

## ГІДРОГЕОЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ СОЛОТВИНСЬКОГО РОДОВИЩА КАМ'ЯНОЇ СОЛІ І ЇХ АНАЛІЗ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ (УКРАЇНА)

### HYDROGEOLOGICAL AND ECOLOGICAL PROBLEMS OF SOLOTVINO ROCK SALT DEPOSIT AND THEIR ANALYSIS USING MODELING (UKRAINE)

**Б. Д. Стеценко<sup>1,2</sup>, В. М. Шестопапов<sup>1</sup>, Ю. Ф. Руденко<sup>1</sup>**  
**Borys D. Stetsenko<sup>1,2</sup>, Vyacheslav M. Shestopalov<sup>1</sup>, Yurii F. Rudenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Radioenvironmental Centre, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601  
(stecenko@hydrosafe.kiev.ua)

<sup>2</sup> Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601

В даній статті викладено історичний аналіз фактичних матеріалів щодо еволюції гео-екологічних умов Солотвинського родовища кам'яної солі, починаючи з кінця XIX до початку XXI століття, і сучасний вплив цього, нині закритого, родовища на довкілля, зокрема, на якість води в р. Тиса. Створена чисельна гідродинамічна модель цього родовища. Розглянуті і узагальнені результати моделювання на ній процесу виникнення і нарощування припливів води в гірничі виробки цього родовища через вилуговування солі, утворення і розвитку карстового водоносного горизонту під шаром щільної четвертинної глини над сіллю, яка теж з часом місцями деградувала. Ця глина багато років до промислової розробки солі захищала цілісність тіла Солотвинського сольового покладу від його руйнування прісними підземними водами четвертинного водоносного комплексу. Через інтенсивне вилуговування солі в окремих сприятливих для цього місцях і умовах під шаром четвертинної глини утворювалися карстові канали і порожнини. Склепіння над деякими з порожнин з часом руйнувались з утворенням в рельєфі провальних карстових лійок, які ставали ефективними провідниками прісних вод з алювіальних галечників четвертинного водоносного комплексу до тортонського карстового горизонту. Розрахунок балансу обводнення четвертинного алювію і тортонського карстового горизонту показав значимість останнього для формування припливів води в гірничі виробки Солотвинського родовища, особливо, перед завершенням його експлуатації, коли припливи води стали надмірно великими для подальшої безпечної експлуатації родовища. Із зупиненням експлуатації родовища і затопленням його гірничих виробок екологічні проблеми Солотвинського родовища не закінчились, бо процес вилуговування солі продовжується через створені сприятливі умови для контактування прісної води з сіллю. Ці умови формувались протягом тривалого часу розробки солі, особливо в останні роки експлуатації даного родовища. Вилуговування солі створює такі екологічні проблеми, як зниження несучої здатності природної основи підмурків будівельних споруд м. Солотвино, загрожуючи їх руйнуванням, а також забруднює воду в р. Тиса, загрожуючи екологічною катастрофою водам Дунаю в разі раптового виходу великого об'єму солоних вод із затоплених гірничих виробок Солотвинського родовища за його межі. Наразі, за міжнародною програмою REVITAL, стоїть завдання організації комплексного моніторингу за станом підземної гідросфери Солотвинського сольового покладу, щоб вчасно виявити в ній небезпечні тенденції, спроектувати захисні роботи і попередити можливу катастрофу.  
*Ключові слова:* підземні води; Солотвинське родовище кам'яної солі; чисельне математичне моделювання; моніторинг; солоні води; карстова ліяка.

The historical analysis of empirical data on the evolution of geo-ecological conditions of Solotvino rock salt deposits, since the end of the XIX to the early XXI century and contemporary influence of this now closed field on the environment, particularly on water quality in Tisza riv. describes in this article. A numerical hydrodynamic model of this field has been created. The results of modeling of occurrence and increasing of water inflows into the mine workings of Solotvino deposits due to salt leaching, the formation and development of a karst aquifer under a layer of dense Quaternary clay, which also degraded in places are considered and generalized. Many years before the industrial development of salt this Quaternary clay reliably protected the integrity of the body of the Solotvino salt deposit from its destruction by the fresh underground waters of the Quaternary water-bearing complex. Due to the leaching of salt by fresh water, primarily in the network of remains of discontinuous tectonic disturbances under layer of Quaternary clay, karst cavities formed, arches over some of which collapsed over time with the

*Цитування:* Стеценко Б. Д., Шестопапов В. М., Руденко Ю. Ф. Гідрогеологічні проблеми Солотвинського родовища кам'яної солі і їх аналіз з використанням моделювання (Україна). Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2021. Т. 14, вип. 2. С. 111–128. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245937>.

*Citation:* Stetsenko B. D., Shestopalov V. M., Rudenko Yu. F., 2021. Hydrogeological problems of the Solotvino rock salt deposit and their analysis using modeling (Ukraine). Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Vol. 14 (2). Pp. 111–128. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245937> (In Ukrainian).

formation of karst funnels in the terrain, which became effective conductors of fresh water from the Quaternary alluvial complex in Tortonian karst aquifer. Calculation of the balance of water saturation of Quaternary alluvial pebble and Tortonian karst aquifer shows the significance of the latter for the formation of water inflows into the mine workings of the Solotvyno field, especially during the period when it was completed, when the water inflows, contrary to the opposition of the miners, became excessively large for safe operation of the field. With the cessation of exploitation of the field and the inundation of its mine workings, the environmental problems of the Solotvyno field did not end due to favorable conditions for fresh water to come into contact with salt. These conditions formed during long salt development, especially, for last years of exploitation of this field. Salt water of the karst horizon unloading in Tisha pollutes it, threatening an environmental catastrophe to the Danube if a large amount of salt water suddenly leaves the flooded mining of Solotvyno field. Currently, according to the international REVITAL program, the task is to organize comprehensive monitoring of the state of the underground hydrosphere of the Solotvyno salt deposit in order to identify dangerous trends in it in time, to design protection measures and to anticipate a possible catastrophe.  
 Key words: groundwater; Solotvyno rock salt deposit; numerical mathematical modeling; monitoring; salt water; karst funnel.

**ВСТУП**

В останні 12 років після припинення експлуатації Солотвинського соляного родовища виникла проблема засолення поверхневих і підземних вод, особливо це стосується р. Тиса, яка протікає поруч і є притокою р. Дунай. Джерелом засолення вказаних вод є винос розчиненої у воді солі за межі родовища. Після затоплення гірничих виробок винос солі прогресував через збільшення припливу у соль прісних підземних вод з четвертинного і неогенового водоносних горизонтів крізь природний шар глини на куполі соляного покладу. Полегшенню проникнення прісних вод у соль крізь шар глини сприяло його руйнування гірничодобувними роботами та утворення провальних карстових лійок, кількість і розміри яких з часом збільшуються.

Про негативні явища в тілі Солотвинського соляного покладу фахівці попереджали (Отчет..., 1989; Педченко, 1999; Хронология..., 2006, Стеценко, 2009) ще до закриття родовища. Вони вважали, що затоплення гірничих виробок і значне підвищення через це базису дренажу підземних вод на куполі соляного покладу приведе до зменшення виносу розчиненої солі за межі родовища і покращення стану довкілля, але їх думки не справдилися. Вилуговування і винос солі продовжується і навіть прискорився, можливо, через прогресуюче збільшення водопрпускнуї спроможності карстових каналів під шаром глини, підсилений позитивним зворотним зв'язком між цими процесами.

Метою даної роботи є аналіз геологічних і гідрогеологічних історичних даних щодо проблем Солотвинського родовища кам'яної солі під час і після завершення його експлуатації, а також впливу цього соляного покладу на довкілля, зокрема на якість води в р. Тиса.

Соляний поклад купольного типу в південно-східній частині Закарпатської області України на правому березі р. Тиса біля м. Солотвино

(рис. 1) приурочений до класичного діяпіру тортонського віку. З комерційною метою ця сіль активно розроблялась з кінця XIX ст., починаючи з центральної частини купола соляного покладу, де, прориваючи осадові вулканогенні тортонські породи, ця структура виходить під четвертинні відклади, а місцями і на поверхню землі. Це дозволяло видобувати корисну копалину відкритим кар'єрним способом, а також у неглибоких підземних виробках, робота в яких невдовзі припинялась через нестримні прогресуючі припливи води. Так були створені і закриті декілька руд-



**Рис. 1.** Розташування Солотвинського родовища кам'яної солі: 1 – контур родовища на позначці мінус 80 м; 2 – гідрологічна мережа; 3 – населений пункт.

**Fig. 1.** Solotvyno rock salt deposit location: 1 – the contour of deposit at elevation of –80 m; 2 – hydrological network; 3 – a settlement.

ників. Головними причинами поразок підприємців були надмірно великі місцеві ресурси підземних вод четвертинних галечників, недостатня протифільтраційна спроможність четвертинної глини на контакт із сіллю, порушеної гірничодобувними роботами, а також карстові процеси.

В західній частині покладу сіль ніколи не видобувалась через ризик її періодичного затоплення під час значного підйому рівня води в Тисі, зумовленого весняним таненням снігу або зтяжними дощами влітку і восени. Хоча ця територія зараз захищена від річкових вод дамбою, тісний зв'язок з Тисою в минулому дає підставу підозрювати наявність тут широко розвинутої, добре промитої мережі карстових каналів під шаром четвертинної глини, які здатні швидко затопити будь-які підземні виробки.

У другій половині ХХ ст. для промислової розробки солі були вибрані ділянки у південно-східній і північно-східній частинах купола соляного покладу, де сіль покрита не тільки четвертинними, але ще і тортонськими осадовими вулканогенними відкладами. Тут на південному фланзі східної частини покладу був споруджений рудник № 8, а на північному фланзі — рудник № 9 із системами дренажу четвертинних вод на підступах до гірничих виробок.

Однак і тут в основному з технічних причин (необережні гірничовибухові і розвідувальні роботи тощо) виникли припливи води, які через вилуговання солі з часом збільшувались до раптових місцевих проривів води в гірничі виробки. Поверхня землі над рудниками почала просідати. Утворились карстові лійки.

Боротьба з припливом води, як правило, складалась з ліквідації карстових лійок на поверхні землі і прочищення дренажних галерей і каналів, а також нарощування кількості і потужності насосного устаткування.

В 2008 р. через великі припливи підземних вод і деформування стволів шахт видобуток солі в обох згаданих вище сучасних рудниках був призупинений і було порушено питання про їх подальшу участь. У 2010 р. колегією Геологічної служби України за згодою Міністерства природних ресурсів України було прийнято рішення припинити розробку солі в межах Солотвинського родовища без можливості її поновлення у майбутньому.

