

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.293147>  
УДК 504.056:553.631:556.332 (477)

## Гідродинамічна модель Солотвинського родовища кам'яної солі

С.Б. Шехунова<sup>1</sup>, Ю.О. Негода<sup>1,2\*</sup>, С.М. Стадніченко<sup>1</sup>, **В.М. Шестопапов<sup>2</sup>**, Ю.Ф. Руденко<sup>2</sup>, Н.П. Сюмар<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна  
E-mail: shekhun@gmail.com; stadnichenkosm@gmail.com; siumar1982@gmail.com

<sup>2</sup> Державна установа «Науково-інженерний центр радіогідроекологічних полігонних досліджень НАН України», Київ, Україна  
E-mail: negoda@nas.dov.ua; shestopalov@nas.gov.ua; rud@hydrosafe.kiev.ua

\* Автор для кореспонденції

### Hydrodynamic Model of Solotvyn Rock Salt Deposit

S.B. Shekhunova<sup>1</sup>, Y.O. Negoda<sup>1,2\*</sup>, S.M. Stadnichenko<sup>1</sup>, **V.M. Shestopalov<sup>2</sup>**, Y.F. Rudenko<sup>2</sup>, N.P. Siumar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
E-mail: shekhun@gmail.com; stadnichenkosm@gmail.com; siumar1982@gmail.com

<sup>2</sup> State Institution Radioenvironmental Centre of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
E-mail: negoda@nas.dov.ua; shestopalov@nas.gov.ua; rud@hydrosafe.kiev.ua

\*Corresponding author

Rock salt development brings risks of harmful impact on water resources, in particular the Tysa River, posing a threat of cross-border spread of saline pollution on the border between Ukraine and Romania (Solotvyn rock salt deposit, Transcarpathia, western Ukraine). The impact of technogenic load (underground mining of rock salt) within the deposit led to deformation of the structure and nature of water exchange, intensification of suffusion and karst processes, ground surface deformations, catastrophic inflows of groundwater into mines, and, as a result, to the cessation of development of this deposit in 2010. However, the suspension of salt mining did not stop the development of the above-mentioned hazardous geological processes caused by both natural and man-made factors. In order to justify measures for prevention pollution of the Tysa River basin, a hydrogeological model of the Solotvyna rock salt deposit and surrounding areas was created, which allowed to predict the direction and flow rate of fresh and saline groundwater. The model was developed using new data on the geological structure and hydrogeological conditions of the study area (groundwater monitoring data). The modernised hydrodynamic model includes five layers (main aquifers and confining layers). As a result of modelling, maps of the velocity vectors and head contours for two aquifers (Quaternary and Tortonian) were obtained. Based on the results of solving a number of inverse problems, the functional correspondence of the model to natural and anthropogenic conditions was proved. According to the preliminary calculations of the actual groundwater filtration velocity and the path lines of the inert pollutant spreading, it was found that the time of its migration from the salt contour to the Tysa River is approximately 2–3 years. The developed groundwater flow model will be used to substantiate the network of hydrological and hydrogeological observation points in order to optimise the monitoring of water pollution processes.

**Keywords:** Solotvyn rock salt deposit; groundwater; three-dimensional groundwater flow model; forecast; monitoring.

Цитування: Шехунова С.Б., Негода Ю.О., Стадніченко С.М., Шестопапов В.М., Руденко Ю.Ф., Сюмар Н.П. Гідродинамічна модель Солотвинського родовища кам'яної солі. *Геологічний журнал*. 2023. № 4 (385). С. 79–96. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.293147>

Citation: Shekhunova S.B., Negoda Y.O., Stadnichenko S.M., Shestopalov V.M., Rudenko Y.F., Siumar N.P. 2023. Hydrodynamic Model of Solotvyn Rock Salt Deposit. *Geologičnij žurnal*, 4 (385): 79–96. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.293147>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## Вступ

