рудько, 2016]. Прикладом можуть слугувати масштабні аварії в Конго (1977), Росії (Соль-Ілецк, 1983, 2010; Солікамськ, 1995; Березняки, 2007), Німеччині (Роненберг, 1976), Україні (Стебник, 2017, Солотвино, 2008, 2012) та інших країнах світу. Зрозуміло, що карстові явища завжди пов'язані з діяльністю підземних вод, про що і йдеться в цьому дослідженні. У зв'язку з тим, що засолення вивчається у значно ширшій сфері, ніж при розробці соляних родовищ, звернемось до відповідної палітри наукових праць. При цьому в першу чергу звернемось до публікацій, у яких висвітлюються геофізичні методи дослідження карсту та забруднення підземних вод завдяки розвитку природно-техногенного карсту. Згідно з огляду літературних даних, одним з перших обґрунтував і практично довів можливість дослідження карстових явищ і, зокрема, оцінки мінералізації підземних вод за даними геофізики (електророзвідки) російський учений О. О. Огільві у відомій монографії «Геофізика карсту», 1956. Далі ці роботи розвинені в працях інших радянських дослідників, про що зазначено у фундаментальних монографіях [Кобранова, 1962; Мелькановицкий и др., 1982; Методы..., 1985; Ляховицкий и др., 1989]. Потужні дослідження в зазначеному напрямку проводили польські геофізики. Зокрема в роботі [Bialostocki, et al., 2007] у розділі “застосування методу електроопорового в геології та охороні середовища” наводиться класифікаційна таблиця, у якій серед задач формулюється визначення ступеня мінералізації підземних вод. У [Bialostocki, et al., 2008] ця задача

розвинута до “ідентифікації зон забруднення на підставі безпосередніх вимірів у випадку аномального зниження електричного опору, можливо спираючись на циклічні виміри в моніторинговій системі”. У роботах [Bialostocki, et al., 2006, Pacanowski et al. 2014; Sappa, 2012; Oyedele, 2009; Jansen, 2011; Hamdan, et al., 2010; Paine, et al., 2012] розглядаються питання та наводяться приклади ефективного картування засолення геофізичними методами, а саме методами опору та електромагнітної індукції в прибережних зонах на території Каліфорнії (США), Нігерії, Єгипту, Італії, при цьому зазначається добра кореляція вимірів загальної мінералізації та питомого опору, а також результативність комплексування методу опорів у модифікації вертикальних електричних зондувань, сейсмометрії та електричної томографії для візуалізації зон засолення в карстових утвореннях.

Подібних джерел у світовій літературі доволі багато, і перераховувати всі неможливо. Надалі зупинимось більш детально на аналізі монографій, у яких на кількісному рівні демонструється можливість отримання характеристик водних властивостей широкого діапазону гірських порід при сумісних гідрогеологічних роботах, з одного боку, та електрометричних – з другого.

При цьому зупинимось на зв'язку мінералізації підземних вод та електричного опору гірських порід, насичених водними розчинами. Для ілюстрації такого зв'язку розглянемо модельні та практичні залежності розподілу питомого електричного опору ρ від мінералізації води M : $\rho = f(M)$.

У монографії [Кобранова, 1962] представлено сімейство залежностей для водних розчинів. З їх розгляду випливає важливий висновок про відмінність залежностей $\rho = f(M)$ для різного складу розчинів і відповідно – для різних літологічних різновидів гірських порід, яким у певній мірі притаманні підземні води того чи іншого складу.

Тобто, за наведеними графіками можна визначити концентрацію солей за електричним опором при одній умові – заздалегідь відомому хімічному складу підземних вод. У реальних умовах досліджень така вимога є нездійсненною.

У роботі [Методы..., 1985] наводяться графіки оцінки залежності мінералізації від електричного опору в умовах галькових і пісчано-глинистих розрізів. З розгляду графіків випливає, що лише при невеликих мінералізаціях ($M < 10 \text{ г/л}$) літологія впливає на електричний позірний опір гірських порід. За більших значень M саме мінералізація надає основного впливу на їхній позірний опір незалежно від літології. Ці графіки отримані в лабораторних умовах, а виміри проведені в імітованих свердловинах з ідеальним сортуванням гірських порід, чого в природі не буває. Реальні кореляційні залежності $\rho = f(M)$ для різних ра-

йонів колишнього Радянського Союзу і для різних літологічних складових, які отримані за геофізичними вимірюваннями в польових умовах наводяться у монографії [Мелькановицький и др., 1982]. Вони достатньо однотипні і в білогарифмічному масштабі можуть бути представлені в першому наближенні сімейством прямих ліній, що перетинаються під кутом біля 45 до осей координат: а саме: $\lg M = \lg A - \lg \rho$, де $\lg A$ – постійна величина, яка визначається літологічним складом порід.

На основі візуального аналізу цих залежностей можна зробити такі висновки: 1) для кожної окремої території та кожного окремого літологічного комплексу гірських порід потрібно шукати присутні для цієї території кореляційні зв'язки між електричним опором водоносних горизонтів та мінералізацією підземних вод; 2) оскільки комбінація іонного складу підземних вод і літології є непередбачуваною, не варто очікувати однакових залежностей для однакових за літологією порід; 3) критерієм достовірності кореляційних графіків є їх належність до сімейства субпаралельних прямих, що мають кут нахилу близький до 45 при оцифровці осей координат у логарифмічному масштабі. На закінчення літературного огляду відмітимо, що в Україні, де працюють автори статті, використання геофізичних методів для картування водоносних горизонтів за мінералізацією є обмеженим, принаймні в останні роки спостерігаємо нечисленні наукові роботи, наприклад [Онищук, 2005, Дешиця та ін, 2014, Шуровський та ін., 2012, Багрій та ін., 2013, Онищук, 2006, 2010].

Мета

Метою досліджень є застосування наукових засад комплексного підходу до вирішення еколого-геологічних проблем, що пов'язані з процесами засолення підземних вод на території Калуського гірничопромислового регіону, кількісної оцінки динаміки такого засолення та його зв'язку з річковою системою на основі отриманих даних геохімічних та геофізичних спостережень.

Цільовою задачею подальших досліджень, наведених у статті, є, по-перше, виявлення питання, чи спрацює наведена методика визначення засолення підземних вод за розподілом електричних параметрів у специфічних умовах соляних родовищ, по-друге, який вигляд мають емпіричні залежності і, по-третє, як ці залежності можна використати в практичних цілях.

Відповідно до сказаного, подальші дослідження наводяться в такій послідовності: характеристика об'єкта досліджень, еколого-геологічні проблеми, геологічна та гідрогеологічна характеристика території, характеристика водозабірних споруд, геоморфологія, рівні та напрямки підземних вод, оцінки засолення водоносного горизонту, кореляційні зв'язки між засоленням та геофізичними параметрами, інформативність карт засолен-

ня побудованих за даними методу ВЕЗ, аналіз динаміки засолення підземних вод за даними режимних спостережень, загроза забруднення басейну річки Дністер.

Характеристика об'єкта досліджень

У якості об'єкта досліджень розглядаються процеси забруднення підземних та поверхневих вод території Калуського гірничопромислового району (КГПР), розташованого в межах гірничих відводів рудників найбільшого за запасами сировини в Карпатському регіоні України Калуш-Голинського родовища калійної солі (рис. 1). Територія досліджень приурочена до Передкарпатської низовини, поверхня якої представляє плоску рівнину. Основна частина території, що описується, знаходиться в межах Калуської котловини з акумулятивно-рівнинним рельєфом. Вона охоплює долину річки Лімниця з її притоками, які відносяться до басейну р. Дністер.

На території КГПР розглядаються наступні основні промислові комплекси.

Домбровський кар'єр. Період експлуатації 1967–2003 рр. За цей час з кар'єру видобуто 35,4 млн м³ розкритих порід і 14,7 млн м³ калійної руди, разом 50,1 млн м³ гірничої маси. Кар'єр самозатоплюється із середньою швидкістю приблизно 2,5 млн м³ на рік. Сьогодні в кар'єрі зосереджено біля 32 млн м³ розсолів. Абсолютна позначка берега кар'єру біля 300 м, максимальна глибина від земної поверхні – 92 м. Абсолютна позначка поверхні розсолів по стану на 2021 рік – 284,5 м. Мінералізація розсолів – від 10–20 г/дм³ у приповерхневій частині до 400–430 г/дм³ у придонній.

Рудник “Калуш”. Період експлуатації 1967–1978 рр. Поділяється на чотири шахтні поля: Північне сильвінітове, Північне каїнітове, Центральне каїнітове, Хотінське сильвінітове. Глибина розробок шахтних полів відповідно 160–440 м, 100–260 м, 60 – 250 м, 140–270 м. Загальний об'єм порожнин рудника “Калуш” – 7,4 млн м³. Порожнини були закладені твердим матеріалом (92,5 % усього об'єму) на трьох шахтних полях, або залишились сухими – на шахтному полі «Хотінь» (7,5 % об'єму).

Рудник “Ново-Голинь”. Період експлуатації 1966–1995 рр. Поділяється на два шахтні поля: “Східна Голинь” і “Сівка-Калуська”. Глибина розробки 66–270 м. Загальний об'єм порожнин 12,6 млн м³. Більшість порожнин рудника (96 %) заповнені недонасиченими (приблизно 250 г/л) розсолами.

Рудник “Голинь”. Період експлуатації 1930–1972 рр. Глибина розробки 70–250 м. Загальний об'єм порожнин 1,7 млн м³. Рудник законсервовано в сухому стані.

Отже, всього по трьох рудниках налічується 21,7 млн м³ пустот – затоплених, закладених твердим матеріалом або сухих. Під час експлуатації кар'єру та рудників як допоміжні об'єкти виробництва утворені солевідвали, хвостосховища та акумулюючі ємності.