У подальші роки через припинення відкачки води з підземних виробок рудників № 8 і 9 вони поступово заповнились прісною водою з четвертинного алювію і тортонського біля-сольового

горизонту, яка швидко насичилась сіллю до мінералізації 200–300 г/дм<sup>3</sup>. Зважаючи на об'єм гірничих виробок рудників № 8 і 9, а також раніше затопленого рудника № 7 та інших невеликих рудників у центрі купола соляного покладу, можна вважати, що сотні тисяч кубічних метрів солі опинились в потенційно рухливому стані, поступово забруднюючи навколишнє середовище, зокрема р. Тиса, яка протікає поряд із Солотвинським покладом.

За останні роки помічено, що мінералізація води в Тисі в районі м. Солотвино зростає. Це може бути пов'язано з поліпшенням умов для міграції накопичених солоних вод за межі соляного покладу через збільшення пропускної спроможності карстових каналів. Є припущення, що вилуговання солі, яке не припинилось, може сприяти прориву великого об'єму солоних вод із затоплених Солотвинських рудників у русло Тиси. Хоча поступове зростання концентрації солі у воді Тиси, можливо, відбувається не тільки через збільшення інтенсивності міграції Солотвинської солі в русло цієї річки, а і через зменшення її стоку під впливом глобального потепління клімату і надмірної вирубки лісу на схилах Карпат. Це ще треба вивчати, аналізуючи режимні дані гідрологічних, кліматичних та інших спостережень.

Територія, що розглядається, знаходиться поряд з державним кордоном України, яка тут межує з Румунією, Угорщиною і Словаччиною. Тиса несе свої води через кордони означених держав у Дунай, загрожуючи катастрофічним забрудненням його вод у випадку раптового прориву великого об'єму високомінералізованих вод у Тису. Така небажана перспектива спонукала наукову громаду вказаних вище держав включно з Україною розпочати дослідницькі роботи по вивченню геологічних і гідрогеологічних процесів у надрах Солотвинського соляного покладу, що ведуть до накопичення солоних вод у ньому, а також формування умов для їх можливого раптового прориву назовні у Тису.

У 2015 р. Міністерство закордонних справ України за ініціативи низки зацікавлених органів та угорські урядові і державні організації ініціювали звернення до Європейського Союзу щодо залучення експертної місії ЄС в Україну для проведення оцінки загроз і ризиків цієї надзвичайної ситуації. Наприкінці 2016 р. звіт з рекомендаціями експертної місії ЄС в Україну щодо ситуації в Солотвині було офіційно передано Міністерству закордонних справ України, Державній службі

з надзвичайних ситуацій (Shekhunova et al., 2020; Stoeckl et al., 2020).

Попередні дослідження міжнародного рівня за участі науковців Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України були зосереджені на виявленні та описі небезпечних геологічних процесів природного та природно-техногенного характеру, їх картуванні, аналізі та ранжируванні в рамках реалізації проєкту ImProDiReT-783232 (2018–2020 рр.) за підтримки Генерального Директорату Європейської комісії з питань цивільного захисту та гуманітарної допомоги DG ECHO. В результаті виконаних робіт територія Солотвина була умовно поділена на 16 зон, що характеризуються ймовірністю прояву природних і техногенних небезпечних геологічних процесів (Шехунова та ін., 2019; Shekhunova et al., 2019). Продовженням досліджень в цьому напрямі став грантовий проєкт «Екологічна оцінка можливостей відновлення природних ресурсів у Солотвино з метою запобігання подальшому забрудненню басейну Верхньої Тиси через підготовку комплексної системи моніторингу РЕВІТАЛ 1» (HURSKOVA/1702/6.1/0072, 2019–2021 рр.) у рамках програми транскордонного співробітництва Європейського інструменту сусідства Угорщина-Словаччина-Румунія-Україна. Основною метою вказаного проєкту є розробка постійно діючої комплексної системи моніторингу Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій. Частиною робіт за проєктом для досягнення цієї мети стали описані нижче дослідження.

#### ПРИРОДНІ УМОВИ РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Солотвинський соляний поклад знаходиться в центральній частині Солотвинської западини, де дуже розвинуті утворення тортонського і сарматського віків. Фундамент западини складається з дислокованих відкладів крейдового і палеогенового віків потужністю понад 1000 м.

Рельєф поверхні землі району досліджень має будову у вигляді східців з надзаплавних терас. Сам соляний поклад знаходиться в межах другої і частково першої надзаплавних терас. Розділяються ці тераси уступами висотою 25–30 м.

Північно-західна частина поверхні землі в межах купола соляного покладу має вигляд рівнини з багатьма озерами розміром 150–200 м і глибиною до 7 м. Загальний об'єм води в озерах сягає 60,7 тис. м<sup>3</sup> з середньою мінералізацією 132 г/дм<sup>3</sup>.

Основною водною артерією району досліджень є р. Тиса. За даними гідрологічного посту в м. Рахів максимальний потік води в річці становить 630–1500 тис. м<sup>3</sup>/добу, а мінімальний – 14,4–18 тис. м<sup>3</sup>/добу.

Основними правобережними притоками Тиси в районі соляного покладу є струмки: Млинський з максимальним стоком води 0,11 тис. м<sup>3</sup>/добу, Глод з максимальним стоком води 5,16 тис. м<sup>3</sup>/добу та Ізвор, потік води в руслі якого під час експлуатації Солотвинського родовища кам'яної солі залежав в основному від кількості злитих в нього шахтних вод і коливався в межах 0,025–0,58 тис. м<sup>3</sup>/добу з мінералізацією до 18 г/дм<sup>3</sup>.

Крім того, наявність давніх гірничих виробок і процеси вилуговування солі створили декілька безстічних ділянок, таких, наприклад, як болото Чорний Мочар площею близько 150 тис. м<sup>2</sup>, ділянка просядок у районі старого рудника № 7 площею майже 70 тис. м<sup>2</sup> і ділянка північно-західної частини купола соляного покладу (район Затону) площею 400 тис. м<sup>2</sup>.

У геологічній будові чохла району досліджень задіяні породи неогенової та четвертинної систем. Як попередню геологічну інформацію в роботі використано елементи інтегральної геологічної моделі Солотвинської солянокупольної структури, раніше розробленої в ІГН НАН України (Шехунова, 2007; Шехунова та ін., 2015; Яковлев та ін., 2016).

*Неогенова система* (міоцен). У районі місцезнаходження Солотвинського соляного покладу розвинуті відклади тортонського ярусу, які складені вулканогенно-осадковими породами.

*Четвертинна система* представлена в основному алювіальними відкладами Тиси. Алювіальні відклади ( $aQ_{IV}$ ) заплавної тераси розвинуті у вигині Тиси і простежуються у вигляді зони шириною 700–1200 м і довжиною 5000 м. Ці відклади складені валунами і грубою галькою з піском, глиною і гравієм, місцями до 50% за об'ємом. Біля корінних відкладів іноді трапляються лінзи глини і пісків. Потужність заплавних алювіальних відкладів знаходиться в межах 4–30 м.

Відклади першої надзаплавної тераси ( $aQ_{III}$ ) залягають у вигляді зони шириною не більше 200–400 м у західній і південній частинах купола соляного покладу. Породини представлені середньою і грубою галькою. Потужність цих відкладів становить 2–8 м.

Відклади другої надзаплавної тераси ( $aQ_{II}$ ) займають центральну і північну частини купола

покладу, залягаючи у вигляді зони шириною 500–2200 м. Відклади цієї тераси представлені галькою і гравієм з прошарками піску. Потужність сягає 20–30 м, іноді до 60 м.

Відклади третьої надзаплавної тераси (аQ) приурочені до південного схилу Мигурського хребта і представлені галечниками з різнозернистим піском потужністю до 10 м. Відклади цієї тераси поширені за межами соляного покладу.

В тектонічному відношенні район досліджень являє собою брахіантиклінальну складку, вздовж якої розвинута більша частина солянокупольної структури Солотвинської западини.

Падіння порід південно-західного і північно-східного крил даної солянокупольної структури біля ядра знаходиться в межах 30–45°. З віддаленням від ядра кути падіння зменшуються і на відстані 1,5 км не перевищують 3–4° (Фролов, 1971).

На контакті солі з навколишніми породами спостерігаються зони подрібнення та утворення брекчії.

Від границі соляного тіла у бік поширення навколишніх тортонських порід відходять невеликі розломи, виявлені в основному за гідрогеологічними даними. У північно-західній частині периклинцьованого замикання соляної складки, а також упоперек до її осі геофізичними дослідженнями виявлена серія розломів радіального характеру.

Основним джерелом обводнення гірничих виробок у межах Солотвинського родовища солі є надсольовий водоносний комплекс у четвертинних алювіальних відкладах, поширений на усій площі купола соляного покладу.

В четвертинних відкладах району досліджень виділено чотири водоносних горизонти (в алювіальних відкладах заплавної, першої, другої і третьої надзаплавних терас Тиси), пов'язаних між собою.

Горизонт ґрунтових вод у відкладах заплавної тераси поширений у вигині долини Тиси, що знаходиться в південно-західній частині Солотвинського родовища. Тут Тиса відходить від свого корінного берега майже на 2 км. Поверхня заплавної тераси уступом у 2 м піднімається над руслом Тиси. При цьому висота паводків Тиси сягає 4 м і більше, і тому на південному краю Затону була побудована захисна дамба.

Ґрунтові води заплави Тиси приурочені до галечників з високою водопровідністю (500–1000 м<sup>2</sup>/добу). Під галечником залягають тортонські аргіліти і пісковики.

Живлення водоносного горизонту заплавної тераси відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів і транзитного стоку Тиси при високій воді в її руслі.

Горизонт ґрунтових вод першої надзаплавної тераси з середньою потужністю 5–9 м поширений в південно-західній частині Солотвинського родовища, де покриває частину купола соляного покладу в Затоні. Максимальна потужність горизонту (30 м) спостерігається біля Солоних озер. Склад порід у розрізі такий, як у межах заплавної тераси, але їх водопровідність менша (50–200 м<sup>2</sup>/добу). Підземні води першої надзаплавної тераси в долині струмка Млинський використовуються для питного водопостачання (до 1200–2500 м<sup>3</sup>/добу) (Фролов, 1971). Живлення водоносного горизонту першої тераси відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів і припливу води з другої тераси, а розвантажується — в канал Тисаштольня і джерелами на березі Тиси.

Горизонт ґрунтових вод другої надзаплавної тераси відіграє велику роль в обводненні більшої частини Солотвинського соляного покладу. Він складений з галечнику з дрібним піском і глиною. Потужність горизонту над куполом соляного покладу знаходиться в межах 10–50 м і більше. Водопровідність шару глинистого галечника другої надзаплавної тераси становить 1–15 м<sup>2</sup>/добу (Коростошовец, 1957).