Виникнення та розвиток сел. Солотвина пов'язане з видобуванням кам'яної солі. Її систематичну промислову розробку тут було започатковано в останній чверті XVIII ст. За довгу історію експлуатації цього родовища відбувалася зміна методів видобування солі – від відкритого кар'єрного способу, а також не глибоких підземних виробок до глибоких шахт (кінець XX – початок XXI ст.), де використовувалися сучасні гірничі машини та застосовувалися вибухові роботи. З середини 90-х років XX ст. на працюючих рудниках родовища почали накопичуватися проблеми, перш за все гідрогеологічні (розробка копалини на цьому родовищі відрізнялася складністю гідрогеологічних умов), які не вирішувалися, та в результаті призвели до небезпечної екологічної ситуації техногенного характеру. Зокрема, спричинили аварійне затоплення шахти № 9 з поширенням негативних наслідків на прилеглі території (розвиток суфозійно-карстових процесів, катастрофічних провалів земної поверхні, загрозу транскордонного забруднення поверхневих і підземних вод). Таким чином, ця ситуація набула державного рівня з 2010 р. (експертний висновок МНС України від 09.12.2010 р. № 02-17292/165). Як наслідок, була зупинена робота ДП «Солотвинський солерудник», припинено функціонування підземного відділення спелеосанаторію Української алергологічної лікарні МОЗ України та обласної лікарні, діяльність яких була безпосередньо пов'язана з гірничими виробками діючих соляних шахт, втрачено унікальну низькофоновою лабораторію з вивчення елементарних частинок Інституту фізики НАН України.

На теперішній час на території родовища продовжуються небезпечні техногенно-геологічні процеси, які поширюються за межі гірничого відводу рудників (Яковлев та ін., 2016). Серед них виділяються карстово-суфозійні процеси, що активно проявляються в районі шахт № 7–9 (рис. 1). Так, у межах західного флангу поля шахти № 8 у квітні 2015 р. утворилося провалля площею 5,5 тис. м<sup>2</sup>, об'ємом понад 200 тис. м<sup>3</sup>, у травні 2016 р. великий провал стався на північному крилі структури над західним флангом поля шахти № 9. Руйнування відпрацьованого простору призводить до катастрофічних просідань

земної поверхні з негативним впливом на стан поверхневих споруд, існуючу інфраструктуру селища. Наприклад, наприкінці літа 2017 р. в одну із резервних діючих свердловин місцевого водозабору стала надходити мінералізована вода, позбавивши КП «Солотвинський водоканал» резервів питного водопостачання у посушливі місяці. Крім того, порушення ландшафту, його деградація в результаті неконтрольованого розвитку соляного карсту, забруднення поверхневих та підземних вод – все це дає підстави сусіднім країнам турбуватися з приводу загроз транскордонного погіршення екологічних параметрів стану масиву вод р. Тиса.

Попередні дослідження за участі науковців Інституту геологічних наук НАН України були зосереджені на виявленні та описі небезпечних геологічних процесів природного та природно-техногенного характеру в межах сел. Солотвина, їх картуванні, аналізі та ранжируванні в рамках реалізації проекту ImProDiReT-783232 (2018–2020 рр.) за підтримки Генерального Директорату Європейської комісії з питань цивільного захисту та гуманітарної допомоги DG ECHO. Продовження досліджень в цьому напрямі став міжнародний грантовий проект HUSKROUA/1702/6.1/0072 «Екологічна оцінка можливостей відновлення природних ресурсів у Солотвин з метою запобігання подальшому забрудненню басейну Верхньої Тиси через підготовку комплексної системи моніторингу РЕВІТАЛ 1 / REVITAL I» (2019–2023 рр.), у рамках якого виконувалися роботи, представлені в статті. Основною метою реалізації проекту РЕВІТАЛ 1 є розробка схеми системи комплексного моніторингу, одним із ключових елементів якої має стати постійнодіюча гідродинамічна модель. Викладене вище зумовлює необхідність побудови сучасної гідрогеологічної моделі території, що дозволить спрогнозувати напрямки та швидкість руху прісних і засолених підземних вод у часі з метою запобігання забруднення басейну Верхньої Тиси.