Солевідвали, хвостосховища та акумулюючі ємності. У двох солевідвалах закладовані в основному розкриті породи кар'єру. Складаються із піщано-глинистих порід зі значним вмістом (до 30 %) хлориду натрію. У солевідвалі № 1, площа якого дорівнює 0,48 км², міститься 11,3 млн м³ порід. Висота відвалу 55 м. Рекультивовано 0,035 км². У солевідвалі № 4, площа якого дорівнює 0,39 км², міститься 7,4 млн м³ порід. Висота відвалу 30 м. Рекультивовано 0,341 км².

Хвостосховища є штучно спорудженими ємностями для накопичення так званих “хвостів” невикористаних високомінералізованих вод. На хвостосховищі № 1, площа якого становить 0,54 км², закладовані галітові відходи об'ємом 12–14 млн м³. Хвостосховище частково рекультивоване шляхом покриття поверхні шаром суглинку та гіпсо-глинистої породи товщиною 1,5 м. Хвостосховище № 2 площею 0,48 км² заповнено так: тверда фаза – 9 млн м³, рідка – 1,7 млн м³.

Хвостосховище № 3, залишилось у стадії будівництва і налічує 0,25 млн м³ розсолів. Борти всіх хвостосховищ піднімаються над поверхнею землі. Середня мінералізація розсолів – 40 г/л.

Акумулюючі ємності № 1 і № 2 – аналог хвостосховищ малих розмірів із загальним вмістом розсолів 0,4 млн м³.

Еколого геологічні проблеми Калуського гірничопромислового району

Територія, що прилягає до Домбровського кар'єру. Проблема Домбровського кар'єру полягає в його неперервному наповненні розсолами. За середньорічної норми опадів у 700 мм та випаровуваності 40 % рівень води в кар'єрі повинен щорічно підніматись на 450 мм. Крім того, водні розчини потрапляють у кар'єр за рахунок фільтрації приповерхневих підземних вод. Тому, наприклад, за останні 5 років рівень розсолів в кар'єрі піднявся на 8 метрів. Абсолютні відмітки підошви четвертинного алювіального горизонту по периметру кар'єра коливається межах 278,6–282,1 м. Отже, при рівні розсолів на початок 2021 року – позначка 284,5 м незначна частина об'єму розсолів кар'єру фільтрується через його борт у водоносний алювіальний горизонт, спричиняючи його забруднення. З кожним роком величина фільтраційного потоку з кар'єру буде збільшуватись. Процес буде продовжуватись до повної рівноваги об'ємів води, поступаючої та випливаючої з кар'єру. За попередніми оцінками цей баланс встановиться для відмітки розсолів у кар'єрі приблизно +295 м, тобто приблизно через 15–20 років. На той час водний розчин у приповерхневих шарах знач-

но опрісниться. Але ще певний час кар'єр буде слугувати джерелом забруднення підземних вод. Фільтрація з кар'єру в першу чергу буде відбуватись у східному, південно-східному та південному напрямку з подальшим рухом води в напрямку дрени, тобто в напрямку р. Лімниця.

Територія навколо солевідвалів, хвостосховищ та акумулюючих ємностей. Солевідвали недостатньо захищені від природних опадів, які розчиняють галіти та надалі інфільтруються у водоносний горизонт. За звітними оцінками солевідвали під час їх розмиву утворюють понад 345 тис. м³ розсолів щороку. Борти хвостосховищ та акумулюючих ємностей фільтрують накопичені в них розсоли, які також прямують у водоносний горизонт. При стабільному рівні розсолів у хвостосховищах за нашими оцінками з урахуванням опадів та природного випаровування хвостосховища щороку втрачають близько 0,6 млн м³ розсолів. Для хвостосховища № 2 існує небезпека прориву дамби та раптового скиду в річковий басейн 1,7 млн м³ розсолів, що було б катастрофою. Отже, екологічна небезпека означеної території полягає в засоленні прилеглого горизонту підземних вод, подальшому руху цих вод у природному південно-східному напрямку та забрудненні річкової системи басейну р. Дністер. Окрім того, забруднення водоносного горизонту загрожує функціонуванню водозабірних споруд, які постачають питну воду в місто Калуш (70 тис. населення).

Геологічна та гідрогеологічна характеристика території

Територія, що розглядається, розташована в Самбірській підзоні Передкарпатського прогину. У будові цієї великої структурної одиниці приймають участь утворення міоценового відділу неогену, при цьому калійні солі відносяться до нижнього тортона. Основу складають платформені юрські, зрідка крейдові поклади. Основною рисою тектоніки є наявність довгих лінійних структур, насунутих одна на одну, які простягаються в основному у Карпатському напрямку (в Україні) – із північного заходу на південний схід. Численні поперечні порушення, що розсікають підзону, виникли в результаті горизонтальних і вертикальних переміщень при формуванні насувів. Змішані сульфатно-хлоридні солі залягають у вигляді окремих пластів і складок на значних глибинах у соленосних відкладах, здебільшого брекчій. Усі зазначені вище корінні породи не містять витриманих водоносних горизонтів, які були б придатні до водопостачання.

Практичне значення для водопостачання мають водоносні відклади четвертинного віку. Води цих відкладів придатні для пиття і в районі водозаборів по берегах р. Лімниця та на прилеглих площах представлені делювіальними та алювіальними утвореннями.

Алювіальні відклади складають давні тераси р. Лімниця. У межах території досліджень розповсюджені породи сучасної та надзаплавних терас. За літологією це галечники, піски, супіски, суглинки з перевагою галькового матеріалу у більш молодих відкладах. Потужність горизонту від 3–5 до 12–18 м, глибина залягання 3–7 м, коефіцієнт фільтрації – до 10 м/добу [Гайдін, Рудько, 2016].

Характеристика водозабірних споруд. Питання щодо водозабірних споруд розглядається у зв'язку із гіпотетичною небезпекою забруднення підземних вод, що використовуються для водопостачання. Основним для водопостачання міста Калуш є Добрівлянський водозбір (рис. 2). Він налічує 64 свердловини та знаходиться в декількох кілометрах на південний захід від м. Калуш на лівому березі р. Лімниця. Експлуатується водонесний горизонт у межах заплави, яка простягається із заходу на схід у вигляді смуги шириною від 0,3 до 0,8 км уздовж течії р. Лімниця. Довжина ряду свердловин водозбору 3840 м. Щодо усталеного рівня підземних вод, переважають глибини 1,0–2,4 м. Потужність водонесної частини горизонту дорівнює 5,4 м.

Водонесний горизонт має прямий гідравлічний зв'язок з рікою і водонесним горизонтом четвертинних відкладів. Граничні умови ділянки водозбору схематизуються як напівобмежений пласт з контуром постійного напору – річкою, яка знаходиться на відстані від 2–3 до 300 м від ряду свердловин. Водозбір працює в умовах усталеного режиму фільтрації за зниження рівня менше допустимого. Спостережних свердловин для відслідковування депресійної лійки і, відповідно, радіусу впливу роботи водозбору не існує. Регулярні спостереження за рівнями в експлуатаційних свердловинах не ведуться. Відстань від свердловини водозбору до найближчих свердловин регіональної режимної спостережної сітки в межах гірничопромислового району сягає близько 200 м.

Специфікою спорудження водозбору є введення в дію підживлюваної траншеї довжиною 3,4 км, шириною 2,5–3 м і глибиною 1,5–2 м. У підживлювальних траншеях застосовано метод самостійної інфільтрації.

Баланс водопостачання для водозбору є таким:

10–15 % – природні ресурси водонесного горизонту;

30–35 % – залучені води річки Лімниця;

5055 % – штучно створені запаси води, що інфільтруються з підживлювальної траншеї.

Чотири кілометри нижче за течією Лімниці, також на лівому березі, знаходиться Хотінський водозбір, який експлуатується з 1927 року і займає сьогодні площу всього лиш 500×200 метрів.

Водозбір сьогодні розглядається як резервний для подачі технічної води.

Геоморфологія, рівні та напрямок руху підземних вод. Район досліджень належить до басейну

ріки Лімниця, яка є тут основною водною артерією. Територія басейну складена неогеновими відкладами, які перекриваються четвертинними утвореннями. Водонесний горизонт живиться за рахунок інфільтрації поверхневих вод (опадів), а також транзиту підземних вод із височин, які знаходяться на північному сході від території. Напрямок руху підземних вод до основної дрени – ріки Лімниця – контролюється напрямками пониження рельєфу. На рис. 3 наведена карта рівнів, яка побудована за даними вимірів у спостережних свердловинах на час літньої межні 2014 року (липень–серпень), тобто після паводку, спричинених літніми дощами. На час спостереження (грудень 2019 р.) усі ці свердловини знищені.

Складність аналізу карти полягає в тому, що ландшафт території спотворений за рахунок штучних об'єктів, тобто кар'єру, солевідвалів, хвостосховищ та акумулюючих ємностей. Зрозуміло, що ці споруди значно змінюють конфігурацію п'єзоогіпсів. Проте, необхідних додаткових вимірів немає і, відповідно, немає відтворення реальної детальної карти. Тому під час аналізу та надання об'єктивних висновків варто зважати, що п'єзоогіпси, які проведені через ділянки означених споруд, є наближеними та певною мірою віртуальними. З урахуванням цього фактору, на карті рівнів підземних вод (рис. 3) нами показані стрілками напрямки ухилу рельєфу та руху підземних вод. Стрілки напрямків наведені як субперпендикулярні до ізоліній абсолютних відміток рельєфу та ізоліній рівнів підземних вод. Карта побудована для літньо–осіннього меженного періоду.

