

## ЕВОЛЮЦІЯ ТА САМООРГАНІЗАЦІЯ КАРСТОВИХ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ СОЛЯНИХ РОДОВИЩ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

**Василь Дяків**

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005  
e-mail: dyakivw@yahoo.com*

З'ясовано, що гідрогеологічні системи в умовах техногенно-зміненого геологічного середовища соляних родовищ Карпатського регіону (Стебницького, Калуш-Голинського, Солотвинського) проявляються як типові дисипативні системи, здатні до еволюції та самоорганізації. Еволюція карстових гідрогеологічних систем полягає у їхньому зародженні, пов'язаним із початком водопритоків у гірничі виробки карстових вод, послідовному зростанні їхньої агресивності та дебету, активізації карстопровальних явищ, підрізання ціликів у шахтах та бортів у кар'єрах, самоізоляції виходів легкорозчинних мінералів та пригнічення техногенно-активізованого карсту, аж до припинення за повного затоплення соленосних відкладів. Самоорганізація карстових гідрогеологічних систем відбувається шляхом циклічної зміни чотирьох стадій: 1) вилуговування легкорозчинних мінералів в агресивному середовищі; 2) вивільнення важкорозчинних та нерозчинних компонентів; 3) пригнічення вилуговування внаслідок тимчасового блокування легкорозчинних мінералів протекторним прошарком вивільненого нерозчинного залишку теригенних та важкорозчинних мінералів; 4) ерозійно-корозійної дезінтеграції протекторного прошарку із циклічним переходом до стадії 1. Встановлені закономірності еволюції та самоорганізації карстових гідрогеологічних систем дають можливість прогнозувати стан гірничих масивів, порушених видобувними роботами та соляним карстом, а також пропонувати науково-обґрунтовані варіанти вирішення геоекологічних проблем.

*Ключові слова:* карстова гідрогеологічна система, Стебницьке, Калуш-Голинське, Солотвинське родовища, Карпатський регіон, соляний карст, техногенна активізація, ефект самотампонування, оцінка, аналіз, прогноз.

**Постановка проблеми.** Надзвичайно важливим чинником, який дає можливість безпечно розробляти соляні родовища, є сприятливість гідрогеологічних умов: природна захищеність соляних покладів водотривкими товщами, їх цілісність, непорушність, відсутність потужного джерела живлення надсолевих підземних вод та багато інших. За сприятливих гідрогеологічних умов соляні родовища можна безпечно проходити гірничі виробки у соленосних відкладах, розробляти та видобувати із надр розвідані запаси. Водночас наявність чи раптова поява навіть найменших водопритоків недосичених за вмістом солей призводить до розвитку техногенно-активізованого соляного карсту та початку функціонування карстових гідрогеологічних систем, які еволюціонують та самоорганізуються із часом.

Як відбувається еволюція та самоорганізація, послідовність та чергування динамічних та статичних стадій, має надзвичайно важливе значення для розуміння процесів розвитку соляного карсту, прогнозу стійкості гірничих масивів та реалізації інших практичних завдань. Визначені та спостережувані емпіричні факти, геологічні процеси, їхні морфологічні прояви документувались останні 20 років у межах Солотвинського, Стебницького і Калуш-Голинського родовищ та дають змогу запропонувати цілісну модель еволюції та самоорганізації карстових гідрогеологічних систем.

**Огляд літературних даних.** Приклади еволюції та самоорганізації карстових гідрогеологічних систем соляних родовищ Карпатського регіону, процеси та явища, що відбуваються за умови руху підземних вод по соляних породах, їх вилуговування та самоізоляція у різних умовах детально описано у публікаціях В. О. Дяківа, А. М. Гайдіна, Х. М. Цар [1–3].

Теоретичні аспекти еволюції та самоорганізації складних динамічних систем, дуже добре описані на прикладі дисипативних структур, які подібні до спостережуваних процесів та явищ, уперше описав І. Пригожин [4, 5] як відкриті нелінійні системи, які є далекими від стану термодинамічної рівноваги, завдяки розсіянню енергії, одержуваної ззовні. За І. Пригожином [4, 5], дисипативні системи виникають тоді, коли первинні стійкі структури потрапляють у нерівноважне середовище, зазнають суттєвих змін в умовах, далеких від термодинамічної рівноваги, доходять до точки невизначеності (біфуркації), де є вибір між подальшою деградацією та повним знищенням, з одного боку, та самоорганізацією за рахунок внутрішніх резервів, радикальною перебудовою внутрішньої будови з утворенням більш складної впорядкованої структури з метою “виживання” у несприятливих умовах.

**Мета статті.** Цілісна характеристика еволюції та самоорганізації карстових гідрогеологічних систем у межах карпатського регіону на прикладі розроблених Солотвинського, Стебницького та Калуш-Голинського родовищ кам'яних та калійних солей.