Основним джерелом живлення горизонту другої надзаплавної тераси є інфільтрація атмосферних опадів і водообмін з водоносним горизонтом третьої тераси.

Над куполом соляного покладу водоносний горизонт другої тераси відокремлений від солі шаром щільної глини із середньою потужністю 10–12 м, яка в природних умовах захищала рудне тіло від прісних вод четвертинного водоносного комплексу, деякою мірою стримуючи їх агресивну дію. Наразі цей шар глини під час гірничих робіт був місцями ліквідований, через що активізувались процеси карсту і прориви води в гірничі виробки в останні роки експлуатації Солотвинського родовища кам'яної солі.

Горизонт, приурочений до галечників третьої надзаплавної тераси Тиси, знаходиться на південному схилі Мигурського хребта. Потужність горизонту становить 4–6 м. Живлення підземних вод відбувається за рахунок атмосферних опадів і залучення підземних вод з корінних порід тортонського комплексу. Підземні води цього горизонту дренуються природними джерелами

на схилі хребта і в долині Тиси. Дані про фільтраційні параметри цього горизонту відсутні; згідно з дебітами джерел водопровідність порід цього горизонту мала. Горизонт знаходиться за межами Солотвинської солянокупольної структури і на її обводнення, вочевидь, не впливає.

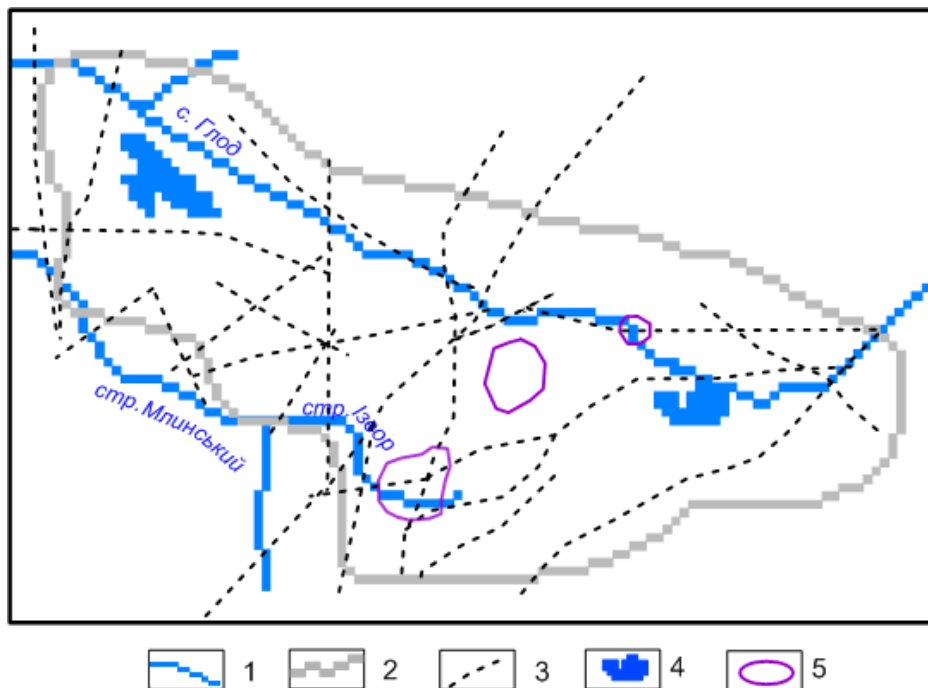
Аналіз умов водообміну в надсольових підземних водах алювіальних відкладів наприкінці періоду експлуатації Солотвинського родовища свідчив, що їх природний режим руху був суттєво деформований наявністю діючих гірничих виробок і провальних карстових лійок.

Водоносність порід тортонського віку (туфи, аргіліти, мергелі тощо) за межами соляного купола залежить від ступеня їх тріщинуватості. Так, у зонах розривних порушень вона сягає 100–200 м<sup>2</sup>/добу, а між порушеннями у верхній частині товщі тортонського комплексу — 1–10 м<sup>2</sup>/добу.

Підземні води в тортонських відкладах за межами соляного поклада формуються внаслідок інфільтрації атмосферних опадів, але головна область їх живлення знаходиться в межах південно-західного схилу Карпат, звідки вони вздовж зон тектонічних розломів приходять в район досліджень (Коростовоєв, 1957).

За даними геофізичних досліджень (Никитин, 1990), соляне тіло Солотвинського поклада за час свого існування багато разів порушувалося тектонічними розривами. Деякі відносно свіжі розриви показані на рис. 2.

На нашу думку, тектонічні розриви солі через прояв її пластичності під впливом гірського тиску повинні швидко закриватися і зникати, але залишки найбільших і найсвіжіших з них на куполі Солотвинського поклада збереглися у верхньому шарі солі у вигляді неглибоких, вузьких, видовжених каналів з ознаками дії карстових процесів, а на поверхні землі вони проявились у вигляді лінеamentів. Збереження цих залишків обумовлено недостатньою потужністю надсольових відкладів для утворення у верхньому шарі солі гірського тиску, спроможного швидко закрити ці розриви в присутності прісної води на границі між глиною і сіллю. Залишки більш старих розривів з часом були ліквідовані загальним винесенням солі в розчиненому вигляді з поверхні купола соляного поклада, залишаючи на місці дрібні нерозчинні мінеральні частинки, з яких поступово формувався шар щільної глини над сіллю.



**Рис. 2.** Схема тектонічних розривних порушень згідно з дешифруванням аерофотознімків і найбільші провальні карстові лійки в межах Солотвинського соляного покладу станом на 2006 р.: 1 — модельна гідрологічна мережа; 2 — умовна границя купола соляного покладу; 3 — тектонічне розривне порушення; 4 — болото у древній карстовій лійці; 5 — сучасна велика провальна карстова лійка.

**Fig. 2.** Scheme of tectonic fractures in according to interpretation of aerial photographs and largest fall karst funnels within Solotvino salt deposit: 1 — model hydrological network; 2 — conventional border of salt deposit dome; 3 — tectonic fracture; 4 — swamp within old karst funnel; 5 — large present-day fall-through karst funnel.

Вочевидь, більшість з цих залишкових каналів, насамперед широтного і південно-східного спрямування, сприятлива для латерального переносу води, що перетікає в тіло солі з обводненого четвертинного алювію крізь шар глини, а також з тортонського водоносного горизонту з північного і північно-східного боків соляного покладу, утворюючи під шаром четвертинної глини горизонт карстових вод.

В минулому, напевно, саме цей горизонт, утворюючи надмірно великі припливи води в копальні з недосконалою гідроізоляцією, унеможливив підприємцям видобувати сіль відкритим кар'єрним способом, а також у неглибоких підземних виробках у центральній частині Солотвинського покладу. Така розробка солі до того ж призводила до пошкодження шару глини над сіллю та утворенню техногенних тріщин у солі і, таким чином, збільшувала інтенсивність перетікання прісних підземних вод з четвертинних відкладів у тіло соляного покладу. Це, в свою чергу, підсилювало водопропускну дію мережі старих карстових каналів, залучаючи до неї також прісні води бокових тортонських вулканогенних відкладів.

В минулому, напевно, саме цей горизонт, утворюючи надмірно великі припливи води в копальні з недосконалою гідроізоляцією, унеможливив підприємцям видобувати сіль відкритим кар'єрним способом, а також у неглибоких підземних виробках у центральній частині Солотвинського покладу. Така розробка солі до того ж призводила до пошкодження шару глини над сіллю та утворенню техногенних тріщин у солі і, таким чином, збільшувала інтенсивність перетікання прісних підземних вод з четвертинних відкладів у тіло соляного покладу. Це, в свою чергу, підсилювало водопропускну дію мережі старих карстових каналів, залучаючи до неї також прісні води бокових тортонських вулканогенних відкладів.

В минулому, напевно, саме цей горизонт, утворюючи надмірно великі припливи води в копальні з недосконалою гідроізоляцією, унеможливив підприємцям видобувати сіль відкритим кар'єрним способом, а також у неглибоких підземних виробках у центральній частині Солотвинського покладу. Така розробка солі до того ж призводила до пошкодження шару глини над сіллю та утворенню техногенних тріщин у солі і, таким чином, збільшувала інтенсивність перетікання прісних підземних вод з четвертинних відкладів у тіло соляного покладу. Це, в свою чергу, підсилювало водопропускну дію мережі старих карстових ка-

налів, залучаючи до неї також прісні води бокових тортонських вулканогенних відкладів.

Утворенню тектонічних розривів і старих карстових порожнин у тілі Солотвинського соляного покладу, за даними роботи (Привалов, Панова, 2009), сприяли малоампліудна блокова будова земної кори даного нафтогазового району і газонасичені глибинні флюїди. Так, під час неотектонічних зрушень в режимі розтягування-стискання у верхні шари соляного покладу крізь щойно утворені ослаблені зони під дією напору піднімалися насичені вуглеводнями глибинні флюїди, де через зниження внутрішнього тиску розчинена газова складова прискорено залишала їх. Через бурхливу поведінку вільних газів, а іноді ще і пульсуючий («гейзерний») режим рідкої складової висхідний рух флюїдів був дуже неспокійним. Якщо на їх шляху траплялися раніше утворені горизонти підземних вод, то в місцях прямого контакту з флюїдами їх стан суттєво порушувався. Агресивна динаміка флюїдів у верхніх шарах соляного покладу тривала відносно недовго, але призводила до локально прискореного вилюговування солі з утворенням карстових порожнин.

Взагалі до інтенсивної промислової розробки солі тіло Солотвинського покладу не було серйозно пошкоджено карстовими процесами завдяки пластичності солі і шару щільних глин над нею. Хоча в сучасному рельєфі на куполі соляного покладу існують древні западини, що утворились внаслідок завалення склепінь карстових порожнин у солі, які з часом перетворились у болота й озера. Це свідчить про великі тектонічні зрушення з розривами тіла даної соляно-купольної структури, що відбулися в минулому, і в цих розривах циркулювала вода.

Карстові води на куполі соляного покладу займають майже всю його центральну і східну частини. Їх сучасне формування пов'язано зі спорудженням експлуатаційних і дренажних виробок, які штучно знизили базис дренажування. Водовідлив із гірничих виробок додатково збільшив інтенсивність перетікання прісних підземних вод у товщу кам'яної солі з надсоляних четвертинних і навколосоляних тортонських водоносних осадових вулканогенних порід. Це призвело до утворення нових і розширення старих карстових пустот, заповнених підземними водами.