Прийmemo до уваги, що вздовж західного, південного та східного борту кар'єру проходить водозбірна траншея. Ця траншея розрізає водонесний горизонт і в часі експлуатації кар'єру виконувала задачу перехоплення транзитних підземних вод, прямуючих у Домбровський кар'єр.

Сьогодні дренаю фактично є кар'єр зі сторони його північного борту, де водозбірна траншея зруйнована, тут активно розвиваються карстові процеси та обвали, візуально фіксуються численні витoki в кар'єр. Регіональний потік підземних вод водонесного горизонту спрямований із північного заходу на південний схід.

У цілому рельєф земної поверхні відповідає карті гідроогіпсів за формою та напрямком ізоліній. Винятком є південна частина планшету, де р. Лімниця не дренає лівобережний водонесний горизонт. Це пояснюється підвищеними позначками води з підживлювальної траншеї, яка розвантажується як у бік Лімниці, так і в північно–східному напрямку у водонесний горизонт, тобто підживлювальна траншея є бар'єром для регіонального південно–східного потоку підземних вод. На рис. 3 напрям розвантаження траншеї позначено стрілками північно–східного напрямку (див. південний край планшету).

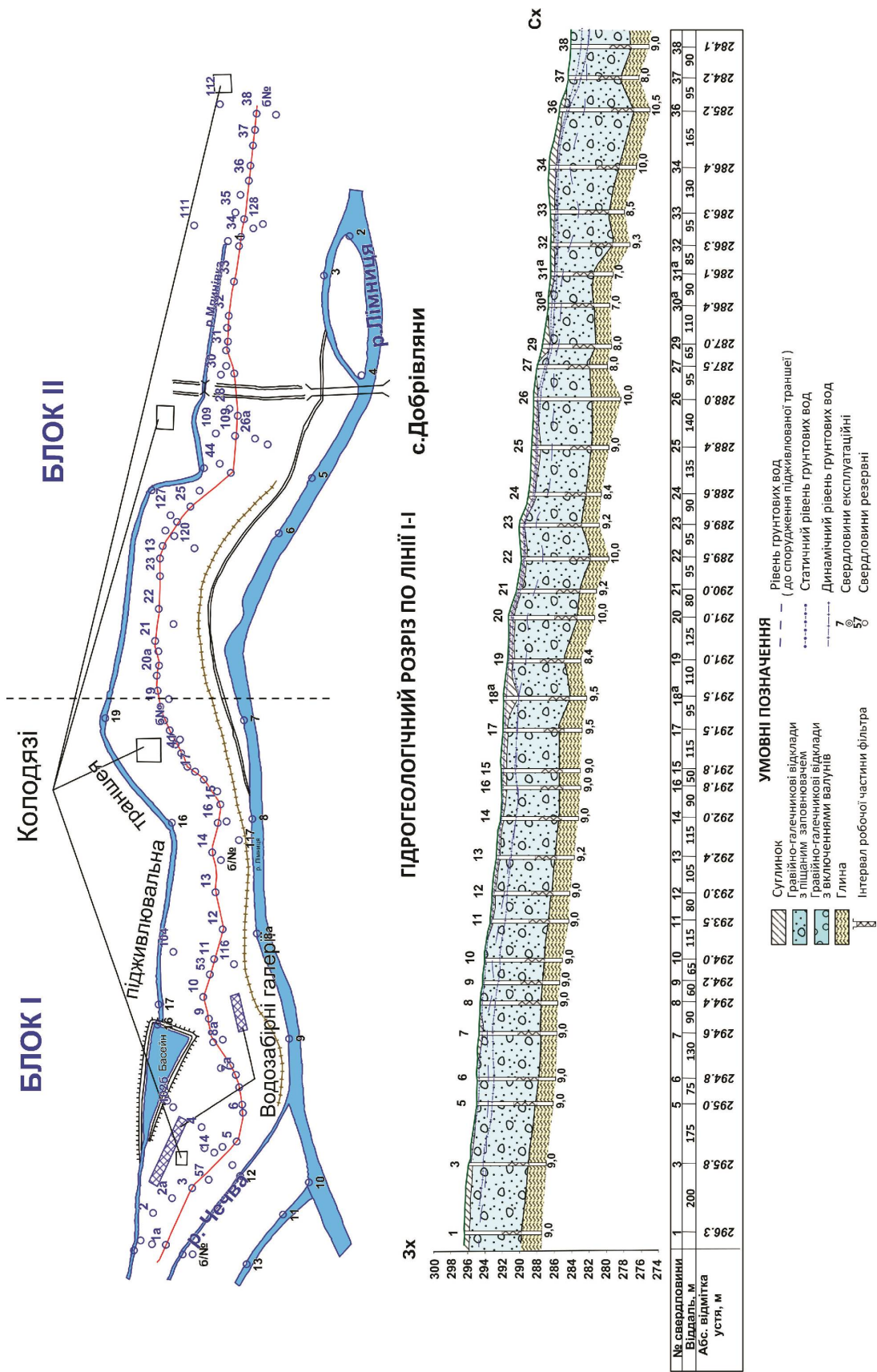


Рис. 2. Ситуаційний план Добрівлянського водозбору та гідрогеологічний розріз по лінії свердловин

У результаті, регіональний південно-східний потік підземних вод також оминає водозабір, і поза ним, на сході, ймовірно буде дренуватись річкою Лімниця. Попередня оцінка засолення водоносного горизонту. Засолення водоносного горизонту відмічалось у попередні роки по окремих свердловинах, а також у колодязях питної води в садибах мешканців навколишніх сіл. За результатами лабораторних випробувань проб води, відібраних з усіх збережених свердловин (2012 рік), значення загальної мінералізації коливалось у межах 0,160–104,37 г/дм³, тобто від прісної до розсолів.

Основними елементами або сполуками, за рахунок яких здійснюється засолення, є Cl, Na, K, SO₄,

Mg. Контур засолення підземних вод наведено на рис. 3.

Відповідно до схеми, засолення є нерівномірним. Як відомо, потенційними джерелами засолення є розсоли кар'єра, хвостосховищ, акумулюючих ємностей та солевідвалів. Проте наявність випробувань по обмеженій кількості гідрогеологічних спостережних свердловин (усього 15) на площі близько 15 км² показала – це вочевидь замало для побудови достовірної крупномасштабної карти, щоб відтворити достовірну детальну площинну модель засолення та пов'язати її з реальними джерелами. На 2021 р. мережа спостережних гідрогеологічних свердловин знищена. В 2019 році закладені 20 нових свердловин, до сьогодні 16 із них збереглися.

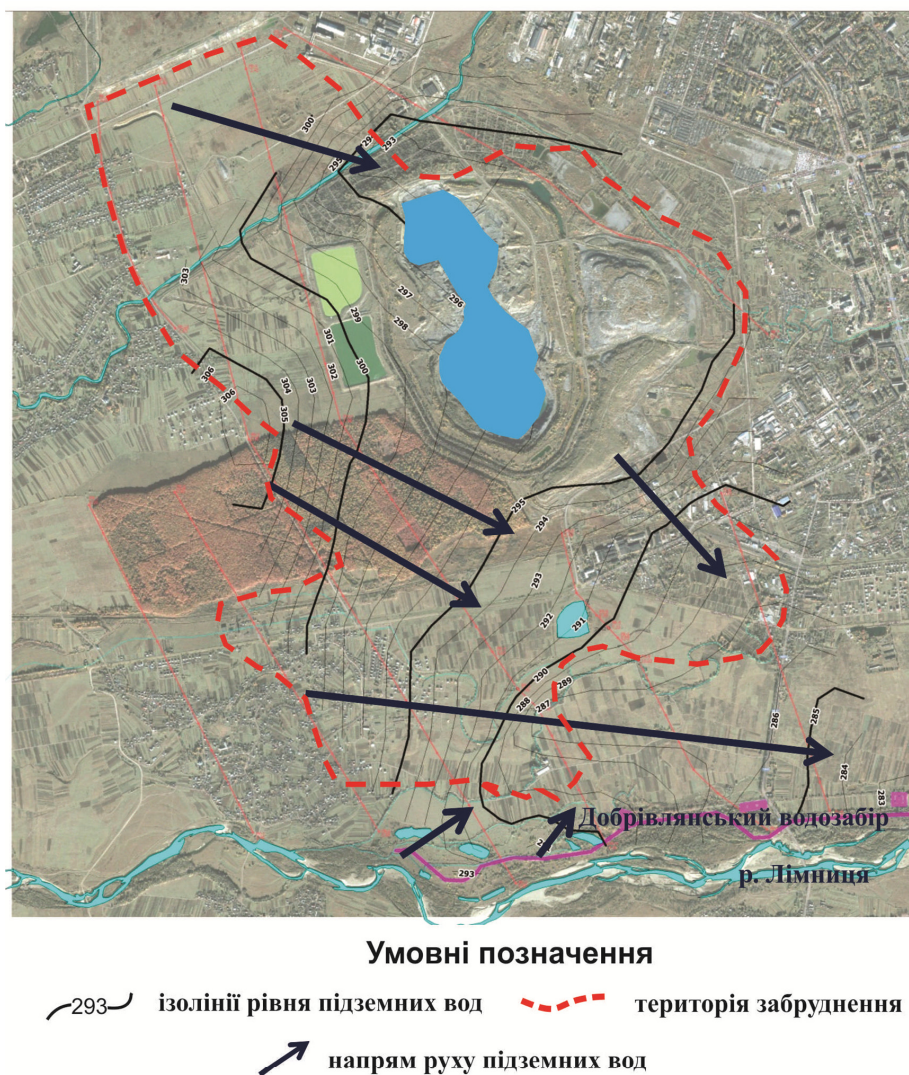


Рис. 3. Карта рівнів та схема напрямку руху підземних вод

Геоелектричні моделі території дослідження

Одним із методів побудови детальних карт мінералізації є залучення геофізичних методів, виконаних по детальній сітці спостережень. У результаті необхідно визначити електричний розріз, узгодити його з літолого-стратиграфічною будовою, виокремити водоносний горизонт та встановити ко-

реляційний зв'язок між електричним опором цього горизонту та мінералізацією підземних вод. Для розв'язання цих задач використовується метод електророзвідки, а саме вертикальні електричні зондування (ВЕЗ) та зонтування становлення поля (ЗС). Метод ВЕЗ виконаний та проаналізований авторами статті, а метод ЗС виконаний співробітниками Кар-

патського відділення Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України. Автори статті використали результати методу ЗС, що наведені у публікаціях [Романюк та ін., 2008, Шуровський та ін., 2013] з відповідними посиланнями на авторів. Варто зазначити, що геологічні та гідрогеологічні умови у місцях виконання методів ВЕЗ та ЗС були ідентичними.