**Виклад основного матеріалу.** У Карпатському регіоні серед неогенових молас розвідані десятки родовищ кам'яної солі та калійно-магнієвих руд сульфатного та хлоридно-сульфатного складу, хлоридно-натрієвих розсолів, гіпсо-ангідритів, самородної сірки, які розроблялись десятки і сотні років та в межах яких зафіксовано прояви техногенно-активізованого карсту (рис. 1). Розглядаючи техногенно-активізований карст лише соленосних відкладів, варто зазначити, що їх специфічною особливістю у Карпатському регіоні є різноманітність мінерального складу: від майже мономінерального соляного купола Солотвинського родовища, складеного галітом з мізерними вмістами інших мінералів, у тім числі глинистих, до полімінеральних руд Стебницького та Калуш-Голинського родовищ, складених галітом, каїнітом, лангбейнітом, полігалітом, епсомітом, кізеритом, сильвіном, шенітом, багатьма іншими соляними мінералами, із вмістом теригенних та глинистих мінералів (кварцу, гідролуїти, хлориту) до 17 %. Наявність глинистих мінералів у соляних відкладах, з одного боку, суттєво ускладнює технології збагачення, а з іншого – в умовах техногенно-активізованого карсту – є важливим чинником його пригнічення, що дає підстави розглядати цей процес з позицій синергетики та самоорганізації дисипативних систем.

Із визначення карсту як екзогенного геологічного процесу розчинення гірських порід, які містять водорозчинні мінерали, що призводить до утворення порожнин та їх деформацій і, як наслідок, до характерного карстового рельєфу, найважливішими

передумовами розвитку соляного карсту є наявність у геологічному розрізі соляних мінералів, відкритий доступ до них підземних вод та винесення продуктів розчинення в умовах нерівноважного стану.

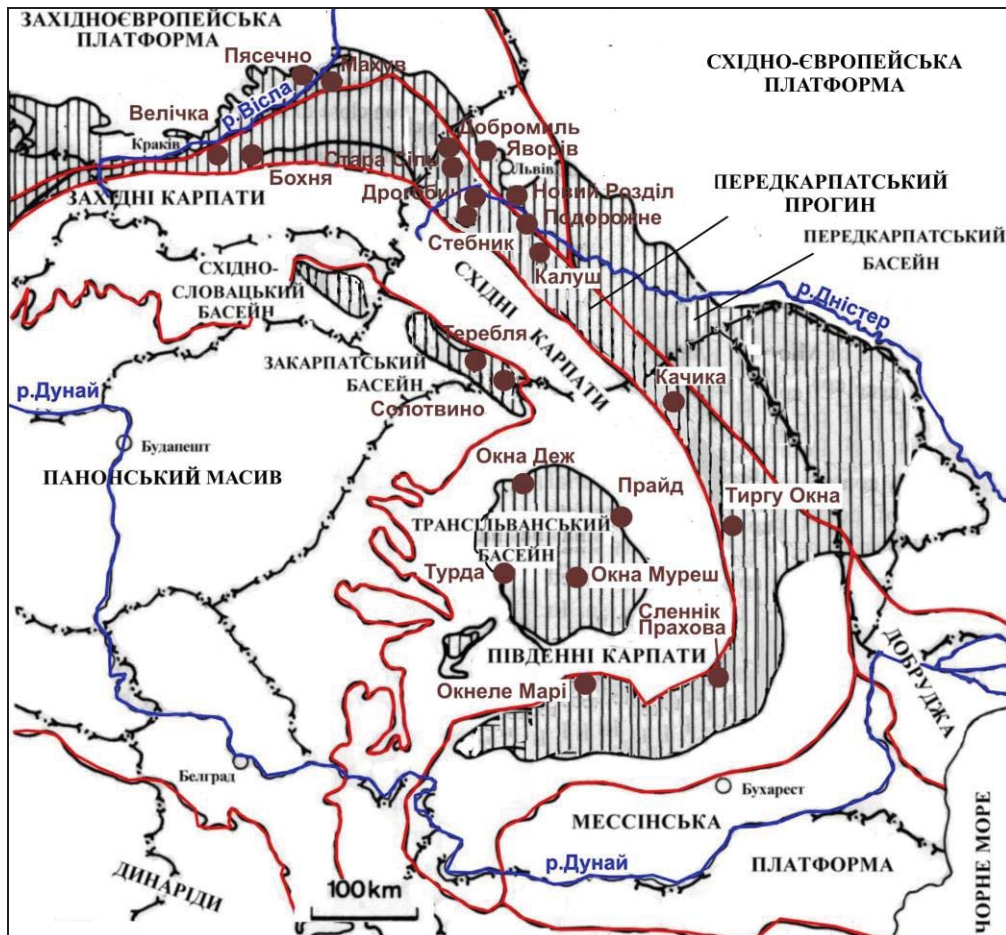


Рис.1. Поширеність неогенових молас у Карпатському регіоні та локалізація найбільших розроблюваних родовищ кам'яної солі та калійно-магнієвих руд сульфатного та хлоридно-сульфатного складу, хлоридно-натрієвих розсолів, гіпсо-ангідритів, самородної сірки, в межах яких зафіксовано прояви техногенно-активізованого карсту

Соляно-глинисті відклади в природних умовах зазвичай перебувають у рівноважному стані. Перехід у нерівноважний стан відбувається за тектонічних рухів, ерозійного розмиву перекриваючих відкладів, потраплянні соляно-глинистих відкладів у зону активного водообміну. Характерною ознакою соляно-глинистих відкладів у таких умовах є утворення мірабіліт-глазеритової, шеїніт-мірабілітової, гіпсово-глинистої шапки (Стебницьке та Калуш-Голинське родовище) та глинистого «палагу» (на Солотвинському родовищі) потужністю від 1–2 до 5–10 і більше метрів.