Під час сучасної промислової розробки солі підземним способом загальний характер руху вод карстового горизонту був більш складний і прискорений через утворення мережі техно-

генних тріщин і наявності погано тампонованих розвідувальних свердловин, а також через безперервну відкачку води із гірничих виробок, що активізувало водообмін між геологічними структурами. Внаслідок цих причин підсилювався процес вилуговування солі зі стін залишків розривних тектонічних порушень і техногенних тріщин у солі з поступовим нарощуванням їх водопропускної спроможності. Прискорення циркуляції води в цих каналах розмивало і зменшувало щільність глини над сіллю аж до її обрушення в карстові порожнини, які утворюються часто на межі з тортонськими осадовими вулканогенними відкладами, або призводило до поступового зниження поверхні землі і сприяло поліпшенню гідравлічного зв'язку між підземними водами в четвертинних алювіальних відкладах і мережі карстових каналів у солі.

Карстові лійки розвинуті в основному в товщі пухких покривних порід. Вони приурочені до тектонічних порушень і ділянок поверхні землі над підземними виробками солі. Глибина лійок ще 20 років тому знаходилась в межах 0,7–8 м, а їх діаметр – 2–20 м. В останні роки експлуатації родовища і після її зупинення через надзвичайну активізацію карстових процесів і нестримні припливи води в гірничі виробки сучасних рудників № 8 і 9 розміри і кількість карстових лійок збільшились на порядок (Шехунова та ін., 2019; Shekhunova et al., 2020, 2021a, 2021b).

Більш конкретна інформація про горизонт карстових вод під четвертинними глинами з гідродинамічної точки зору відсутня, тобто нема фактичних даних про фільтраційні параметри розущільненого шару солі під четвертинною глиною і рівнів підземних вод у ньому. Відомо тільки, що при розкритті одного активного карстового каналу в районі тоді ще діючого рудника № 8 його розмір у перерізі становив  $0,4 \times 0,1$  м, а також, що водозбагаченість окремих ділянок карстового горизонту є досить високою і досягає  $500 \text{ м}^3/\text{добу}$  (Педченко, 1999). Так що можна очікувати, що ефективна товщина цього горизонту дуже мала у порівнянні з обводненою потужністю четвертинного водоносного комплексу (до 50 м, у середньому 15 м) і шару четвертинної глини над ним (до 35 м, у середньому 10 м). Але його водопропускна спроможність вздовж окремих каналів, приурочених до залишків тектонічних розривів під четвертинною глиною, може бути дуже значною.

Виникнення карсту на шахтному полі рудника № 8 пов'язано зі значним зниженням рівня базису дренування алювіальних вод, який під час його повноцінної роботи знаходився на рівні першого горизонту розробки солі (абсолютна позначка +212 м), а також розвитком депресійної воронки в підземних водах уздовж залишків минулих тектонічних і сучасних техногенних розривів солі.

Через інтенсифікацію карстових процесів у стелях деяких підземних виробок рудника № 8 утворились наскрізні промоїни. Ситуація була ускладнена великими площами стель відпрацьованих забійних камер, які до зупинення роботи рудника у 2010 р. були ділянками розвантаження карстових вод. До 2000 р. у межах площі Солотвинського родовища щороку вилуговувалось  $25\text{--}90$  тис.  $\text{м}^3$  кам'яної солі, тобто щоденно утворювалось і виходило назовні  $300\text{--}820 \text{ м}^3/\text{добу}$  соляної ропи з умовною концентрацією  $\text{NaCl } 300 \text{ г/дм}^3$  (Педченко, 1999).

Засипка діючих карстових лійок, що почалась з 1975 р., скоротила припливи води у виробки рудника № 8. Процеси утворення карсту, що досягали значних глибин, після засипки обмежились зоною циркуляції прісних надсолевих вод, трохи збільшуючи активність в періоди інтенсивних атмосферних опадів або сніготанення.

В перші роки XXI ст. через поганий тампонаж деяких розвідувальних свердловин і необережні гірничовибухові роботи, що призвели до збільшення фільтраційної проникності солі в стелях гірничих виробок і соляних останцях між діючими і старими затопленими виробками, почалась активізація формування карсту і виникли прориви карстових вод у гірничі виробки рудника № 9 (Педченко, 1999).

Враховуючи складність гірничо-геологічних і гідрогеологічних умов району досліджень, для аналізу його гідрогеоекологічних проблем було використано чисельне моделювання.

#### ГІДРОГЕОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

В основу гідрогеологічної моделі району досліджень була покладена наступна система диференційних рівнянь фільтрації підземних вод в усталеному режимі в трьох водоносних шарах. Шари розташовані поверхово один над одним і взаємодіють між собою завдяки перетіканню води між ними крізь відносно слабо проникні роздільні шари (1).



$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_1 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right] + \left( \frac{k_o}{m_o} \right)_1 (H_1 - H_2) + W = 0 \quad ,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_2 \frac{\partial H_2}{\partial y} \right] + \left( \frac{k_o}{m_o} \right)_1 (H_2 - H_1) + \left( \frac{k_o}{m_o} \right)_2 (H_2 - H_3) = 0 \quad , (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (km)_3 \frac{\partial H_3}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (km)_3 \frac{\partial H_3}{\partial y} \right] + \left( \frac{k_o}{m_o} \right)_2 (H_3 - H_2) = 0 \quad ,$$

де  $H_1$ ,  $H_2$  і  $H_3$  – абсолютні позначки рівнів підземних вод у четвертинному алювії, тортонському карстовому горизонті і горизонті в зоні розташування гірничих виробок, м;

$(km)_1$ ,  $(km)_2$  і  $(km)_3$  – коефіцієнти водопровідності водоносних шарів моделі, які згідно з індексами 1, 2 і 3 відносяться до четвертинного, карстового і технічного водоносних горизонтів, останній розташований в зоні соледобувних гірничих виробок, м<sup>2</sup>/добу, де  $k$  і  $m$  – коефіцієнт фільтрації (м/добу) і потужність (м) обводненої частини водоносного шару відповідно індексу 1, 2, 3;

$W$  – інтенсивність інфільтраційного живлення підземних вод, м/добу;

$(k_o/m_o)_1$  і  $(k_o/m_o)_2$  – відповідно коефіцієнт вертикальної питомої проникності шару четвертинної глини над карстовим водоносним горизонтом і захисного шару відносно щільної солі над зоною розташування підземних гірничих виробок, доба<sup>-1</sup>.

Водообмін при такій шаровій будові підземної гідросфери регулюється передумовами Дюпюї і Мятієва-Гиринського, згідно з якими у водоносних шарах моделі підземні води рухаються тільки горизонтально, а в роздільних шарах, представлених відносно слабо проникними породами, тільки вертикально.

Наведена система диференціальних рівнянь, представлених в різницевій формі, реалізувалась за допомогою комп'ютерної програми MODFLOW з пакету PMWIN (Ciang, Kinzelbach, 2001).

Для використання програми MODFLOW область моделювання, що охоплює ділянку міжріччя Тиса-Апшица, була розбита нерівномірною прямокутною сіткою на розрахункові блоки з розмірами від 25 × 25 м у межах купола соляного покладу до 250 × 250 м на периферії моделі.

За допомогою граничної умови 3-го роду на моделі відтворювались річки, струмки, озера і болота.

Модель складалась з трьох водоносних шарів з двома роздільними відносними водотривами між ними.

Перший водоносний шар моделі відтворював обводнений четвертинний алювій.

Другий водоносний шар відтворював тортонський водоносний горизонт. У межах купола соляного покладу другий водоносний шар моделі імітує горизонт карстових вод, розташований під четвертинною глиною і приурочений до тектонічних і техногенних розривних порушень, а також до старих неглибоких затоплених гірничих виробок.

Перші два водоносних шари моделі (четвертинний водоносний комплекс і тортонський водоносний горизонт) відділені один від одного в розрізі відносно слабо проникним шаром четвертинної глини.

В підшві горизонту карстових вод знаходиться шар відносно щільної солі, який разом з четвертинною глиною повинен був захищати підземні гірничі виробки під час розробки солі від проникнення в них підземних вод крізь їх стелі в межах шахтних полів діючих рудників № 8 і 9.

Третій водоносний шар імітує простір гірничих виробок, порожніх під час розробки солі, і як звичайний гідродинамічний горизонт після їх затоплення через зупинення відкачки шахтних вод на поверхню.

В умовах розробки солі шар гірничих виробок є допоміжним для реалізації правила «капання» води всередину порожніх виробок діючих рудників № 8 і 9.

Приплив води в гірничі виробки діючих рудників № 8 і 9 крізь шар відносно щільної солі в їх стелях на моделі відбувається за правилом імітування процесу «капання»:

$$q = \left( \frac{k_o}{m_o} \right)_2 (H_2 - \underline{H}_2) \quad , (2)$$

де  $q$  – інтенсивність припливу води на одиницю площі шахтного поля, м<sup>3</sup>/(доба·м<sup>2</sup>);

$(k_o/m_o)_2$  – коефіцієнт питомої проникності відносно щільного, слабо проникного шару солі над діючими гірничими виробками, доба<sup>-1</sup>;  $H_2$  – позначка рівня води в другому (карстовому) водоносному шарі, м;  $\underline{H}_2$  – позначка підшви другого водоносного шару, м.

Значення позначок підшви другого водоносного шару  $\underline{H}_2$  (карстовий горизонт) у межах площ шахтних полів рудників № 8 і 9 попередньо вносяться в файл банку даних програми MODFLOW, призначений для збереження початкових позначок рівнів підземних вод (Initial @ Prescribed Hydraulic Head), в третій водоносний

шар і фіксуються граничною умовою 1-го роду. Тоді процес «капання» буде виконуватися моделюючою програмою за формулою (2) автоматично.

Для узагальнених модельних розрахунків даної роботи позначки підшви карстового водоносного горизонту в межах шахтних полів рудників № 8 і 9 наближено визначались як різниця між модельними позначками рівнів підземних вод першого водоносного шару, що існували до початку роботи означених вище рудників, і середньої загальної потужності обводненої частини четвертинних галечників і глини під ними ( $15 + 10 = 25$  м). Потужність карстового горизонту не враховувалась через її незначну середню величину ( $< 0,5$  м) і велику мінливість в плані.

Без фіксації заданих позначок підшви другого водоносного шару в межах площ шахтних полів рудників № 8 і 9 граничною умовою 1-го роду моделююча програма MODFLOW розглядає шар гірничих виробок як звичайний водоносний шар і відтворює латеральний рух підземних вод у затоплених гірничих виробках під дією горизонтального гідравлічного градієнта з можливістю водообміну із сусіднім горизонтом карстових вод крізь шар відносно щільної солі над ним під дією вертикального гідравлічного градієнта.