Результатом виконання методу ВЕЗ є крива залежності зміни позірної електричної опору від довжини лінії струму. Зазначена довжина лінії струму АВ є геометричним аналогом глибини досліджень за приблизною залежністю $H \approx \frac{1}{3} \div \frac{1}{10} \times AB$.

Отже, крива ВЕЗ відображає зміну електричного опору з глибиною. Значення електричного опору звичайно відповідають певному літологічному різновиду гірських порід. На рис. 4 наведені для співставлення криві зондувань на ділянках із різним

ступенем засолення підземних вод. На наведених кривих електричний позірний опір у цілому зменшується з глибиною, досягаючи мінімальних значень на рівні водоносного горизонту, якому на рисунку відповідають ліві нижні гілки кривих. Зондування виконані біля свердловин, з яких відбирались проби води та визначалась мінералізація.

Крива 1 на рис. 4 за мінімального опору горизонту, насиченого розсолами, $\rho_{\min} = 0,12$ Ом·м, відповідає мінералізації $M = 14,8$ г/дм³, крива 2 за $\rho_{\min} = 0,58$ Ом·м відповідає мінералізації $M = 3,2$ г/дм³, а крива 3 за $\rho_{\min} = 3,48$ Ом·м відповідає мінералізації $M = 0,6$ г/дм³. Отже, збільшення мінералізації узгоджується зі зменшенням електричного опору. На рисунку також наведено детальний геологічний розріз приповерхневої частини досліджуваної території.

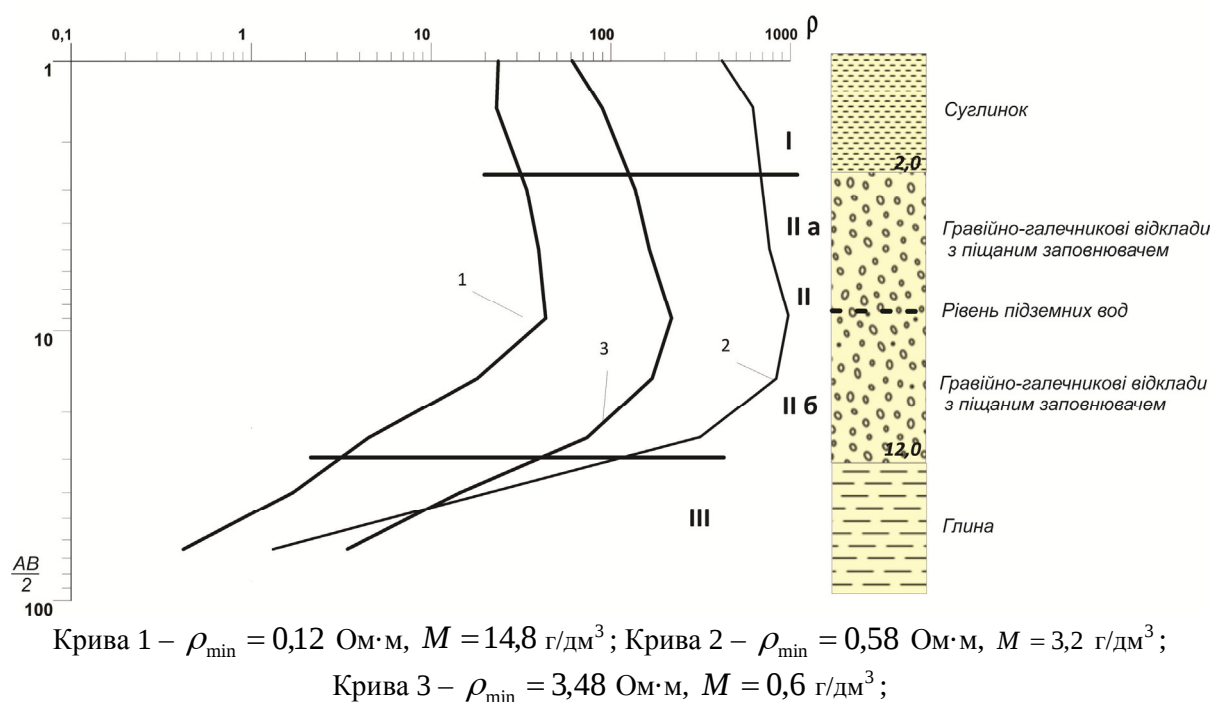
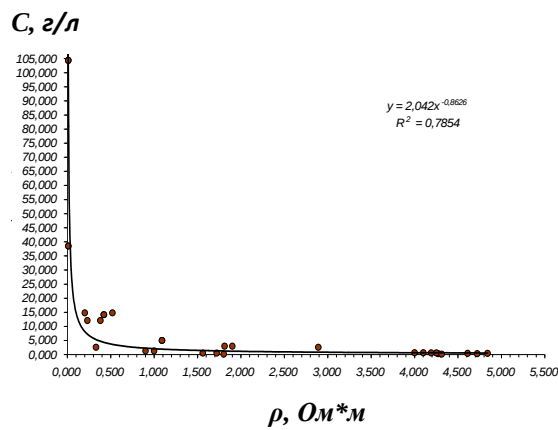


Рис. 4. Геоелектричні моделі та криві ВЕЗ із різним ступенем засолення водоносного горизонту

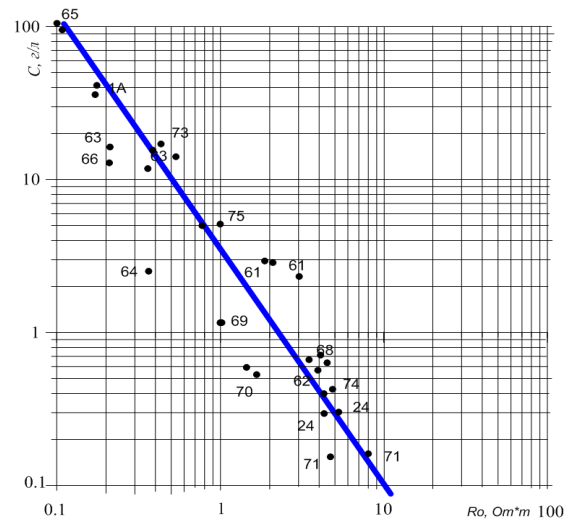
Кореляційні зв'язки між засоленням та геофізичними параметрами. Кореляція визначалась незалежно за двома методами – ВЕЗ і ЗС (зондування становленням електромагнітного поля). Метод ВЕЗ виконувався в 2012 році, а ЗС – у 2010 році. Геофізичні методи виконувались так, щоб точки (центру) зондувань розташовувались поблизу гирла свердловин. Зондування виконувались за стислий проміжок часу (декілька днів). На час виконання ВЕЗ або ЗС зі свердловин відбирались проби води, далі визначалась поелементна та сумарна мінералізація.

Графіки кореляційної залежності зображені на рис. 5. Рівняння, встановлене за емпіричними даними, має вигляд у варіанті лінійного масштабу координат $M = a\rho^2 + b\rho + c$ (рис. 5, а), у варіанті білогарифмічного масштабу $\lg M = \lg \rho + f$ (рис. 5, б).

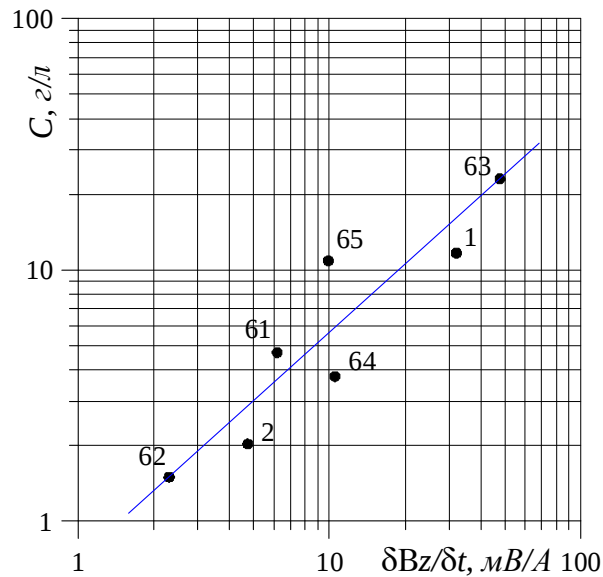
У білогарифмічному масштабі залежність лінійна, і зв'язок доволі тісний, коефіцієнт кореляції дорівнює 0,87. Отже, отримана залежність може бути використана для побудови карти мінералізації підземних вод за даними електричних зондувань на постійному струмі.