Формування цих елювіальних утворень відбувається внаслідок дії на соляно-глинисті мінеральні асоціації прісних вод або солоних розчинів, під впливом яких певний геологічний час проходить гідрометаморфізація осадових відкладів. Наслідком гідрометаморфізації соляно-глинистих відкладів є те, що легкорозчинні солі виносяться, а слабкорозчинні у воді мінерали, мінеральні новоутворення (гіпс, шейніт, мірабіліт) та нерозчинний залишок глинистих мінералів накопичується як залишковий продукт.

Зазвичай елювіальні «шапки» є надзвичайно важливими водотривами, які розвивають зверху вниз, до рівня проникнення агресивних вод та припинення їх руху у вигляді соляного дзеркала розсолів. Верхні горизонти елювіальних «шапок», виходячи на денну поверхню чи у зону активізації екзогенних геодинамічних процесів, зазнають денудації, наслідком чого може бути порушення гідроізоляції легкорозчинних солей. За таких умов соляно-глинисті відклади одночасно карстуються у напрямі розвантаження природних розсолів соляного дзеркала та самоізолюються за умови акумулювання слабкорозчинних соляних мінералів та нерозчинних глинистих осадів.

Іншою передумовою розвитку чи пригнічення соляного карсту у соляно-глинистих відкладах печери (шахти) чи кар'єру є рух підземних вод стосовно місць їх залягання та кут нахилу поверхні вилюговування до потоку агресивних вод (рис. 2).

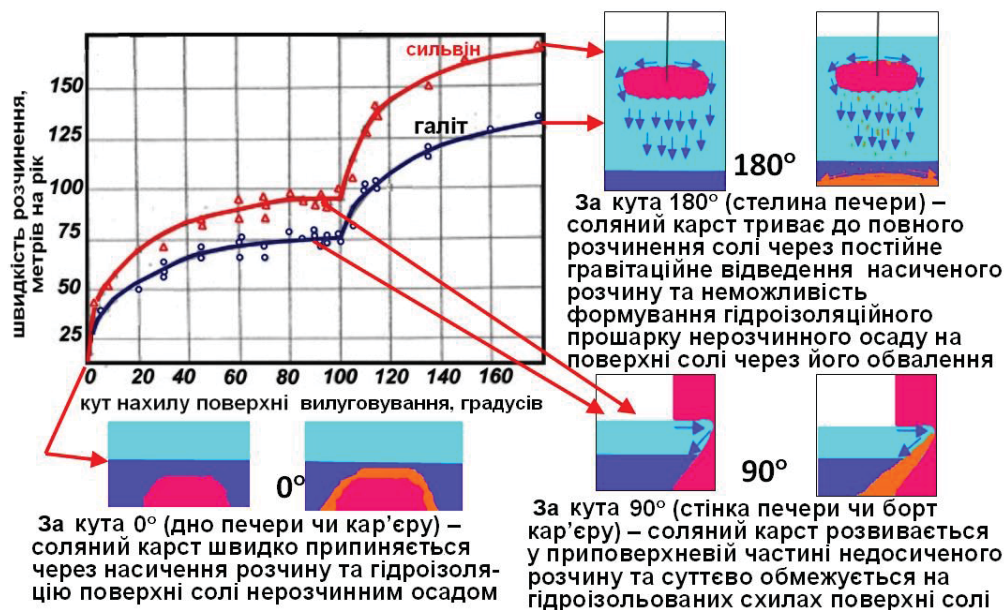


Рис. 2. Схема залежності швидкості розчинення сільвініту і галіту від нахилу поверхні розчинення при 25 °С, фізико-хімічного пригнічення карстового процесу насиченим розчином чи гідроізоляційного пригнічення за формування гідроізоляційного прошарку

Такий процес дуже добре описано на прикладі дисипативних систем. Уперше дисипативні структури описав І. Пригожин [4, 5] як відкриті нелінійні системи, які є далекими від стану термодинамічної рівноваги, завдяки розсіянню енергії, одержуваної ззовні. Дисипативні системи виникають тоді, коли первинні стійкі структури потрапляють у нерівноважне середовище, зазнають суттєвих змін в умовах, далеких від

термодинамічної рівноваги, доходять до точки невизначеності (біфуркації), де є вибір між подальшою деградацією та повним знищенням, з одного боку, та самоорганізацією за рахунок внутрішніх резервів, радикальною перебудовою внутрішньої будови з утворенням більш складної впорядкованої структури з метою “виживання” у несприятливих умовах.

Самоорганізація у точці біфуркації може розпочатись лише за умови різнонаправленості потоків енергії та речовини, наявності внутрішніх резервів та еволюції середовища. Водночас однонаправленість речовинно-енергетичних потоків, відсутність внутрішніх резервів та ознак еволюції середовища може призводити до остаточної деградації, коли в закритих системах немає рушійної сили самоорганізації (прагнення системи до мінімуму вільної енергії) – зупинити деградацію та хаос. Якщо еволюція середовища мінімізує ентропію (нерівноважні умови), відбувається самоорганізація динамічних систем, які називають дисипативними. До дисипативних систем належать просторові, тимчасові або просторово-часові структури, які можуть виникати далеко від рівноваги в нелінійній області, перейти в стан геохімічної рівноваги тільки шляхом стрибка (внаслідок нерівноважного фазового переходу), які, обмінюючись речовиною та енергією із середовищем, є структурно стійкими.