В межах шахтних полів раніше діючих рудників № 8 і 9 значення коефіцієнта вертикальної питомої проникності шарів глини і солі над гірничими виробками були підібрані до отримання на моделі фактичних припливів води в гірничі виробки крізь площі шахтних полів цих рудників у 2000 і 2006 рр., а на решті території моделювання вертикальна питома проникність другого відносно водотривкого шару солі задавалась на моделі достатньо малою ( $< 10^{-7}$  доба<sup>-1</sup>), щоб водообміном крізь нього можна було нехтувати.

Оскільки, за даними (Shestopalov, Hural', 2008), модуль підземного стоку в районі даних досліджень знаходиться в межах  $5-7$  дм<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>), що відповідає інтенсивності інфільтраційного живлення підземних вод на рівні  $160-220$  мм/рік, на гідрогеологічній моделі району досліджень середня багаторічна інтенсивність інфільтраційного живлення підземних вод атмосферними опадами задавалась  $200$  мм/рік ( $0,00056$  м/добу), а для випадку аномального інфільтраційного живлення підземних вод через довготривалі дощі та інтенсивне сніготанення —  $300$  мм/рік ( $0,00084$  м/добу).

Значення коефіцієнтів водопровідності четвертинного водоносного комплексу на моделі, за

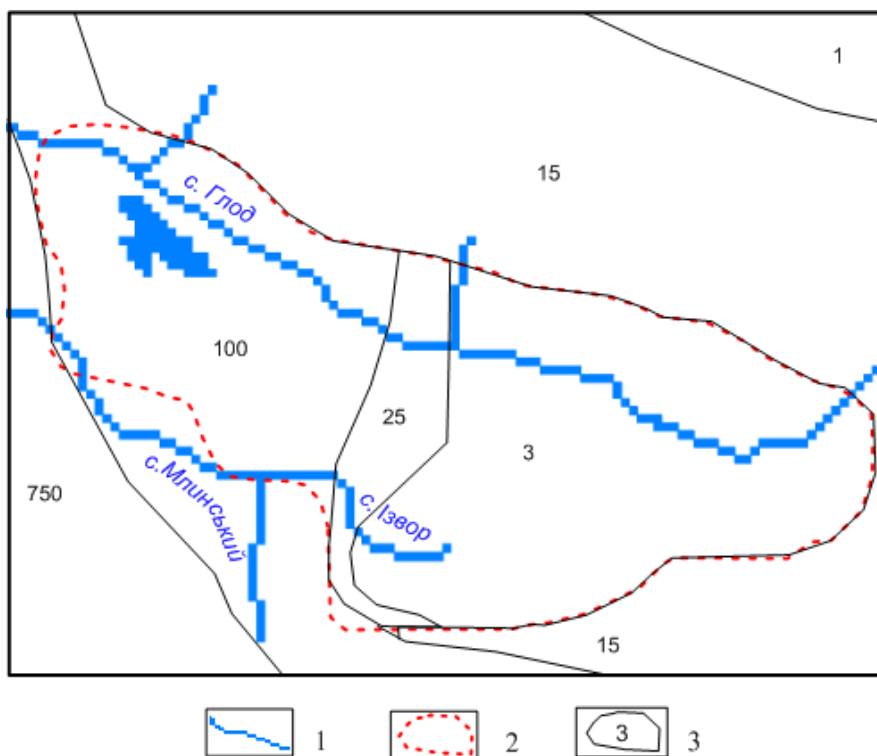
винятком купола соляного покладу, відповідає їх розподілу, описаному вище в розділі «Природні умови району досліджень». В межах купола соляного покладу ці значення корегувались до задовільного збігу модельних і фактичних рівнів підземних вод станом на 1991 р. (рис. 3). Для деталізації схеми водопровідності розущільненої солі тортонського карстового горизонту була використана схема неглибоких карстових каналів під четвертинною глиною, що залишилися від тектонічних розривних порушень солі в центральній і східній частинах купола цього покладу (рис. 4), що щільно закрились через пластичність солі. Тут значення водопровідності солі вздовж цих карстових каналів підбиралися до задовільного збігу модельних і фактичних припливів води в гірничі виробки рудників № 8 і 9, зафіксованих на початку 2000 р. (рудник № 8— $760$  м<sup>3</sup>/добу і рудник № 9— $212$  м<sup>3</sup>/добу) на тлі щільної солі в просторах між найбільш великими розривами.

В районі Затону (західна частина купола соляного покладу, яка до спорудження захисної дамби періодично заливалась паводковими водами Тиси) водопровідність тортонської солі в другому (карстовому) водоносному шарі на моделі задавалась одним числом ( $100$  м<sup>2</sup>/добу).

Калібрування моделі за даними про рівні підземних вод у мережі спостережних свердловин дозволило уточнити розподіл водопровідності галечників четвертинного водоносного комплексу і розущільненої солі тортонського карстового горизонту в межах купола соляного покладу, а також підібрати середні значення вертикальної питомої проникності товщі солі над шахтними полями рудників № 8 ( $2 \cdot 10^{-4}$  доба<sup>-1</sup>) і № 9 ( $4,5 \cdot 10^{-5}$  доба<sup>-1</sup>) під час розробки солі у 2000 р. (рис. 5). Варто зазначити, що підібрані значення питомої проникності шару солі над цими шахтними полями наближені і їх треба інтерпретувати тільки на рівні порядків отриманих значень.

#### АНАЛІЗ ОБВОДНЕННЯ РОДОВИЩА ТА ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ

Порівняння схем рівнів і балансу підземних вод у природних умовах і під час розробки солі у 2000 р. показало, що розвантаження підземних вод четвертинних галечників і тортонського карстового горизонту в гірничі виробки і захисну дренажну систему призвів до зниження рівнів ґрунтових вод на центральній і східній половині купола соляного покладу від  $1$  до  $8$  м, у середньому на  $2-4$  м. Це зниження частково зумовлене



**Рис. 3.** Фрагмент схеми водопровідності порід четвертинного водоносного комплексу в межах купола Солотвинського соляного покладу: 1 – модельна гідрологічна мережа; 2 – умовна границя купола соляного покладу; 3 – значення коефіцієнтів водопровідності четвертинних порід в межах купола Солотвинського соляного покладу, м<sup>2</sup>/добу.

**Fig. 3.** Fragment of scheme of Quaternary aquifer transmissivity within the dome of Sototvyno salt deposit: 1 – model hydrological network; 2 – conventional border of salt deposit dome; 3 – values of transmissivity coefficients of Quaternary rocks within the dome of the Sototvyno salt deposit, m<sup>2</sup>/day.

дією системи дренажних галерей на підступах до шахтних полів діючих рудників, а частково – перетіканням ґрунтових вод у карстовий горизонт і в гірничі виробки.

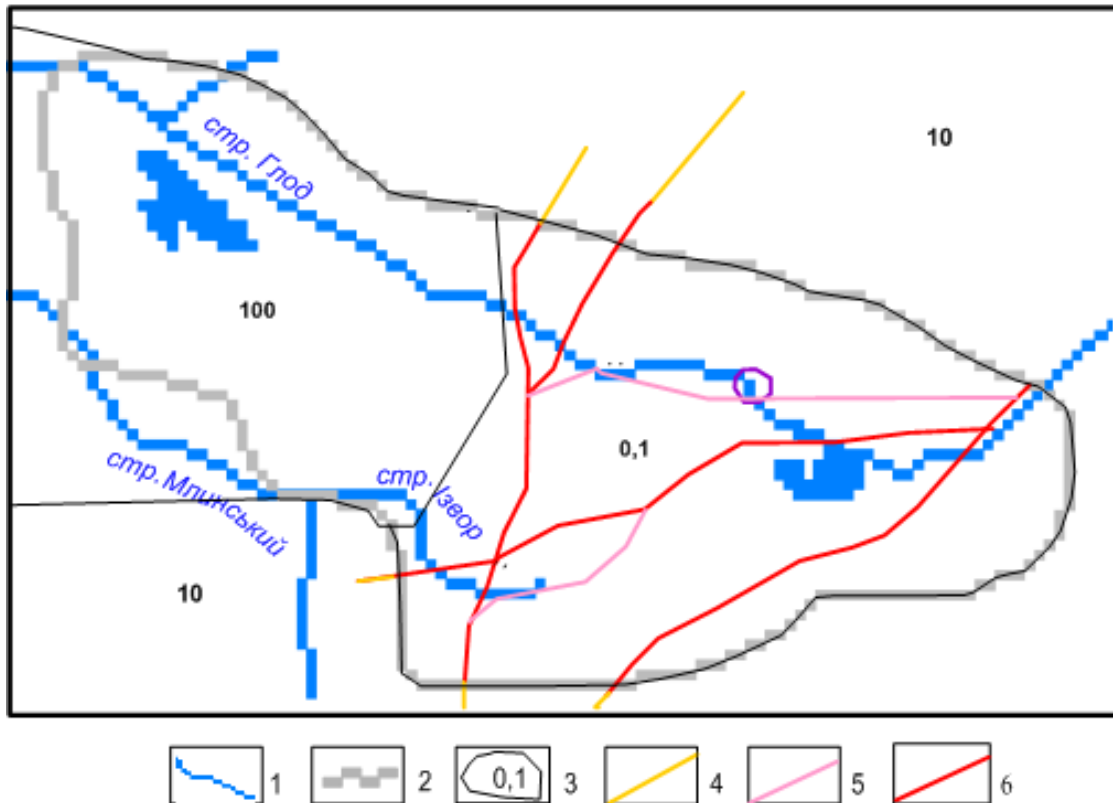
В 2000 р. близько половини ресурсів підземних вод четвертинного і тортонського комплексів у межах шахтного поля рудника № 8 перетікали в його гірничі виробки, а в межах шахтного поля рудника № 9 – лише 10%. Розробка солі до того ж збільшувала обводнення четвертинного алювію і розущільненої тортонської солі (карстового водоносного горизонту) над площами шахтних полів діючих рудників через інтенсифікацію підтягування води з-поза їх меж за сприянням мережі залишків тектонічних і сучасних техногенних тріщин.

В періоди довготривалих дощів або інтенсивного сніготанення обводнення купола Солотвинського соляного покладу і, зокрема, площ над шахтними полями у 2000 р. могло збільшуватись на 10–20%. При цьому приплив води в гірничі виробки зростав тільки на 5–8%, якщо не враховувати можливість різкого підвищення пропускної

спроможності карстових порожнин через прискорення вилюговування солі.

Взагалі поступове ущільнення мережі і збільшення водопропускної спроможності карстових каналів у межах центральної і східної частин купола Солотвинського соляного покладу знищило Солотвинське родовище. Так, у 2001 р. у східні камери рудника № 9 біля болота Малий Мочар почав надходити досить значний приплив води. Він зберігав тенденцію до зростання, незважаючи на всі необхідні заходи гірників і в 2006 р. досяг 120 м<sup>3</sup>/год (2880 м<sup>3</sup>/добу), після чого розробка солі в руднику була призупинена.