## Матеріали і методи

Для створення модернізованої гідродинамічної моделі системи підземного водообміну (схематизації природних умов) використано вихідні дані створеної попередньої гідродинамічної моделі (Шестопалов та ін., 2008; Стеценко та ін., 2021) та уточнену базову інтеграційну геологічну модель

Солотвинського родовища кам'яної солі (Шехунова та ін., 2015). Була використана раніше розроблена комплексна літологічна модель Солотвинської солянокупольної структури на основі аналізу архівних даних геологічних розрізів четвертинних відкладів 407 свердловин, пробурених у межах Солотвинського родовища кам'яної солі за період з 1922 по 2020 р. (Шехунова та ін., 2021). Модель включає побудовані із застосуванням ПС-технологій за значеннями окремих точок (свердловин) узгоджені математичні моделі границь та товщини перекриваючої соляне тіло осадової формації: потужності валунно-галечникових порід над Солотвинською солянокупольною структурою; модель потужності «палагу» над Солотвинською солянокупольною структурою; загальні потужності перекриваючих відкладів над Солотвинською солянокупольною структурою; підшви четвертинних відкладів («палаг» та гравій). Для створення геофільтраційної моделі території Солотвинського родовища було використано програмний комплекс MODFLOW з графічною оболонкою ModelMuse (Winston, 2022), який являє собою систему моделювання фільтрації та міграції підземних вод.

## Загальні відомості про район робіт та родовище

Солотвинське родовище кам'яної солі розташоване в південно-східній частині Закарпатської області, у Тячівському адміністративному районі, на правому березі р. Тиса в антиклінальній структурі з діапіровим соляним ядром протикання.

Перші відомості про геологічні та гідргеологічні умови Солотвинського родовища були отримані угорськими і чеськими геологами (Коростовоць, 1957).

Рельєф ділянки родовища є ступінчасто-терасовим (рис. 1, А). Саме родовище розташоване в межах другої і частково першої надзаплавної тераси. Ці тераси розділені уступом висотою 25–30 м. Північно-західна частина родовища (Затон) – це рівнина з озерами глибиною 0,5–7 м. Загальний обсяг води в озерах становить 60,7 тис. м<sup>3</sup> при середній мінералізації 132 г/дм<sup>3</sup>.

На режим Тиси, головної водної артерії місцевості, впливає річний хід опадів. Максимальна витрата води в річці, за даними гідропосту в Рахові, сягає 630–1500 тис. м<sup>3</sup>/добу, а мінімальна – 14,4–18 тис. м<sup>3</sup>/добу.

Безпосередньо вздовж соляного купола з північного сходу на південний захід течуть струмки Глод та Извор, що дренують поверхневі та шахтні води. Дебіт Извору залежить в основному від кількості води, що скидається з шахт, і коливається в межах 0,025–0,58 тис. м<sup>3</sup>/добу при мінералізації 0,096–18,1 г/дм<sup>3</sup>.

Поверхневі води з території родовища струмками Глод та Извор повністю не відводяться. Наявність численних давніх виробок і карстові процеси створили кілька безстічних ділянок, найбільшими з яких є болото Чорний Мочар площею близько 150 тис. м<sup>2</sup>, місце давнього просідання в районі старої шахти № 7 площею близько 70 тис. м<sup>2</sup> і ділянка в північно-західній частині поля (район Затону) площею 400 тис. м<sup>2</sup> (Коростовоць, 1957).