Як показали багаторічні комплексні польові та експериментальні дослідження розроблюваних соляних родовищ Карпатського регіону [1, 2, 3], динамічні системи соляно-глинистих мінеральних асоціацій в умовах агресивних середовищ є типовими дисипативними структурами, які, з одного боку, деградують, руйнуються, у яких настає хаос та дезінтеграція, а з іншого – у них виникають стабільні утворення, які підтримують стійкість у межах карстових каналів у гідрогеологічній системі рудника № 2 Стебницького родовища (рис. 3) чи, змінюючи напрямок підземного потоку, на прикладі Солотвинського родовища (рис. 4, 5).



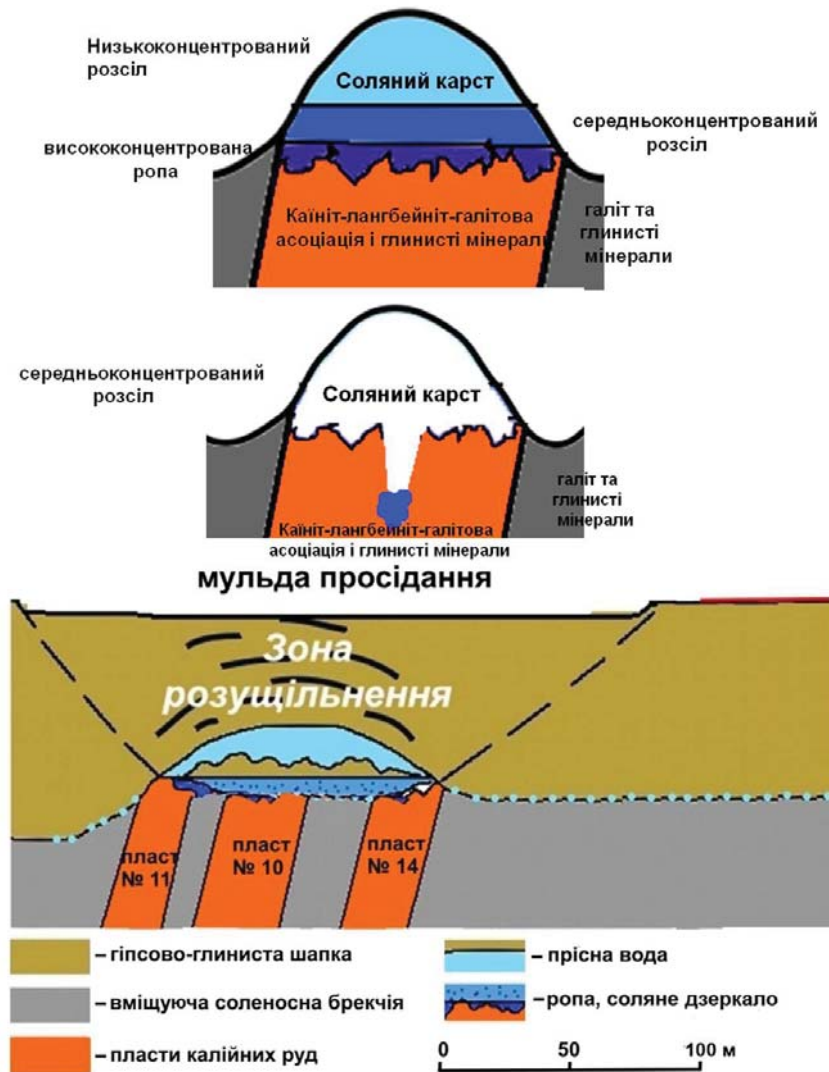


Рис. 3. Особливості руху підземних вод та розвитку закритого соляного карсту у напірному та безнапірному режимах карстової гідрогеологічної системи Стебницького родовища

Згідно із запропонованою принциповою схемою карстової гідрогеологічної системи Солотвинського родовища кам'яної солі, до осушення майже усіх Солотвинських соляних озер у районі Затону ці водойми, разом із водоприпливом на водозбірну площу, були зоною живлення карстової гідрогеологічної системи у періоди активізації карсту: звідси вода текла по зоні транзиту – карстовому каналу, локалізованому на рівні ерозійного зрізу неогенових відкладів північного краю Солотвинського соляного купола, який був гідравлічно відокремлений від провалу шахти № 7 та розвантажувався у провалі Чорний Мочар (рис. 4).