Для того, щоб відтворити на невеликій ділянці східної частини шахтного поля рудника № 9 біля болота Малий Мочар приплив води в гірничі виробки інтенсивністю до 3000 м<sup>3</sup>/добу значення коефіцієнта вертикальної питомої проникності шару четвертинної глини над карстовим горизонтом було збільшено до 0,05 доба<sup>-1</sup>, а шару щільної солі до 0,1 доба<sup>-1</sup>, імітуючи таким чином значну деградацію захисних шарів у цьому місці.



**Рис. 4.** Фрагмент схеми водопровідності порід тортонського водоносного комплексу в районі Солотвинського соляного покладу: 1 – модельна гідрологічна мережа; 2 – контур купола соляного покладу; 3 – водопровідність карстового горизонту в східній частині купола соляного покладу; 4 – тектонічна зона в карстовому горизонті з водопровідністю 100 м<sup>2</sup>/добу; 5 – тектонічна зона в карстовому горизонті з водопровідністю 500 м<sup>2</sup>/добу; 6 – тектонічна зона в карстовому горизонті з водопровідністю 1000 м<sup>2</sup>/добу.

**Fig. 4.** Fragment of Scheme of transmissivity of Tortonian aquifer complex within the region of Solotvyno salt deposit: 1 – model hydrological network; 2 – contour of salt deposit dome; 3 – transmissivity of karst aquifer in eastern part of the dome of Solotvyno salt deposit; 4 – tectonic zone in karst aquifer with transmissivity 100 m<sup>2</sup>/day; 5 – tectonic zone in karst aquifer with transmissivity 500 m<sup>2</sup>/day; 6 – tectonic zone in karst aquifer with transmissivity 1000 m<sup>2</sup>/day.

З точки зору практичної гідрогеології значення коефіцієнта вертикальної питомої проникності глини і солі 0,05–0,1 доба<sup>-1</sup> означає, що цей захисний бар'єр у межах невеликої ділянки східної частини шахтного поля рудника № 9 зруйнувався. Це дозволило прісній воді з четвертинного алювію прискорити перетікання в карстовий горизонт, а звідти майже вільно перетікати в гірничі виробки цього рудника.

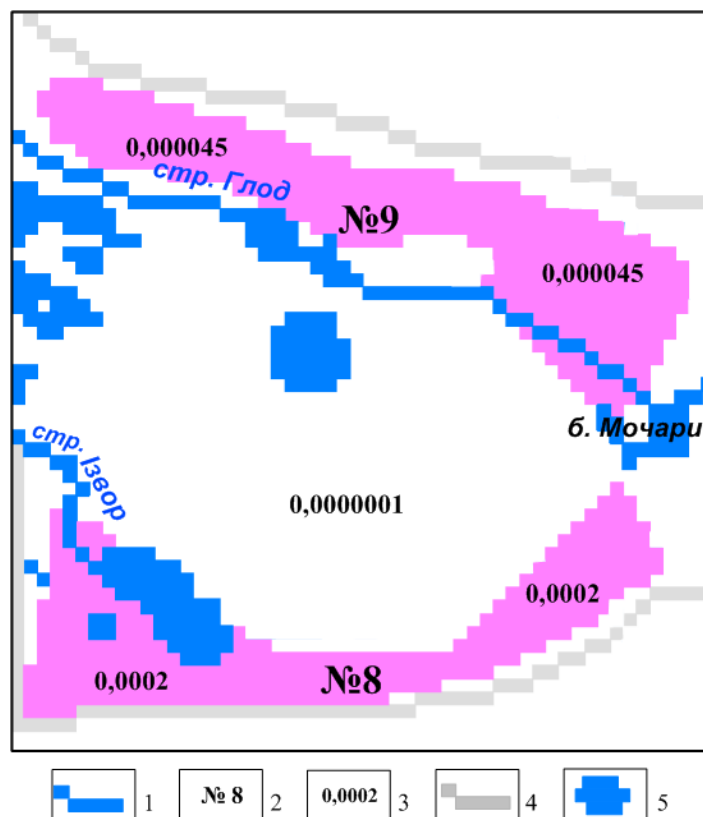
Різне збільшення проникності солі над східними гірничими виробками рудника № 9 призвело до зниження рівнів підземних вод четвертинного комплексу біля боліт Малий і Чорний Мочари до 22 м, а над рудником № 8 – до 2–10 м, що говорить про значне осушення четвертинного алювію.

Ці прогресуючі явища спостерігались на Солотвинському родовищі і в наступні роки, до-

поки не була зупинена дія системи водовідливу рудничних вод з гірничих виробок рудників № 8 і 9. Після цього вказані рудники були затоплені, а в карстових провальних ліях з'явилась відкрита вода.

Спроба відтворити приплив води в гірничі виробки східної частини рудника № 9 інтенсивністю 3000 м<sup>3</sup>/добу без участі карстового горизонту показала, що зробити це тільки за рахунок четвертинного водоносного алювію неможливо. Це вдається тільки завдяки залученню води з-поза меж шахтного поля цього рудника через мережу промитих каналів карстового водоносного горизонту, зокрема з боліт.

В центральній і східній частинах соляного купола, де власне і знаходилось родовище солі в період її розробки, ці канали часто пов'язані із



**Рис. 5.** Фрагмент схеми питомої проникності шару щільної солі над гірничими виробками Солотвинського родовища на початку 2000 р.: 1 – модельна гідрологічна мережа; 2 – номер рудника № 8; 3 – значення коефіцієнта питомої проникності солі над гірничими виробками Солотвинського родовища, доба<sup>-1</sup>; 4 – умовна границя куполу соляного покладу; 5 – провальна карстова лійка.

**Fig. 5.** Scheme of specific leak-permeability of layer of dense salt over mines of Soltvyno deposit at the beginning of 2000 year: 1 – model hydrological network; 2 – mine № 8; 3 – layer of dense salt with average specific leak-permeability of 0.0002 day<sup>-1</sup> over mines; 4 – conventional border of salt deposit dome; 5 – fall-through karst funnel.

сучасними і древніми провальними карстовими лійками, наприклад під болотами Малий і Чорний Мочари, що розташовані у верхів'ї струмка Глод біля його лівого берега.

З цього приводу значний інтерес становить оцінка впливу окремих карстових каналів під шаром четвертинної глини, що залишились від минулих тектонічних розривних порушень, на обводнення площ над шахтними полями рудників № 8 і 9. Поблочний розрахунок потоків підземних вод на ділянках границь шахтних полів у місцях їх перетину з карстовими каналами показав, що вже у 2000 р. вони забезпечували половину обводнення шахтного поля рудника № 8 і третину обводнення шахтного поля рудника № 9. Тобто в обводненні шахтних полів рудників № 8 і 9 суттєве значення може мати мережа карстових каналів тектонічного походження, завдяки якій

збільшуються площі підтягування води навкруги них і темпи їх припливу.

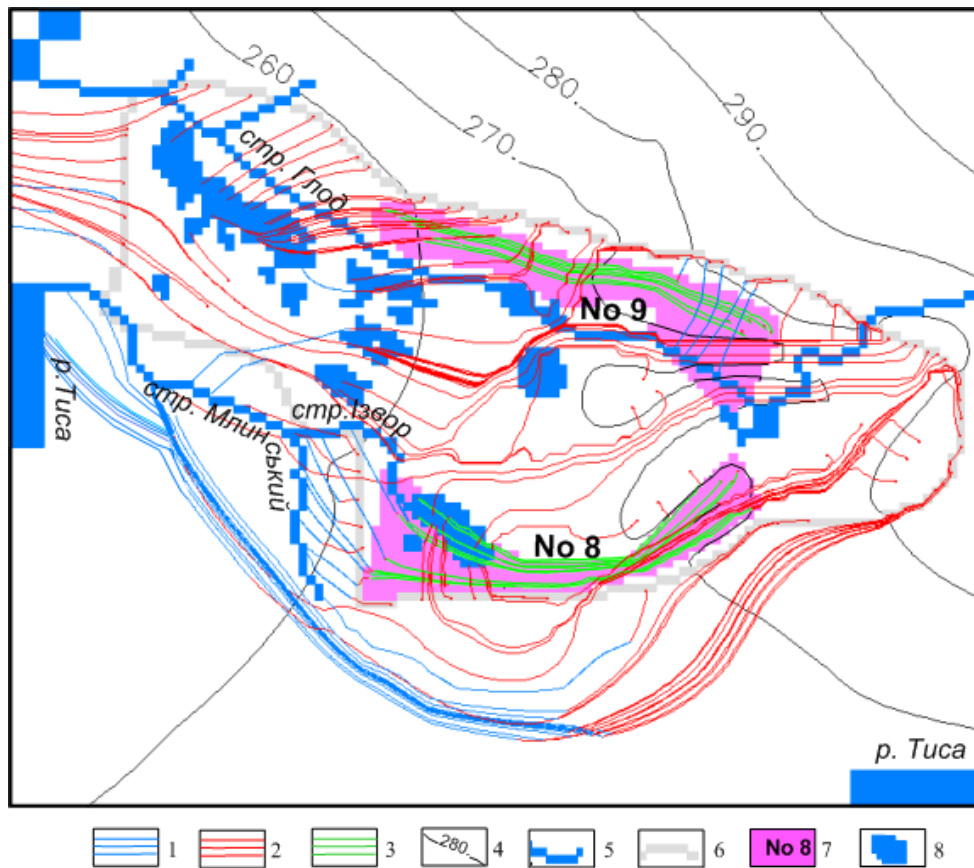
Наведене вище говорить про те, що у 2006 р., коли припливи води в деякі гірничі виробки досягли декількох тисяч м<sup>3</sup>/добу, на куполі Солотвинського соляного покладу активно діяв карстовий водоносний горизонт, рух води в якому не контролювався захисною системою дренажних галерей рудників № 8 і 9.

Після затоплення гірничих виробок рудників № 8 і 9 вилуговання солі не припинилось. Це зумовлено надходженням свіжих прісних вод з над-сольового четвертинного алювію і тортонського білясольового горизонту в карстовий горизонт і в горизонт затоплених гірничих виробок крізь ділянки шару суттєво деградованої четвертинної глини і солі, а також у вигляді атмосферних опадів крізь відкриті провальні карстові лійки. За 10 років після припинення розробки солі в західній

частині купола соляного покладу з'явилося багато нових солоних озер. Чималу частку в утворенні цих озер має вихід води із затоплених гірничих виробок рудника № 9 крізь деградовану сіль в західній частині шахтного поля цього рудника. В східній частині купола соляного покладу рудник № 9 висушив болота Мочари і русло струмка Глод.