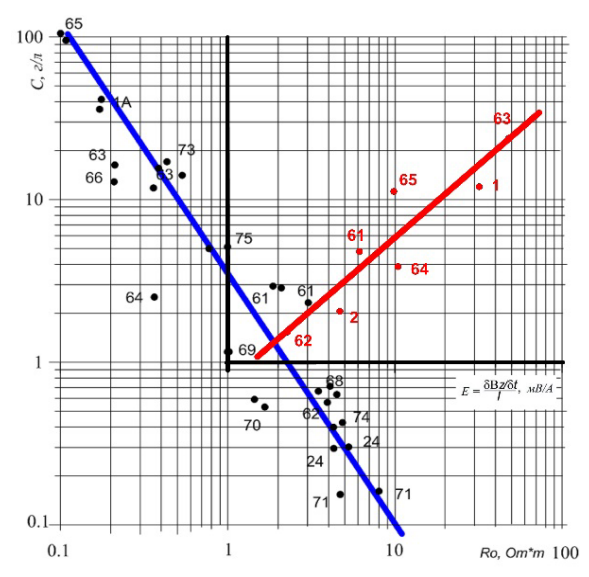
а



б



в



г

Рис. 5. Кореляційні залежності за методами електророзвідки

а – графік залежності мінералізації та електричного опору (метод ВЕЗ); б – кореляційна залежність електричного опору та мінералізації (метод ВЕЗ); в – кореляційна залежність між індукційним параметром та мінералізацією (метод ЗС за даними Карпатського відділення Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України); г – суміщені кореляційні залежності за даними ВЕЗ та ЗС

Виникає питання, чи узгоджується цей графік з графіками залежності електричного опору від мінералізації підземних вод в інших регіонах? Тому на рис. 6 наведено сімейство відповідних залежностей для різних регіонів колишнього Радянського Союзу (згадується раніше при аналізі монографії [Мелькановичкий и др., 1982]). Графік на рис. 5, б в білогарифмічних координатах винесено на рис. 6 під номером 15.

Паралельність отриманого графіка з графіками для інших геологічних районів свідчить про достовірність отриманих даних. Варто зазначити принципову можливість використання для оцінки

мінералізації підземних вод методів індукційних зондувань, зокрема зондування становленням електромагнітного поля (ЗС). Для демонстрації ефективності застосування індукційних зондувань скористаємося роботами [Романюк та ін., 2008, Шуровський та ін., 2013], у яких наводяться кореляційні залежності між мінералізацією та індукційним параметром. Протяжність у часі індукційного ефекту та, відповідно, його величина залежить від електричного опору гірських порід, і є для нього обернено пропорційною. Що більша мінералізація підземних вод, то менший електричний позірний опір і більший індукційний ефект.

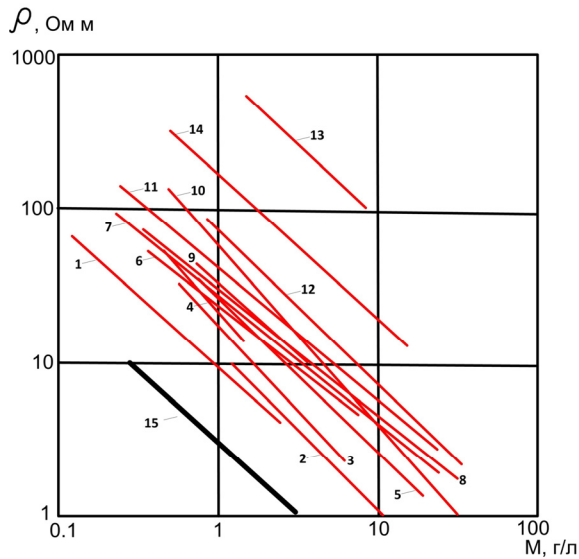


Рис. 6. Залежність питомого електричного опору від мінералізації водних розчинів та підземних вод для різних геологічних районів

На рис. 5, в винесено графік кореляційної залежності між індукційним параметром та мінералізацією по шести свердловинах. Крива відповідає рівнянню $\lg M = \lg B + f$, де B — параметр індукції. Коефіцієнт кореляції — 0,92.

Порівняємо кореляційні графіки (рис. 5, б і 5, в). Якщо їх сумістити на одному бланку з білогарифмічними координатами, то їхнє взаєморозташування буде близьким до перпендикулярного (рис. 5, з).

Отже, по-перше, таку перпендикулярність варто вважати критерієм достовірності параметричних результатів, а по-друге, можна стверджувати однакову інформативність методів, тим більше, що значення коефіцієнтів кореляції є близькими один до одного.

При вирішенні питання, якому методу віддати перевагу, треба брати до уваги те, що диференціацію розрізу за електричним опором краще виконувати за методом ВЕЗ, проте метод ЗС є більш ефективним при картуванні низькоомних пластів навіть незначної потужності. Глибинність ВЕЗ пов'язана з лінійним розносом, а ЗС — з розмірами

петлі. Крім того є питання ціни, яка є різною для різних умов реалізації методів. У наших умовах перевагу надаємо методу ВЕЗ, як достатньо інформативному і суттєво дешевшому.

Інформативність карт засолення, побудованих за даними методу ВЕЗ. Уперше карта мінералізації була складена за результатами геофізичних досліджень методом ВЕЗ у 2012 році, а потім доповнена та перескладена у 2013 році (рис. 7).

Опис карти засолення 2013 р. (рис. 7). На зазначеній карті з півночі на південь спостерігаються три виразні аномалії. Північна аномалія № 1 знаходиться на південь від хвостосховища № 1, і, очевидно, узгоджується з витоком із нього. Рівень мінералізації коливається в межах 5–25 г/л.

Аномалія № 2 на південь від першої знаходиться на південному заході від акумулюючих ємностей № 1 і № 2 та, ймовірно, пов'язана із ними. Рівень мінералізації коливається в межах 2,5–7 г/л.

Аномалія № 3 знаходиться на південь від Домбровського кар'єру, і, скоріш за все, формується із декількох джерел: східна частина за рахунок солевідвалів, середня та західна частини за рахунок розсолів хвостосховищ та акумулюючих ємностей. Не виключене потрапляння розсолів із південної частини дренажної траншеї. Мінералізація для цієї території коливається від 1 до 25 г/л.

У будь-якому разі, зазначені джерела є гіпотетичними, проте, по-перше, ми маємо факт їхнього існування, а по-друге, їх наявність узгоджується з названими можливими джерелами та відомим фактом регіонального південно-східного напрямку руху підземних вод.

Опис карти засолення 2018 р. (рис. 8).

Як зазначалось, територія дослідження розташована між Домбровським кар'єром та р. Лімниця, тому порівняно з описом карти 2013 року ми маємо не три аномалії, а лише одну південну аномалію. За контуром та місцем розташування ця аномалія повторює аномалію № 3, виявлену у 2013 р. Проте значно зменшився рівень мінералізації, який становить 1–12 г/л. Варто зазначити тенденцію до розповсюдження цієї аномалії по осі Домбровський кар'єр — річка Лімниця на південь. Цей “язик розповсюдження” є як на карті 2018 р., так і на карті 2013 р. Мінералізація сьогодні становить від 1 до 4 г/л. Забруднення 2013 та 2018 років не досягає водозабору, і, скоріш за все, ніколи його не досягне, тому що водозабір штучно живиться із водоканалу р. Чечва.

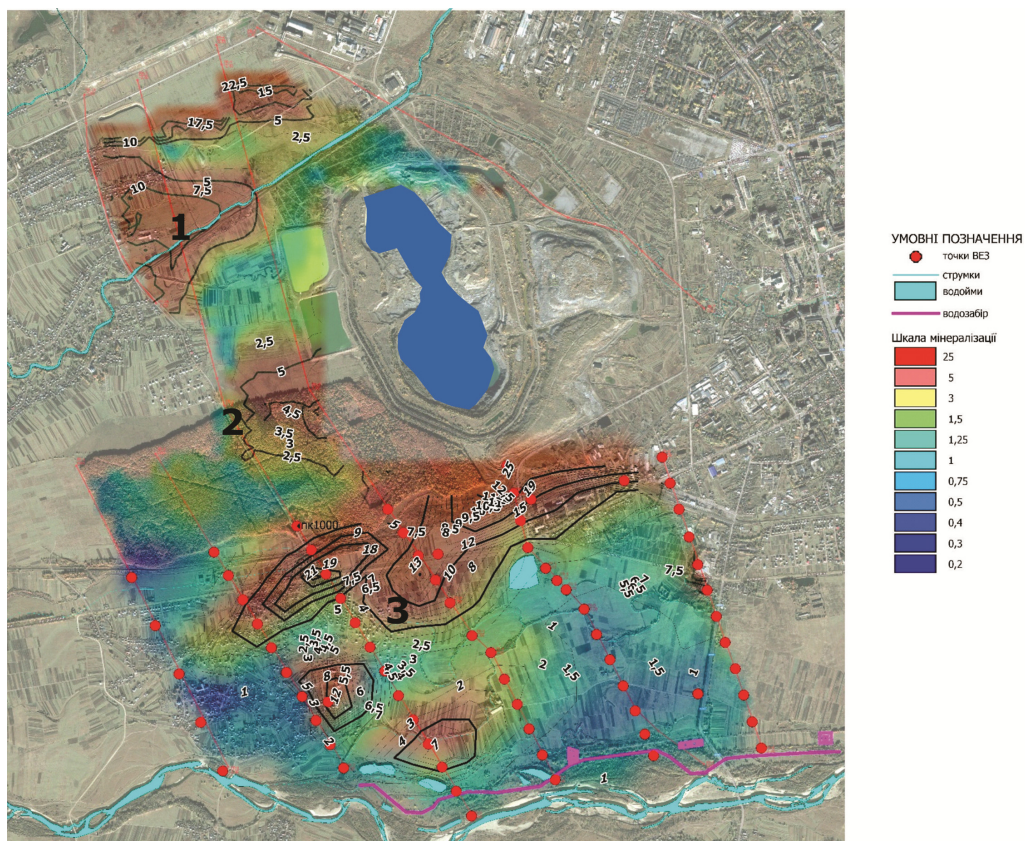


Рис. 7. Карти засолення водоносного горизонту із зазначеними аномаліями (спостереження 2013 року)