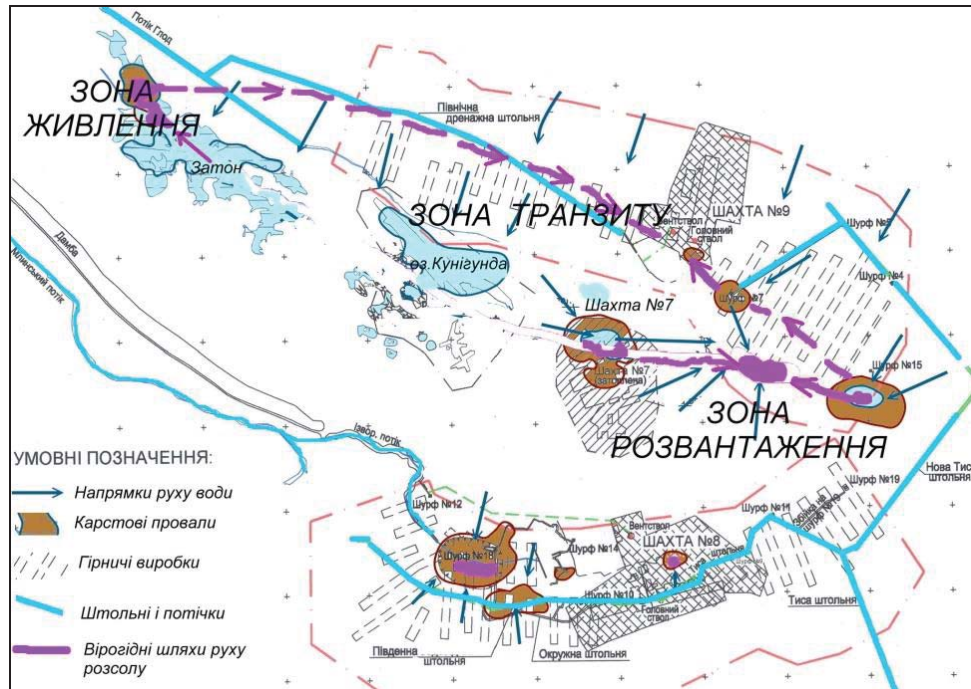


Рис. 4. Принципова схема функціонування карстової гідрогеологічної системи Солотвинського родовища кам'яної солі до осушення майже усіх Солотвинських соляних озер у районі Затону і повного затоплення шахти № 9 та розташування на ній зон живлення (Солотвинські соляні озера), транзиту (карстовий канал на рівні ерозійного зрізу неогенових відкладів по північному краю соляного купола) та розвантаження (провал Чорний Мочар і затоплювана шахта № 9)

Після припинення осушення шахти № 9, її повного затоплення, почалось заповнення карстових порожнин та відновлення статичних рівнів підземних вод, що спричинило інверсію локалізації зон живлення та розвантаження, коли на водозбірній площі провалу Чорний Мочар сформувалось озеро і надлишки його вод та вод із водозбірної площі шахти № 8 інфільтраційно розвантажувались у існуючий карстовий канал у зоні транзиту та розвантажувались у протилежному напрямку, у Солотвинські соляні озера, в районі Затону, знову їх наповнюючи, але вже опрісненою водою (рис. 5).

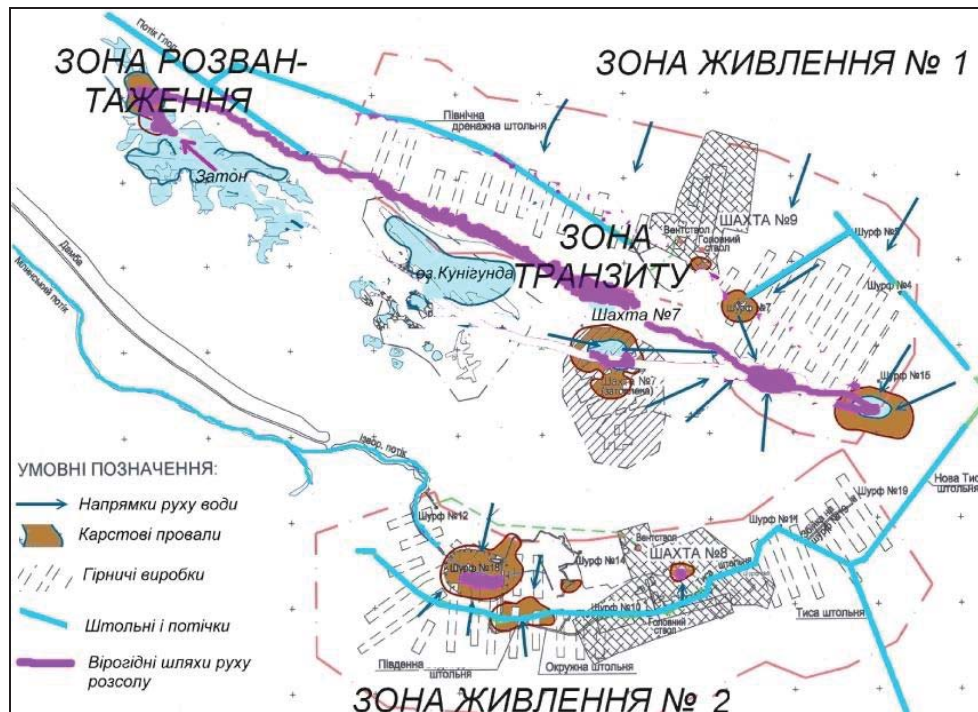


Рис. 5. Принципова схема функціонування карстової гідрогеологічної системи Солотвинського родовища кам'яної солі після повного затоплення шахти № 9 та розташування на ній зон живлення (водозбірні площі провалу Чорний Мочар та затопленої шахти № 8), транзити (карстовий канал на рівні ерозійного зрізу неогенових відкладів по північному краю соляного купола) та розвантаження (Солотвинські соляні озера)

Ці характеристики, за визначенням, є головними ознаками дисипативних систем. Унаслідок природної самоорганізації у таких системах можуть виникати стійкі структури, які існують за умови постійної дисипації, тобто втрати системою енергії. Таке визначення дисипативної системи свідчить про самоорганізацію як один з головних шляхів еволюції геохімічно-нестійких утворень – соляно-глинистих мінеральних асоціацій в умовах агресивних середовищ, ознаками якої є:

1) випадкова поведінка в точці біфуркації: від продовження хаосу (карстового процесу) до первинного спонтанного впорядкування (самоізоляції соляних відкладів); неможливість передбачити, в якому напрямі розвиватиметься система, чи залишиться стан хаотичним або вона перейде на новий рівень впорядкованості;

2) наявність декількох (як мінімум двох) різнонаправлених градієнтних потоків (первинного агресивного, що еволюціонує у вторинний низхідний підвищеної мінералізації, дифузійного, конвективного, седиментаційного, гідратаційного, дегідратаційного, елізійного, кристалізаційного), у полі яких формується стійкий примежовий гідроізоляційний прошарок (рис. 6);



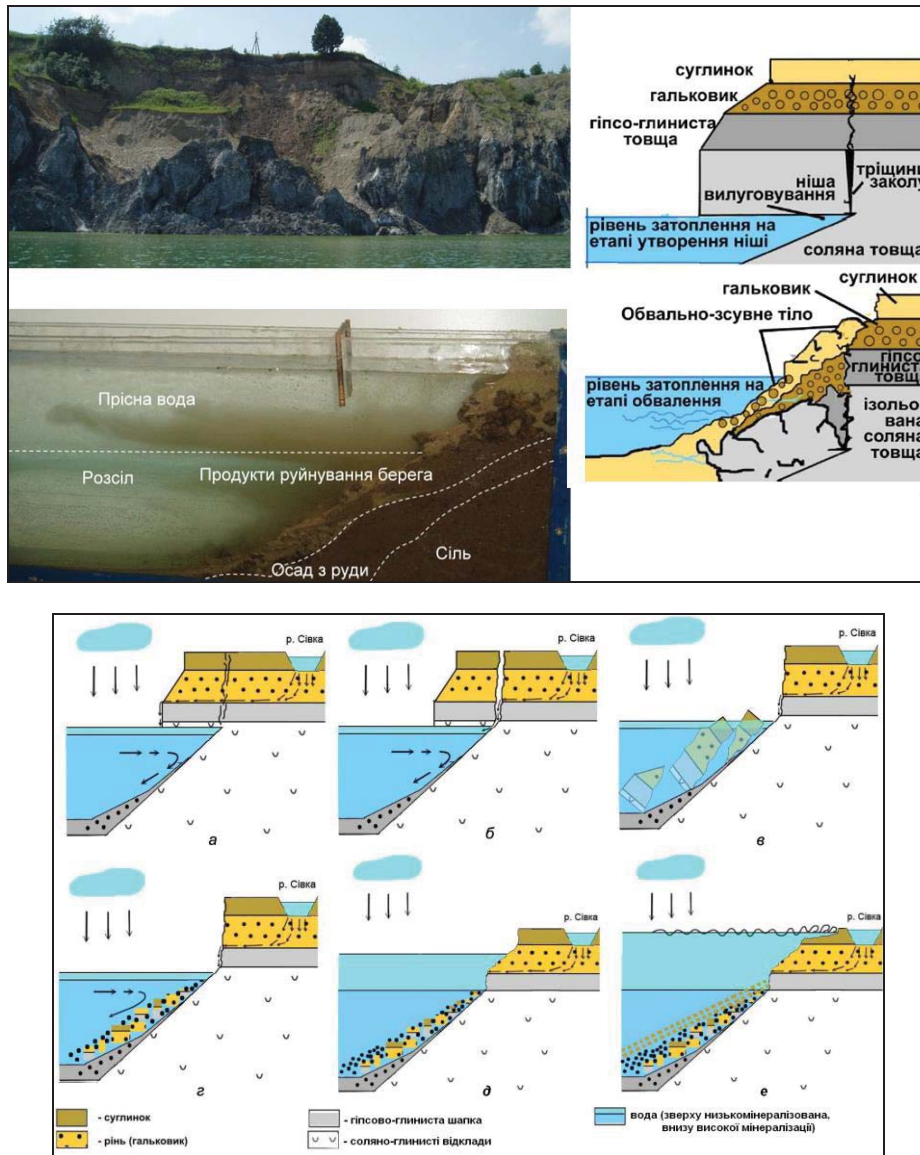


Рис. 6. Механізм формування стійкого гідроізолюючого прошарку соляно-глинистих відкладів на прикладі затоплення Домбровського кар'єру

3) кооперативна поведінка дизінтегрованих елементів системи на мікро- та макрорівні у процесі первинного спонтанного впорядкування: пептизація, коагуляція, фрагментація, седиментація, крупно-уламкове армування, гравітаційне сортування, формування кута стійкого відкосу, самоущільнення, кристалізація, цементація та ін.;

4) просторово-часова циклічність: зміна стадії вилугування легкорозчинних мінералів в агресивному середовищі на стадію вивільнення важкорозчинних та

нерозчинних компонентів, які тимчасово блокують дезінтеграцію і підтримують динамічну рівновагу, та стадію її порушення;

5) наявність чіткої об'ємної межі між дезінтегрованими елементами та впорядкованими структурами, яка різко блокує дезінтеграційні процеси, є важливим буфером та протектором від агресивного впливу на непорушені компоненти (рис. 6);

6) складність структури зв'язків між непорушеними компонентами, первинними впорядкованими структурами, потоками агресивного середовища, його рушійними силами, які можуть призводити до часткової втрати стійкості (рис. 6);

7) невідворотне "заліковування" порушеної об'ємної межі внаслідок часткової втрати стійкості у «згасаючому» режимі до відновлення порушеної динамічної рівноваги (рис. 3);

8) випадковість морфології новоутворених структур відповідно до принципу Кюрі, згідно з яким симетрія середовища визначає симетрію впорядкованих структур;

9) кінцева асиметричність та пірамідальність об'ємної межі між дезінтегрованими елементами та впорядкованими структурами, з широкою основою та звуженою вершиною, що забезпечують локалізованість та фізико-хімічну обмеженість зони дезінтеграції, стійке підживлення та просторово-часову стійкість дисипативних систем.