Значення водопровідності горизонту затоплених гірничих виробок невідомі, тому, зважаючи на каналний характер руху води і на досвід гідрогеологічних робіт з сильно закарстованими породами, узагальнене значення водопровідності в межах шахтних полів рудників № 8 і 9 може досягати 5–30 тис. м<sup>2</sup>/добу.

На рис. 6, де гідрогеологічні умови і рівень розвитку карстових процесів відповідають стану на 2020 р., лініями руху, розрахованими за допомогою комп'ютерної програми RMPATH (Ciang, Kinzelbach, 2001), показано, як живляться, рухаються і розвантажуються підземні води в межах Солотвинського соляного покладу. Так, води карстового водоносного горизонту у східній частині шахтного поля рудника № 9 (червоні лінії) під дією гідравлічного градієнта, спрямованого вниз, перетікають в затоплені гірничі виробки цього рудника і потім рухаються вздовж технічного горизонту (зелені лінії) в його західну частину. Там під дією гідравлічного градієнта, спрямованого вгору, долаючи опір деградованого захисного шару



**Рис. 6.** Головні шляхи руху підземних вод карстового горизонту в тривимірному просторі Солотвинського соляного покладу після затоплення рудників № 8 і № 9 під дією гідравлічного градієнту: 1 – лінії току в четвертинному горизонті; 2 – лінії току в карстовому горизонті; 3 – лінії току в горизонті підземних гірничих виробок рудників № 8 і № 9; 4 – гідроізоп'єза, м; 5 – модельна гідрологічна мережа; 6 – умовна границя купола соляного покладу; 7 – шахтне поле руднику № 8; 8 – озера з соленою водою, а також сучасні і древні провальні карстові лійки відносно великих розмірів.

**Fig. 6.** General ways of groundwater movement of karst aquifer inside three-dimensional space of Solotvyno salt deposit after inundation of mines of № 8 and № 9 under action of hydraulic gradient: 1 – flowlines in Quaternary aquifer; 2 – flowlines in Tortonian aquifer; 3 – flowlines in inundation underground cambers of № 8 and № 9 mines; 4 – isopiestic line, m; 5 – model hydrological network; 6 – conventional border of salt deposit dome; 7 – area of № 8 mine; 8 – saline lakes, and large present-day and ancient fall-through karst funnels.

солі над гірничими виробками, підземні води з технічного горизонту повертаються в карстовий горизонт. У західній частині рудника № 9 води карстового горизонту (червоні лінії) розвантажуються або в солоні озера на західній половині соляного покладу, або перетікають в четвертинний горизонт (сині лінії) і звідти розвантажуються в поверхневу гідрологічну мережу, зокрема в р. Тиса. Лінії току підземних вод карстового горизонту, що підходять до шахтного поля рудника № 9 в його центральній частині, через практично нульову різницю позначок рівнів підземних вод у затоплених виробках і в карстовому горизонті (нульове значення вертикального гідралічного градієнта) не перетікають в затоплені гірничі виробки рудника № 9 і відразу прямують у бік солоних озер, підживлюючи їх.

Аналогічну картину руху підземних вод карстового горизонту можна бачити і для шахтного поля рудника № 8. Тут також у східній частині цього рудника відбувається перетікання підземних вод карстового горизонту в затоплені гірничі виробки з повторним виходом цих вод у карстовий горизонт в його західній частині з наступним їх розвантаженням у карстову ліжку і в струмки Ізвор і Млинський.

На рис. 6 показано, що червоні лінії току підземних вод карстового горизонту на південь від рудника № 8, які виходять за межі купола соляного покладу в його південній частині, обходять шахтне поле рудника № 8 і спрямовуються у бік русла Тиси на захід від Солотвинської солянокупольної структури, частково розвантажуючись в русло струмка Млинський.

Згідно з модельним водним балансом для купола Солотвинського соляного покладу за 10 років після припинення його експлуатації в залежності від того, чи діють ще повноцінно дренажні галереї в четвертинному водоносному комплексі на підступах до шахтних полів рудників № 8 і 9, чи ні, за його межі із тортонського карстового горизонту в русло Тиси мігрує приблизно 1000 м<sup>3</sup>/добу ропи з умовною концентрацією NaCl 300 г/дм<sup>3</sup>, і в маловодні періоди року вода цієї річки поблизу м. Солотвино має солонуватий смак. Дійсно, якщо меженний поверхневий стік Тиси в гідрометричному створі, розташованому трохи нижче Солотвинського покладу (0,5–1 км), становить 14,4–18 тис. м<sup>3</sup>/добу, то концентрація NaCl в її воді може зрости до 20 г/дм<sup>3</sup>, а в багатоводний період (паводок), коли поверхневий стік зростає, наприклад, до 1–1,5 млн м<sup>3</sup>/добу, приріст

мініралізації води в Тисі за рахунок Солотвинської солі не перевищить 0,3 г/дм<sup>3</sup>.

За останні роки встановлено, що мініралізація води в Тисі в районі м. Солотвино зростає. Це може бути пов'язано як з поступовим зменшенням меженного стоку Тиси через глобальне потепління клімату і надмірну вирубку лісу на схилах Карпат, так і з поліпшенням умов для міграції накопичених солоних вод за межі соляного покладу через збільшення ефективних перерізів карстових каналів в солі під шаром глини, що залишились від минулих тектонічних розривів, а також сучасних техногенних тріщин. Є припущення, що вилуговування солі, яке не припиняється, може сприяти раптовому прориву у русло Тиси великого об'єму солоних вод із підземних виробок затоплених Солотвинських рудників або солоних озер на поверхні західної частини даного соляного покладу. Як показує моделювання руху солоних вод карстового горизонту в об'ємному просторі Солотвинського соляного покладу (див. рис. 6), ці озера, принаймні частково, живляться шахтними водами затопленого рудника № 9. Шахтні води, мігруючи в карстовий горизонт крізь захисний шар солі над західною частиною цього рудника, деградує його і через деякий час він може зникнути з можливими негативними наслідками для довкілля. Так, якщо крізь якийсь високопропускний карстовий канал (або декілька каналів) у Тису прорветься потужний потік солоної води з нині затоплених підземних гірничих виробок, концентрація NaCl в яких досягає 200–300 г/дм<sup>3</sup>, або із солоних озер, концентрація NaCl в яких у середньому становить 130 г/дм<sup>3</sup>, то виникне надзвичайна ситуація. Такий прорив є потенційно ймовірним не тільки із затоплених гірничих виробок рудника № 9, а й з гірничих виробок затопленого рудника № 8. Цей рудник знаходиться поряд з південною границею купола соляного покладу, яку перетинають лінії току солоних вод (див. рис. 6). До того ж тут під четвертинною глиною можуть знаходитись залишкові канали від колишніх великих розривних тектонічних порушень, які небезпечно перетинають шахтне поле цього нині затопленого рудника № 8 у бік Тиси (див. рис. 2).

Крім того, прогресуюче зниження щільності солі внаслідок утворення техногенних тріщин і активізації карстових процесів веде до зменшення несучої здатності основ фундаментів деяких житлових будинків м. Солотвино з ризиком їх руйнування. Це ще одна важлива екологічна проблема, що потребує окремої оцінки і вирішення.

Таким чином, щоб прорив великого об'єму солоних вод у Тису і руйнування будівельних споруд м. Солотвино не сталися випадково і можна було б вчасно прийняти запобіжні заходи, треба проводити постійний комплексний моніторинг довкілля в районі Солотвинського покладу, особливо геолого-гідрогеологічних процесів на його куполі. Про це йшлося на міжнародній конференції, яка відбулася у 2019 р. у м.Ужгород. На ній була запропонована, обговорена та ухвалена програма REVITAL, за допомогою якої можна проводити вказані дослідження.

## ВИСНОВКИ

Виходячи з фактичного матеріалу та узагальнюючи результати моделювання обводнення Солотвинського родовища кам'яної солі, можна стверджувати таке:

1. Заходи захисту Солотвинського родовища від проникнення підземних вод у гірничі виробки, що застосовувались протягом багатьох років, вирішували лише тактичні завдання на відносно короткі відрізки часу. Питання зберігання прийнятних умов експлуатації родовища на весь термін його розробки не розглядались. В результаті припливи води в гірничі виробки набули катастрофічного характеру і ризику великих аварій перевищили допустимі значення.

## REFERENCES

*Korostoshovets I. P.* 1957. Hydrogeological conditions of the Solotvino rock salt deposit in the Transcarpathian region of the Ukrainian SSR. Kyiv, 97 p. (in Russian).

*Nikitin A. A.* 1990. Map of actual materials. Scheme of rational processing of the Solotvino rock salt deposit. VNPOSP, 45 p. (in Russian).

*Report on hydrogeological observations of the Solotvino salt deposit for 1989.* 1989. ZGE, Beregovo, 92 p. (in Russian).

*Pedchenko I. I.* 1999. Analysis of the hydrogeological situation at the Solotvino salt mine. Beregovo, ZGE, 88 p. (in Russian).

*Privalov V. A., Panova H. A.* (2009). Fluid geodynamics of Solotvino deposit. In: *Spatial analysis of natural and man-made risks in Ukraine*. Collection of scientific papers. Kyiv, IG NAS of Ukraine, P. 170–177. (in Russian).

*Handbook for Hydrogeologist.* Vol. 1. (Ed. V. M. Maksimov). 1967. Leningrad, Nedra, 592 p. (in Russian).

*Stetsenko B. D., Shestopalov V. M., Rudenko Yu. F.* 2009. Analysis of hydrogeological and ecological problems of the Solotvino rock salt deposit using mathematical modeling. In: *Spatial analysis of natural and technogenic risks in Ukraine: Scientific works of the international scientific-practical conference*. Kyiv, IG NAS of Ukraine, pp. 160–167. (in Russian).

2. Увесь набір раніше використаних заходів щодо попередження і мінімізації припливів води до родовища та його гірничих виробок виявився під кінець не ефективним, тому що не враховував весь комплекс факторів і процесів, які впливають на погіршення умов експлуатації родовища.

3. Ретельна оцінка екологічного стану території в межах зони впливу розробки родовища не виконувалась, попри негативних змін рельєфу під впливом активізації карстоутворення і переходу вилуженої солі в поверхневу і підземну водні системи.

4. З урахуванням наявних економічних можливостей і збільшення ризиків для виникнення стихійних екологічних проблем зроблено висновок про необхідність після зупинення експлуатації родовища організації моніторингових спостережень за подальшим розвитком змін в основних елементах еколого-геологічної системи родовища та його довкілля, в тому числі якості води в р. Тиса.