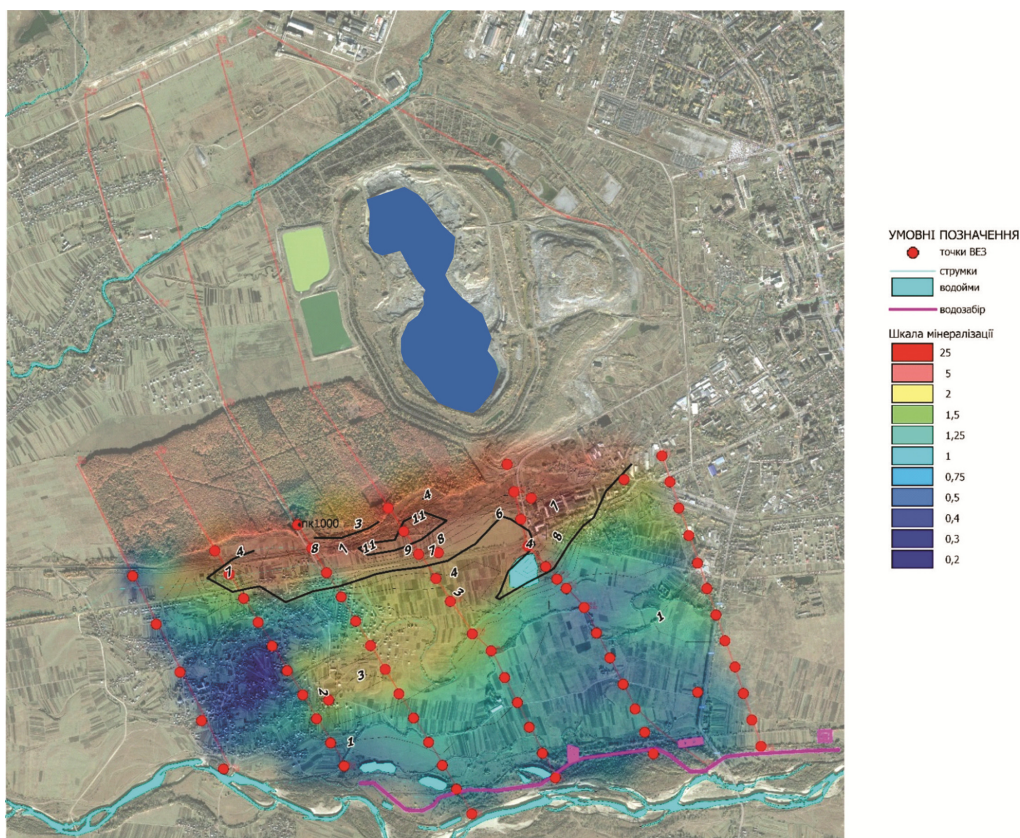


Рис. 8. Карти засолення водоносного горизонту (спостереження 2018 року)

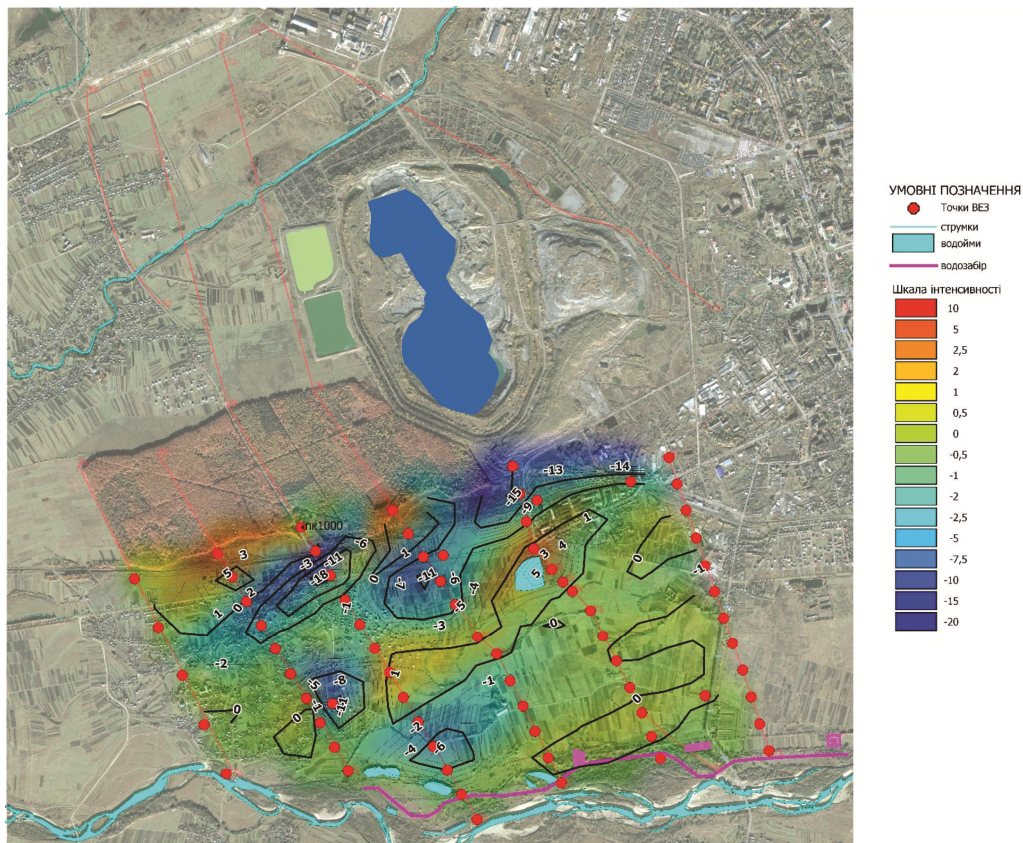


Рис. 9. Карта залишкової мінералізації

Опис карти різниць засолення 2018–2013 рр. (рис. 9). Зазначена карта побудована шляхом віднімання по точках геофізичних спостережень мінералізацій, зафіксованих у 2018 та 2013 рр. Карта представлена на рис. 9. Аналіз карти дозволяє стверджувати, що по площі мінералізація підземних вод зросла упродовж року як на південь, так і на схід, тобто забруднена зона пересувається в зазначених напрямках. Зауважмо, що зменшення величини основної аномалії на заході за відсутності її зв'язку з джерелами забруднення та збільшення на сході – у напрямку руху, свідчить про тенденцію до самоочищення західної частини території. Разом із тим, зменшується екологічне навантаження на сході – у зв'язку з інфільтрацією опадів та відповідно зі зменшенням мінералізації по напрямку руху підземних вод. Геофізичні дослідження також дають можливість визначення швидкості руху підземних вод. Для цього треба порівняти карти засолення, побудовані за результатами вертикальних електричних зондувань 2012 та 2013 років.

Простим вимірюванням відстані між ідентичними ізолініями мінералізації, зміщеними за рік у східному напрямку, отримуємо 750 метрів, тобто, швидкість пересування забруднення на схід – 750 метрів на рік.

Проведемо незалежний контроль оцінки швидкості пересування забруднених вод у східному напрямку за гідрогеологічними даними. Для цього

використаємо карту рівнів підземних вод (рис. 3). Згідно з цією картою, на ділянці, що розглядається (між кар'єром і р. Лімниця), ухил поверхні води у водоносному горизонті становить $I = 0,006$. Значення коефіцієнта фільтрації відповідно до даних відкачок 2013 року нам відоме – у середньому $k = 30$ м / добу .

Коефіцієнт водовіддачі для неоднорідної породи, представленої галькою та піском породи відповідної алювіальної тераси, за літературними даними [Гайдін, Рудько, 2016], оцінюється величиною $\eta = 0,1$.

$$\text{Рахуємо: } L = \frac{k \cdot I}{\eta} \cdot 365 \approx 650 \text{ м / рік,}$$

де L – швидкість переміщення забруднених вод за рік.

Отже, результати розрахунків за різними методами узгоджуються (у середньому 750 м/рік за геофізичними даними та 650 м/рік – за гідрогеологічними). Для подальших досліджень будемо вважати цю величину – швидкість пересування потоку підземних вод у східному напрямку – такою, що дорівнює 700 м/рік. Аналогічно розраховано швидкість пересування потоку підземних вод у південному напрямку – 200 м/рік.

При таких швидкостях уже давно повинні бути засолені ґрунтові води в районі дії водозабірних споруд. Проте, за даними регулярних аналізів са-

нітарно-епідеміологічної служби питна вода з водозабору відповідає кондиційним вимогам. Чому вона не забруднюється? Справа в тому, що для ефективної роботи водозабору штучно створена підживлювальна траншея (рис.3), яка отримує воду з річки Чечви, і рівень води в ній вищий за рівень підступаючих із півночі засолених вод. Тому названа траншея є, по-перше, бар'єрною для соляних вод, а по-друге, її води відтісняють розсоли водоносного горизонту, розбавляючи їх і спрямовуючи вздовж Лімниці на схід. Зазначене відображено на карті рівнів підземних вод (див. рис. 3) стрілками напрямку руху ґрунтових вод у районі водозабору на північний схід.