Для різних типів дисипативних систем обґрунтовано механізми дії та ефективність впливу мінералогічних протекторів на пригнічення техногенно-активізованого карсту, самоізоляцію солевмісних відходів та водорозчинних відкладів, демінералізацію розсолів, самоочистку повітря підземної атмосфери соляних шахт. У таких системах наявність глинистих мінералів, їх сорбційні та інші властивості значною мірою визначають динаміку проявів ефектів тампонування, соляно-глинистої та гіпсово-глинистої цементації, інгібування чи прискорення карстового процесу, гідроізолюваності геологічного середовища, захищеності підземних та поверхневих вод від різного ступеня мінералізованих розсолів.

Розроблено модель зворотного циклічного зв'язку функціонування дисипативних систем та їхньої еволюції у консервативні системи, яка є універсальною для кожного з об'єктів активізації техногенного карсту, та самоорганізації і еволюції дисипативних систем геохімічно-нестійких утворень – соляно-глинистих мінеральних асоціацій в умовах агресивних середовищ. З'ясовано, що для кожного окремого випадку: затоплювані соляні кар'єри та шахти, відкриті для атмосферних опадів, хвостосховища та солевідвали, підземний простір провітрюваних соляних копалень притаманні свої відмінності, які проявляються у механізмах дії та ефективності мінералогічних чи геохімічних протекторів на пригнічення техногенно-активізованого карсту, самоізоляції солевмісних відходів та водорозчинних відкладів, демінералізації розсолів. У дисипативних системах наявність глинистих мінералів, їх катіоно-обмінні, сорбційні та інші властивості значною мірою визначають динаміку проявів ефектів тампонування, соляно-глинистої цементації, інгібування чи прискорення карстового процесу, гідроізолюваності геологічного середовища, захищеності підземних та поверхневих вод від різного ступеня мінералізованих розсолів (рис. 7).

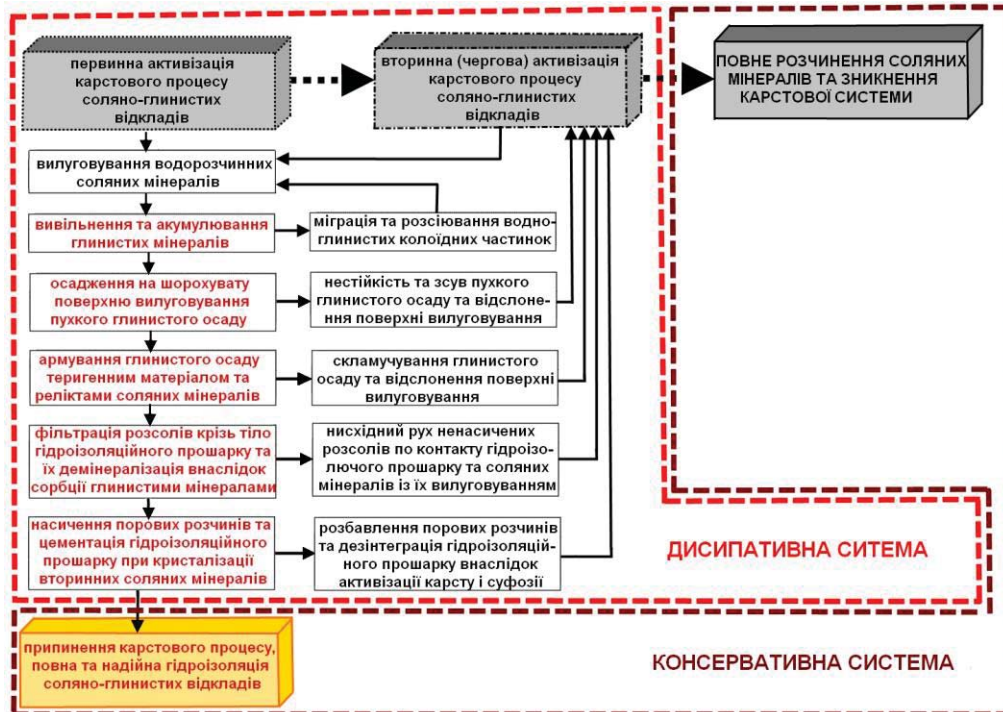


Рис. 7. Модель зворотного циклічного зв'язку функціонування дисипативних систем та їхньої еволюції у консервативні гідрогеологічні системи внаслідок активізації техногенного карсту

**Висновки.** За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. З'ясовано, що соляно-глинисті мінеральні асоціації в умовах техногенно-зміненого геологічного середовища соляних родовищ Карпатського регіону еволюціонують та самоорганізуються в умовах руху підземних вод, проявляються як карстові гідрогеологічні системи – дисипативні структури, що функціонують за принципом циклічного зворотного зв'язку процесів вилугування, акумулювання гідроізолюючого осаду, що пригнічує розчинення та його дезінтеграцію. У таких системах відбувається циклічна зміна стадії вилугування легкорозчинних мінералів в агресивному середовищі на стадію вивільнення важкорозчинних та нерозчинних компонентів, які блокують дезінтеграцію і підтримують динамічну рівновагу, та на стадію її порушення.