5. Негативний досвід експлуатації родовища треба враховувати на інших гірничих підприємствах, своєчасно виконувати дослідження, пов'язані з прогнозом умов розробки родовищ та їх впливом на довкілля, а також обґрунтування комплексних заходів щодо попередження розвитку негативних процесів під час всього періоду їх експлуатації і після їх закриття.

*Коростошовец И. П.* Гидрогеологические условия Солотвинского месторождения каменной соли в Закарпатской области УССР. Киев. 97 с.

*Никитин А. А.* Карта фактических материалов. Схема рациональной обработки Солотвинского месторождения каменной соли. ВПОСП, 1990. 45 с.

*Отчет по гидрогеологическим наблюдениям Солотвинского месторождения соли за 1989 год.* Берегово, ЗГЭ, 1989. 92 с.

*Педченко И. И.* Анализ гидрогеологической обстановки на Солотвинском солеруднике. Берегово, ЗГЭ, 1999. 88 с.

*Привалов В. А., Панова Е. А.* Флюидная геодинамика Солотвинского месторождения. *Просторовий аналіз природних і техногенних ризиків* (Збірник наукових праць). Київ, ІГ НАН України, 2009. С. 170–177

*Справочное руководство гидрогеолога.* Т. 1. Под редакцией Максимова В. М. Ленинград: Недра, 1967. 567 с.

*Стеценко Б. Д., Шестопалов В. М., Руденко Ю. Ф.* Анализ гидрогеологических проблем Солотвинского месторождения каменной соли с применением математического моделирования. *Пространственный анализ природных и техногенных рисков в Украине: Научные труды международной научно-практической конференции.* Киев, ИГ НАН Украины, 2009. С. 160–167.



*Chronology of emergency water inflows at mine No. 9 for the period from 2001 to 2006. (2006). Soltvyno, 75 p. (in Russian).*

*Chiang W.-H., Kinzelbach W. 2001. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. Springer, Berlin, Heidelberg, 346 p. (in English).*

*Frolov M. V. 1971. Report on the exploration of the site of the Soltvyno water intake for 1969–1971. Calculation of groundwater reserves on April 1, 1971. Beregovo, ZGE, 105 p. (in Russian).*

*Shekhunova S. B. (2007). Experience in the use of salt formation underground workings. Geologist of Ukraine. Geological background and production of oil, gas and other minerals. (1), 44. (In Ukrainian).*

*Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Stadnichenko S. M., Siumar N. P. 2015. The integrated geological model of Soltvyno structure as a tool to assess geoeological sustainability of Soltvyno rock-salt deposit. In: *Collection of Scientific Works of the Institute of geological Sciences NAS of Ukraine*, 8, Pp. 233–250. (In Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791>.*

*Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Stadnichenko S. M. (2019) Regularities of natural and antropogenic hazardous processes development for Soltvyno (Transcarpathia, Ukraine). In: *Collection of Scientific Works of the Institute of geological Sciences NAS of Ukraine*, 12, pp. 70–83. (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745>.*

*Yakovlev E. O., Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Siumar N. P. 2016. Assessment of complex stress-strain state of the Soltvyno salt anticline structure (basing on technique of natural pulse electromagnetic field of the Earth). In: *Collection of Scientific Works of the Institute of geological Sciences NAS of Ukraine*, 9, pp. 83–96. (In Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2016.144246>.*

*Shekhunova S. B., Pakshin M. Yu., Stadnichenko S. M., Liaska I. I., Aleksieienkova M. V. 2021a. The satellite radar monitoring of post-mining area (Soltvyno, Ukraine). In: *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: Materials of the XV International Scientific Conference*, Kyiv, Mon-21–075. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2075>*

*Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Kril T. V., Stadnichenko S. M., Siumar N. P. 2020. Natural and man-induced landslides formation factors within the Tysa-Apshytsia interfluve (Transcarpathia, Ukraine). In: *Second EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*, Kyiv, L-2020–01–18. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055018>.*

*Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Meijer S., Stadnichenko S. M., Yakovlev E. O. 2019. Monitoring of hazardous geological processes as a tool for risks minimization on post-mining areas in Soltvyno (Transcarpathia). In: *Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment: Abstracts of the EAGE XIII Int. Scient. Conf*, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903197>*

*Shekhunova S. B., Stadnichenko S. M., Aleksieienkova M. V., Kril T. V., Siumar N. P. 2021b. Risk mapping of the slope mass movement processes for public awareness and community risk preparedness (on the example of Soltvyno). In: *Materials**

*Хронологія аварійних водопритоков на шахте № 9 за період с 2001 по 2006 гг. Солотвино, 2006. 75 с.*

*Chiang W.-H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. 346 p.*

*Фролов М. В. Отчёт о разведке участка Солотвинского водозабора за 1969–1971 гг. Подсчет запасов подземных вод на 1 апреля 1971 г. Берегово, ЗГЭ, 1971. 105 с.*

*Шехунова С. Досвід використання підземних виробок соленосних формацій. Геолог України. Геологічна довідка і видобуток нафти, газу та інших корисних копалин, 2007, 1, с. 44.*

*Шехунова С. Б. Алексєєнкова М. В., Стадніченко С. М., Сюмар Н. П. Інтегральна геологічна модель Солотвинської структури як інструмент оцінки геоекологічного стану Солотвинського родовища кам'яної солі. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. Київ, 2015. Т. 8. С. 233–250. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791>.*

*Шехунова С. Б., Алексєєнкова М. В., Стадніченко С. М. Закономірності розвитку природно-техногенних небезпечних геологічних процесів на території смт Солотвино. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. Київ, 2019. Т. 12. 70–83. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745>.*

*Яковлев Е. О., Шехунова С. Б., Алексєєнкова М. В., Сюмар Н. П. Оцінка напружено-деформованого стану порід Солотвинської солянокупольної структури в Закарпатті (за результатами методу природних імпульсів електро-магнітного поля Землі). Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. Київ, 2016. Т. 9. С. 83–96. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2016.144246>*

*Shekhunova S. B., Pakshin M. Yu., Stadnichenko S. M., Liaska I. I., Aleksieienkova M. V. The satellite radar monitoring of post-mining area (Soltvyno, Ukraine). *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: Materials of the XV International Scientific Conference*. Kyiv, 2021. Mon-21–075. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2075>*

*Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Kril T. V., Stadnichenko S. M., Siumar N. P. Natural and man-induced landslides formation factors within the Tysa-Apshytsia interfluve (Transcarpathia, Ukraine). *Second EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*. Kyiv, 2020. L-2020–01–18. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055018>.*

*Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Meijer S., Stadnichenko S. M., Yakovlev E. O. Monitoring of hazardous geological processes as a tool for risks minimization on post-mining areas in Soltvyno (Transcarpathia). *Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment: Abstracts of the EAGE XIII Int. Scient. Conf*. Kyiv, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903197>*

*Shekhunova S. B., Stadnichenko S. M., Aleksieienkova M. V., Kril T. V., Siumar N. P. Risk mapping of the slope mass movement processes for public awareness and community risk preparedness (on the example of Soltvyno). *Materials of**

of the Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities, Odessa. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1028>.

Shestopalov V. M., Hural' O.V. 2008. Natural resources of subsurface waters. *Ukraine in maps*, NASU IG-HAS GRI, Kyiv-Budapest.

Stoeckl L., Banks V., Shekhunova S., Yakovlev Y. 2020. The hydrogeological situation after salt-mine collapses at Solotvyno, Ukraine. In: *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100701>.

the Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities. Odessa, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1028>.

Shestopalov V. M., Hural' O. V. Natural resources of subsurface waters. *Ukraine in maps*, NASU IG-HAS GRI, Kyiv-Budapest, 2008.

Stoeckl, L., Banks, V., Shekhunova, S., Yakovlev, Y. The hydrogeological situation after salt-mine collapses at Solotvyno, Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020, Vol. 30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100701>.

Manuscript received May 28, 2021;  
revision accepted October 27, 2021.

Інститут геологічних наук НАН України,  
Київ, Україна

## **ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЛОТВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ И ИХ АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ (УКРАИНА)**

**Б. Д. Стеценко, В. М. Шестопапов, Ю. Ф. Руденко**

Изложен исторический анализ фактических материалов об эволюции геоэкологических условий Солотвинского месторождения каменной соли, начиная с конца XIX до начала XXI века, и современное влияние этого, ныне закрытого, месторождения на окружающую среду, в частности, на качество воды в р. Тиса. Создана численная гидродинамическая модель этого месторождения. Рассмотрены и обобщены результаты моделирования на ней возникновения и наращивания притоков воды в подземные выработки из-за выщелачивания соли, а также образование и развитие трещинно-карстового водоносного горизонта под слоем плотной четвертичной глины, залегающей на соли. Эта глина много лет до промышленной разработки соли защищала Солотвинскую соляную залежь от разрушения пресными подземными водами четвертичного водоносного комплекса. Из-за интенсивного выщелачивания соли в отдельных благоприятных для этого местах и условиях под слоем четвертичной глины образовывались карстовые каналы и полости. Своды над некоторыми из полостей со временем разрушались с образованием в рельефе провальных карстовых воронок, которые становились эффективными проводниками пресных вод из аллювиальных галечников четвертичного водоносного комплекса в тортонский карстовый горизонт. Расчет баланса обводнения четвертичного аллювия и тортонского карстового горизонта показал значимость последнего для формирования притоков воды в горные выработки Солотвинского месторождения, особенно, перед завершением его эксплуатации, когда притоки воды стали чрезмерно большими для дальнейшей безопасной эксплуатации месторождения. После прекращения эксплуатации месторождения и затопления его подземных выработок экологические проблемы Солотвинского месторождения не закончились, потому что процесс выщелачивания соли продолжился из-за созданных благоприятных условий для контакта пресной воды с солью. Эти условия формировались в течение длительного времени разработки соли, особенно в последние годы эксплуатации данного месторождения. Выщелачивание соли создает такие экологические проблемы, как снижение несущей способности естественной основы фундаментов строительных сооружений г. Солотвино, угрожая их разрушением, а также загрязняет воду в р. Тиса, угрожая экологической катастрофой водам Дуная в случае внезапного выхода большого объема соленых вод из затопленных горных выработок Солотвинского месторождения за его пределы. Сейчас, в рамках международной программы REVITAL, стоит задача организации комплексного мониторинга за состоянием подземной гидросферы данного месторождения, чтобы вовремя выявить в ней опасные тенденции, спроектировать защитные работы и предупредить возможную катастрофу.

*Ключевые слова:* подземные воды, Солотвинское месторождение каменной соли, численное математическое моделирование, мониторинг, соленые воды, карстовая воронка.