Тому можна стверджувати, що при існуючій гідрогеологічній ситуації Добровлянському водозабору міста Калуша забруднення не загрожує. Проте за зміни ситуації (підйом рівнів забруднених ґрунтових вод при несприятливих природних або техногенних умовах) перспектива такого забруднення стає реальною. Тому обов'язковим є виконання технічних рішень щодо рекультивації джерел забруднення та ліквідації загрози підйому рівнів розсолів у Домбровському кар'єрі. Крім того, варто продовжити режимні спостереження за рівнями підземних вод у режимних гідрогеологічних свердловинах і синхронно в експлуатаційних свердловинах водозабору.

Розрахунок ризиків забруднення річок Лімниця та Дністер. Завдяки комплексу наведених досліджень отримано матеріали, достатні для попереднього наближеного розрахунку збільшення мінералізації вод ріки Лімниця та надалі ріки Дністер за рахунок дренажу забруднених вод алювіального горизонту території Калуського гірничо-промислового району.

Для розрахунку мінералізації треба знати площу, з якої щороку буде надходити засолена вода в Лімницю, потужність водоносного горизонту та його водовіддачу. Водозабору «Добровляни» загрози засолення за наявних гідрогеологічних обставин у цілому немає, тому що в районі водозабору транзит ґрунтових вод відбувається вздовж лівого берега річки. Швидкість пересування підземних вод становить сімсот метрів на рік у східному напрямку вздовж Лімниці за її течією та двісті метрів на рік в південному напрямку, тобто до Лімниці. Отже, для живлення річки Лімниці забрудненими водами буде задіяна на протязі року площа $700 \times 200 \text{ м}^2$. Потужність водоносного горизонту візьмемо «із запасом», дещо вище середньої – 10 метрів. Водовіддача – 0,1. Тоді об'єм засоленних вод, що впродовж року буде спрямований до річки Лімниця, становитиме $700 \times 700 \times \times 200 \times 10 \times 0,1 = 0,14 \text{ млн м}^3$. Будемо вважати за інформацією з карт засолення прибережної смуги, що середня мінералізація підземних вод дорівнює 15 г/л. Середньорічний розхід Лімниці в районі водозабору відомий – $23,5 \text{ м}^3/\text{с}$, або $741,1 \text{ млн м}^3/\text{рік}$. Мінералізація річних вод оцінюється в $0,1\text{--}0,2 \text{ г/л}$ –

у середньому $0,15 \text{ г/л}$. Мінералізація змішаної води в річці із впливом засолення за рахунок допоміжних споруд (хвостосховища, акумулюючі ємності, солевідвали) M_1 становитиме:

$$M_1 = \frac{V_n \cdot M_n + W \cdot M_p}{V_n + W}, \quad (1)$$

де V_n – річний об'єм засоленних підземних вод спрямованих в річку Лімницю; M_n – середня мінералізація підземних вод; W – середньорічний розхід річки Лімниця; M_p – мінералізація річкових вод. У чисельній формі отримаємо:

$$M_1 = \frac{0,14 \cdot 15 + 741,1 \cdot 0,15}{0,14 + 741,1} = 0,153 \text{ г/дм}^3.$$

Зробимо умови більш жорсткими, припустимо, що смуга засоленних ґрунтових вод довжиною 2000 м та шириною 200 м від солевідвалів з такою ж мінералізацією 15 г/дм^3 без змін прямує до Лімниці. У цьому варіанті підрахунок дає значення $M'_1 \approx 0,158 \text{ г/дм}^3$.

Зрозуміло, що і в першому, і в другому варіанті річка Лімниця зазначених змін у мінералізації не відчує. Далі припустимо, що видобуток корисних компонентів із розсолів Домбровського кар'єру, як це передбачається, здійснено не буде, тобто штучне пониження або стабілізація рівня розсолів у кар'єрі не відбудеться. У цьому разі, коли рівень у кар'єрі підніметься настільки, що розсоли повністю будуть поглинатись водоносним горизонтом, кар'єр буде отримувати тільки опади в кількості $760\text{--}768 \text{ мм/рік}$. При площі чаші кар'єру у 2 км^2 це еквівалентно $1,536 \text{ млн м}^3$.

Це станеться, коли рівень розсолів у кар'єрі досягне абсолютної відмітки 295 м (при позначках борту кар'єру біля 300 м). За оцінками, наведеними у [Долін та ін. 2010], мінералізація розсолів у приповерхневій частині (на глибині в декілька метрів) складатиме 60 г/дм^3 , а за даними [Павлюк, 2011 Гайдін, 2016] – $10\text{--}15 \text{ г/дм}^3$. Розглянемо найгірший варіант – 60 г/дм^3 . Випаровуваність для такої концентрації розсолів у кар'єрі вважається до 0,4. Тоді випаровуватись буде $1,536 \times 0,4 = 0,614 \text{ млн м}^3$. Решта – $0,922 \text{ млн м}^3$ – це розсоли, які будуть спрямовані у водоносний горизонт. Розвантаження, згідно з картою рівнів підземних вод, буде відбуватись на схід, південний схід і південь, тобто в напрямку Лімниці. Оскільки за рахунок інфільтрації розбавлення розсолів від інших техногенних об'єктів (солевідвали, хвостосховища, акумулюючі ємності) уже відбулось, то об'єм $0,922 \text{ млн м}^3$ та мінералізація 60 мг/дм^3 будуть збережені при поступленні в р. Лімницю. Тоді мінералізація змішаної води в р. Лімниця з урахуванням розсолів Домбровського кар'єру M_2 та допоміжних споруд становитиме:

$$M_2 = \frac{V_k \cdot M_k + W \cdot M_p + V_n \cdot M_n}{V_k + W + V_n}, \quad (2)$$

де: V_k – об'єм розсолів кар'єру спрямований у водоносний горизонт; M_k – мінералізація розсолів кар'єру; V_n – річний об'єм засолених підземних вод спрямованих в річку Лімницю; M_n – середня мінералізація підземних вод; W – середньорічний розхід річки Лімниця; M_p – мінералізація річкових вод.

У чисельній формі отримаємо:

$$M_2 = \frac{0,922 \times 60 + 741,1 \times 0,15 + 0,4 \times 0,15}{0,922 + 741,1 + 0,4} = 0,23 \text{ г/дм}^3.$$

Це число досить далеке від припустимого 1 г/дм^3 , і здавалось би, що все в порядку, тому що гранично припустима концентрація не є досягнутою. Проте є інші вимоги, а саме щодо вмісту окремих елементів. Зокрема, вміст калію в річках не повинен перевищувати 3 % від вмісту натрію. Останній аналіз щодо вмісту калію у розсолах кар'єру засвідчив, що при загальній мінералізації розсолів 287 г/дм^3 вміст Na становив 71,7, а K – $22,5 \text{ г/дм}^3$, таким чином, вміст калію становить 31 % від вмісту натрію. Щодо важких металів, то концентрація деяких із них в окремих пробах у сотні разів перевищувала гранично припустиму [Долін та ін., 2010], зокрема для Pb – концентрація $1,28 \text{ мг/дм}^3$ за норми $0,01 \text{ мг/дм}^3$. У приповерхневих пробах, за даними аналізів 2018 року спостерігається перевищення бромідів у всіх пробах води у 254 разів згідно з нормативними значеннями. Тому питання припустимого хімічного забруднення річки Лімниця, а надалі й трансграничного Дністра, відстань до якого біля 30 км, розсолами із забруднюючих об'єктів Калуського гірничо-промислового району сьогодні лишається відкритим і вимагає подальших досліджень у зазначеному напрямку.

Наукова новизна

Наукова новизна полягає у подальшому розвитку способу оцінки мінералізації підземних вод за результатами геофізичних досліджень, зокрема електророзвідки; вперше створено просторово-часові моделі динаміки мінералізації підземних вод на території Калуського гірничо-промислового району (КГПР); вперше наведена оцінка ризиків забруднення поверхневих водотоків (рр. Лімниця, Дністер) з урахуванням основних джерел забруднення в межах КГПР.

Практична значущість

Застосування одержаних результатів дає можливість у стислі терміни дослідити ділянки, що

пов'язані з можливими забрудненням території, надати вихідні дані для подальшого планування та прийняття управлінських дій. Надійний прогноз дозволяє передбачити заходи по зменшенню екологічного навантаження на водоносний горизонт, що є єдиним питним горизонтом для м. Калуш.

Висновки

У статті розглянуті гідрогеологічні аспекти вивчення забруднення (засолення) підземних вод на території Калуського гірничо-промислового району, який розташований на території Українського Передкарпаття, де на протязі понад сотню років здійснювався видобуток калійної солі відкритим і підземним способами.

Для виконання досліджень, пов'язаних з геологічним і гідрогеологічним вивченням території, виконано буріння спостережних гідрогеологічних свердловин з літологічним опрацюванням розрізу, вимірюванням змін рівня підземних вод, уточненням гідрогеологічних характеристик та гідрогеохімічними випробуваннями розсолів.

Необхідною складовою моніторингу території є геофізичні дослідження, вивчення розподілу електроопорових та електроіндукційних характеристик гірських порід із подальшим визначенням кореляційних зв'язків геофізичних параметрів з мінералізацією підземних вод, побудовою на їх основі детальних площинних карт мінералізації на різні роки досліджень.

Комплексний підхід до аналізу карт рельєфу, рівнів підземних вод та мінералізації дозволив виявити джерела засолення водоносного горизонту (хвостосховища, акумулюючі ємності, солевідвали) та означити територію засолення з диференціацією в одиницях мінералізації. Окрім того, визначено складові регіонального напрямку і швидкості руху підземних вод.