2. Розроблено моделі зворотного циклічного зв'язку функціонування дисипативних систем та їхньої еволюції у консервативні гідрогеологічні системи, яка є універсальною для кожного з об'єктів активізації техногенного карсту та самоорганізації і еволюції дисипативних систем геохімічно-нестійких утворень – соляно-глинистих мінеральних асоціацій в умовах агресивних середовищ. Виявлено, що для кожного окремого випадку – затоплювані соляні Домбровський кар'єр у Калуші та шахти у Стебнику та Солотвино, а також відкриті для атмосферних опадів хвостосховища та солевідвали – притаманні свої відмінності, які проявляються у механізмах дії та ефективності мінералогічних чи геохімічних протекторів на

пригнічення техногенно-активізованого карсту, самоізоляції солевмісних водорозчинних відкладів, демінералізації розсолів. У дисипативних системах наявність глинистих мінералів, їх катіоно-обмінні, сорбційні та інші властивості значною мірою визначають динаміку проявів ефектів тампонування, соляно-глинистої цементації, інгібування чи прискорення карстового процесу,

3. Обґрунтовано механізм та специфіку розвитку ніші вилуговування, визначено роль протекторних та прискорюючих чинників техногенно-активізованого карсту на підставі лабораторних та польових експериментів. Уперше обґрунтовано новий механізм просторово-часової мінливості зон живлення, транзиту, розвантаження вод та прискореного розвитку техногенно-активізованого карсту в умовах гірничо-зміненої гідрогеологічної системи Солотвинського соляного купола. Мінливі у часі і просторі потоки карстових вод пов'язують усі гірничі об'єкти (шахти № 7–9, дренажні штольні та шурфи, колишнє підземне сховище нафтопродуктів, соляні озера) в єдину гідрогеологічну систему. Незважаючи на те, що прискорений механізм розвитку техногенно-активізованого карсту функціонує у разі дефіциту мінералогічних протекторів у соленосній формації, його інтенсивність різко зменшується в умовах екзогенного пригнічення механічно-змішаними парастеричними (однопросторовими) мінеральними соляно-глинистими асоціаціями у приконтатовій зоні соляного купола.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дяків В. Експериментальне моделювання дезінтеграції галопелітових мінеральних асоціацій при затопленні рудника № 2 Стебницького ДГХП “Полімінерал” // Вісник Волин. ун-ту. 2007. Вип. 2. Ч. 2. С. 285–291.
2. Гайдін А. М., Дяків В. О. Умови формування прісноводної товщі в озері на місці соляного кар'єру : зб. наук. праць Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Природа Західного Полісся та прилеглих територій. № 7. Луцьк, 2010. С. 50–64.
3. Дяків В., Цар Х. Модель вилуговування, закарстовування та самоізоляції легкорозчинних солей з приповерхневих соляно-глинистих відкладів хвостосховищ і солевідвалів калійних родовищ Передкарпаття // Мінералогічний збірник Львівського університету. 2010. № 60. Вип. 2. С.136–147.
4. Николіс Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. Москва: Мир, 1979. 512 с.
5. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. Москва : Прогресс, 1986. 432 с.



## EVOLUTION AND SELF-ORGANIZATION OF KARSTS HYDROGEOLOGICAL SYSTEMS OF SALT DEPOSITS OF THE CARPATHIAN REGION

**Vasyl Dyakiv**

*Ivan Franko National University of Lviv,  
Hrushevsky Str., 4, Lviv, Ukraine, 79005  
e-mail: dyakivw@yahoo.com*

It has been established that hydrogeological systems in the conditions of the technologically altered geological environment of the salt deposits of the Carpathian region (Stebnytskyi, Kalush-Holinskyi, Sotolvynskyi) behave as typical dissipative systems capable of evolution and self-organization. The evolution of karst hydrogeological systems consists in their genesis associated with the beginning of inflows of karst waters into mining productions, the successive growth of their aggressiveness and flow, the activation of karst collapse phenomena, undercutting of walls in mines and sides in quarries, self-isolation of exits of easily soluble minerals and suppression of man-made activated karst, up to complete cessation when salt-snow deposits are completely flooded. Self-organization of karst hydrogeological systems occurs through a cyclic change of four stages: 1) leaching of easily soluble minerals in an aggressive environment; 2) release of poorly soluble and insoluble components; 3) inhibition of leaching due to temporary blocking of easily soluble minerals by a protective layer of the released insoluble residue of terrigenous and poorly soluble minerals; 4) erosion-corrosion disintegration of the protective layer with a cyclical transition to stage 1. The established regularities of the evolution and self-organization of karst hydrogeological systems make it possible to predict the state of mining massifs disturbed by mining operations and salt karst, as well as to propose scientifically based solutions geoecological problems.

*Key words:* karst hydrogeological system, Stebnyk, Kalush-Glolynsk, Sotolvynskyi deposits, Carpathian salt karst region, man-made activation, self-buffering effect, assessment, analysis, forecast.