За наявності отриманих кількісних характеристик динаміки засолення виконано відповідні розрахунки балансу підземних і річкових вод і доведено, що при діючих на даний час джерелах забруднення та сучасній динаміці руху підземних вод для основних водних артерій території, а саме річки Лімниця та Дністер, загрози забруднення за рахунок збільшення загальної мінералізації немає. На протязі найближчих десятиріч, коли розсоли з кар'єру будуть спрямовані у водоносний горизонт, загроза забруднення річкового басейну стане реальною. Крім того, не оцінений поелементний склад забруднюючих вод. Детальна оцінка цього питання становить предмет наступних досліджень.

Список літератури

- Багрій С. М., Кузьменко Е. Д. До питання оцінки забруднення підземних вод геофізичними методами. *Геодинаміка*, 2013. № 2 (15). С. 93–96.
- Гайдін А. М., Рудько Г. І. Техногенний карст. Держ. комісія України по запасах корисних копалин. Київ; Чернівці: Букрек, 2016. 196 с.
- Дешиця С. А., Підвірний О. І., Романюк О. І., Савків Л. Т. Технологічний комплекс та результати електромагнітного моніторингу екологічно проблемних об'єктів Передкарпаття. *Геодинаміка*, 2014. (1), 114–128. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2014.01.114>.
- Долін В. В., Яковлев Є. О., Кузьменко Е. Д. & Бараненко, Б. Т. Прогнозування екогідрогеохімічної ситуації при затопленні Домбровського кар'єру калійних руд. *Екологічна безпека та збалансоване природокористування*. № 1, 2010. С. 74–87. URL: <https://ebzr.nung.edu.ua/index.php/ebzr/article/view/326>.
- Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород (Петрофизика). М.: Гостоптехиздат, 1962. 491 с.
- Ляховицкий Ф. М., Хмелевской В. К., Яценко З. Г. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989. 252 с.
- Мелькановицкий И. М., Ряполова В. А., Хорди-кайнен М. А. Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод. М.: Недра, 1982. 249 с.
- Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1985. 184 с.
- Онищук В., Рева М., Онищук Д. Екогеофізичні дослідження техногенного забруднення в роботі складу мінеральних добрив. *Вісн. Київського університету Геологія*, 2010. № 51. С. 21–23. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/7028>.
- Онищук В. І. Розробка технології мікрогеофізичних досліджень процесів підтоплення ґрунтів (на прикладі Лісостепу Придністров'я) та Київського Полісся). Дис. канд. геол. Наук. К.: Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, 2005. 207 с. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/7028>.
- Онищук І. І., Рева М. В., Нікіташ О. П., Онищук В. І. Дослідження техногенного забруднення довкілля геофізичними методами. *Вісн. Київського університету. Геологія*, 2006. № 38–39. С. 93–96. URL: http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/archive/N38-39_2006/onyshchuk39.pdf.
- Павлюк В. І. Соляні родовища Передкарпаття і Світу та особливості розвитку і активізації карсту на ділянках їхнього видобування. Національна академія природоохоронного та курортного будівництва: *Строительство и техногенная безопасность*. Вип. 37, 2011. С. 97–108.
- Романюк О. І., Шамотко В. І., Дешиця С. А., Дутко Р. Б. & Кусайло Р. І. Електромагнітне діагностування забруднення водоносного горизонту на прилеглих до Домбровського калійного кар'єру територіях. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2009. No. 1(19). С. 24–31. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/1772>.
- Шуровський О. Д., Анікеєв С. Г., Шамотко В. І., Дешиця С. А., Ніколаєнко О. А., Поплюйко А. Г. Геофізичний моніторинг екобезпечних геологічних процесів в агломерації м. Калуша. Мінеральні ресурси України, 2012. № 2. С. 31–38.
- Шуровський О. Д., Анікеєв С. Г., Шамотко В. І., Дешиця С. А. Геофизический мониторинг геологической среды для решения экологических проблем в пределах агломерации г. Калуша. *Горный журнал*, 2013. Москва, № 12. С. 99–104.
- Bialostocki R., Farbisz J. Badania geolektryczno-elektrooporowe. Stan aktualny i mozliwosc wykozystania wynikow. *Bieletyn Informacy Geofizyka*. Wyd. PBG Warszawa, No. 1/2007 (5), 28–41.
- Bialostocki R., Farbisz J. Pacunowski Badania geofizyczne dla potrzeb rozpoznawania i monitorowania geozagrozen. *Bieletyn Informacy Geofizyka*. Wyd. PBG Warszawa, No. 1/2008 (7). S. 54–61.
- Bialostocki R., Szczypa S., Zuk Z. Ocena przydatnosci banku danych elektrooporowych do rozpoznania i monitorowania srodowiska geologicznego. *Bieletyn Informacy Geofizyka*. Wyd. PBG Warszawa, No. 1/2006 (3). S. 62–77.
- Hamdan H., Kritikakis G., Andronikidis N., Economou N., Manoutsoglou E. & Vafidis A. (2010). Integrated geophysical methods for imaging saline karst aquifers: a case study of Stylos, Chania, Greece. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, (1), 1–8. URL: http://www.balkangeophysoc.gr/online-journal/2010_V13/No1_Feb2010/JBGS_Vol_13_2010_Feb_p01-08_Hamdan.pdf.
- Jansen J. R. (2011). Geophysical methods to map brackish and saline water in aquifers. Georgia Institute of Technology. Proceedings of the 2011 Georgia Water Resources Conference, April 11, 12, and 13, 2011, Athens, Georgia. URL: <http://hdl.handle.net/1853/46031>.
- Oyedele K. F. (2009). Total Dissolved Solids (TDS) mapping in groundwater using geophysical method. *New York Science Journal*. 2(3). 21–31. URL: [https://ir.unilag.edu.ng/bitstream/handle/123456789/5841/Total%20Dissolved%20Solids%20\(TDS\)%20Mapping%20In%20Groundwater%20Using%20Geophysical%20Method.pdf?sequence=1](https://ir.unilag.edu.ng/bitstream/handle/123456789/5841/Total%20Dissolved%20Solids%20(TDS)%20Mapping%20In%20Groundwater%20Using%20Geophysical%20Method.pdf?sequence=1).
- Paine J. G., Buckley S. M., Collins E. W. & Wilson C. R. (2012). Assessing collapse risk in evaporite sinkhole-prone areas using microgravimetry and radar interferometry assessing sinkhole collapse risk using microgravimetry and radar interferometry. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 17(2), 75–87. DOI: <https://doi.org/10.2113/JEEG17.2.75>.

Pacanowski G., Czarniak P., Bąkowska A., Mieszowski R., Welc F. (2014). The role of geophysical ERT method to evaluate the leakproofness of diaphragm wall of deep foundation trenches on the example of the construction of retail and office

complex in Lublin, Poland. *Studia Quaternaria* 31:91–99. DOI: 10.2478/squa-2014-0009.

Sappa G. & Coviello M. T. (2012). Seawater Intrusion and Salinization Processes Assessment in a Multistrata Coastal Aquifer in Italy. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(11), 954–967. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.411111>.

Eduard KUZMENKO¹, Sergiy BAGRIY²

Department of Geoinformation Systems and Technologies, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, tel.: +38 0342 504761, email: gbg@nung.edu.ua, ¹<https://orcid.org/0000-0002-1994-0970>, ²<https://orcid.org/0000-0003-1190-6222>.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TECHNOGENICALLY TRIGGERED HYDRODYNAMIC PROCESSES ON GROUNDWATER CONTAMINATION IN THE AREA OF KALUSH MINING INDUSTRY BY APPLYING GEOPHYSICAL METHODS

The aim of the research is to substantiate the scientific foundations of an integrated approach to solving environmental and geological problems related to groundwater salinization in the Kalush mining region; quantitative evaluation of the dynamics of such salinization and its relationship with the river system based on geochemical and geophysical observations. The relevance of the research is determined by the need to solve the following tasks: 1) identification of the sources of the groundwater contamination; 2) determination of saline areas, including settlements within which drinking water horizons become unsuitable for the direct use; 3) characteristics of the dynamics, that is, the degree of salinity and the rate of its changes in space and time; 4) determination of the danger to the operation of water intake facilities; 5) determination of the risk of contamination of the river basin. The methodology consists in establishing the correlation between hydrogeochemical and electrometric observations and determining the patterns of transition from measurements of electrical resistance to the groundwater salinity, in creating spatio-temporal models of the dynamics of groundwater salinity and assessing the risks of contamination of surface watercourses taking into account the main sources of contamination, providing initial data for making management decisions. With the help of the hydrogeochemical observations (the groundwater mineralization) and electrical exploration (measurement of electrical resistance), correlations were established between the geophysical characteristics inherent in the aquifer and the groundwater mineralization, which, as a result, made it possible to concretize the sources and determine the area and degree of salinization according to the planar geophysical surveys. Based on regime observations, the direction of movement of the salinity front and its speed were established. According to the obtained quantitative characteristics of the dynamics of salinization of the aquifer, the calculation of the risks of contamination of the Limnytsia and Dnister rivers is given. The scientific novelty consists in the further development of the methods for assessing underground mineralization based on the results of geophysical research, including the method of electrical exploration. For the first time, Spatio-temporal models of the dynamics of the groundwater mineralization in the territory of the Kalush mining region (KMR) were created. For the first time, the assessment of the risks of contamination of the surface watercourses (the Limnytsia and Dnister rivers) was given taking into account the main sources of contamination within the KMR. The application of the obtained results makes it possible to quickly research the areas associated with possible contamination of the territory, to provide initial data for further planning and management actions. A reliable forecast allows envisaging the measures for reducing the environmental load on the aquifer, which is the only drinking horizon for the town of Kalush.

Key words: salinity, electrical resistance, aquifer, mineralization, observation wells, pollution sources, water intake system.

Надійшла 07.03.2022 р.