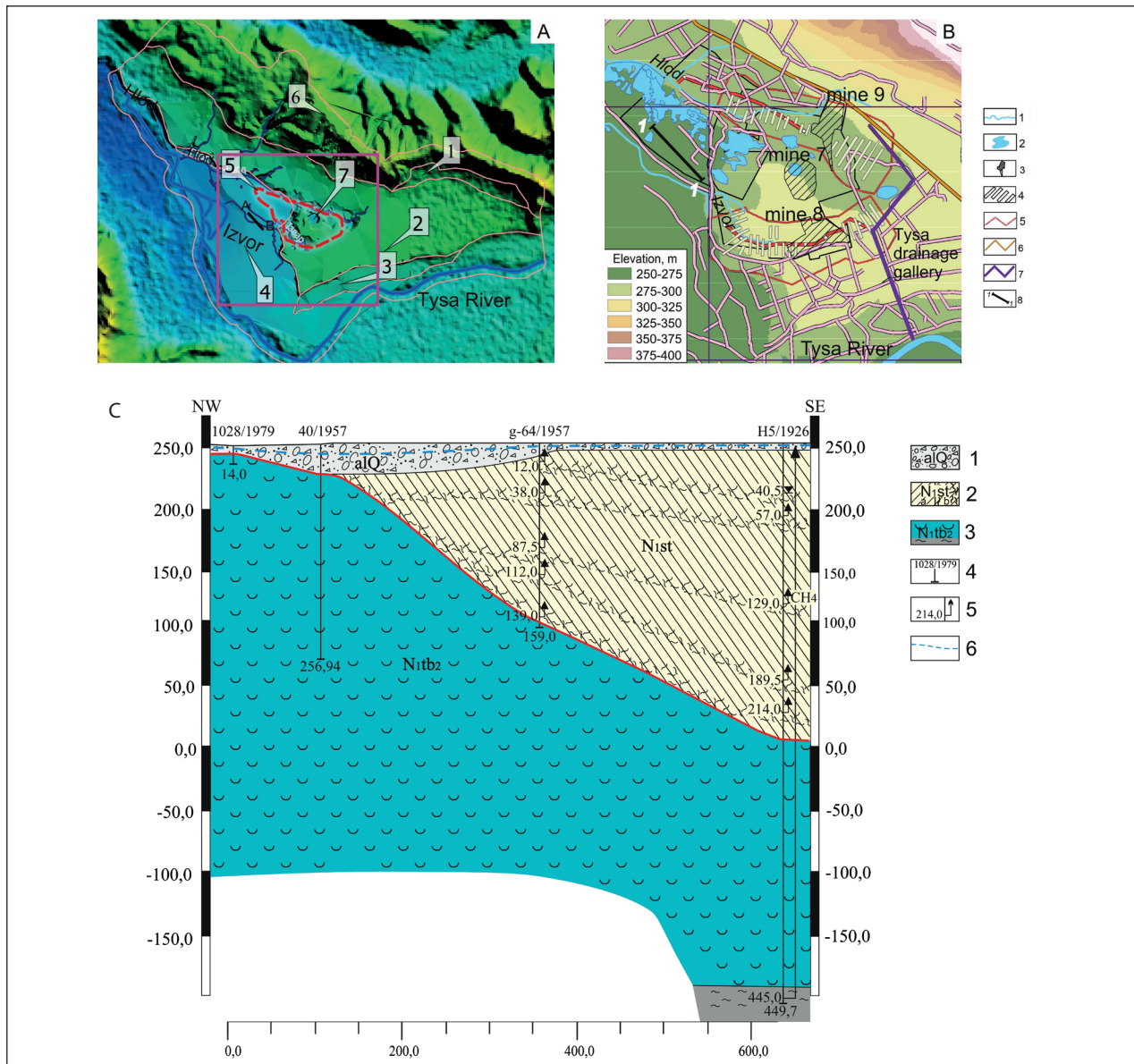
## Геологічна будова району

Солотвинський соляний діапір розташований в центральній частині Солотвинської западини, яка є східним кінцем Закарпатського внутрішнього прогину. Характерною особливістю Солотвинської западини є потужний розвиток міоценових утворень. Фундамент западини складений дислокованими домезозойськими, тріасовими, юрськими, крейдовими та палеогеновими відкладами потужністю понад 1000 м. Осадовий чохол досліджуваної території складають утворення квартеру та неогену (рис. 1, С).

**Четвертинна система** представлена в основному алювіальними відкладами р. Тиса. Алювіальні відклади ( $alQ_{IV}$ ) заплавної тераси розповсюджені в вигині р. Тиса і простежуються у вигляді смуги шириною 700–1200 м і завдовжки 5000 м (див. рис. 1, А). Ці відклади представлені валунами і крупною галькою з домішкою піску, глини і гравію, місцями до 50 % за обсягом. При контакті з корінними відкладами іноді трапляються лінзи глин і пісків. Потужність заплавних алювіальних відкладів – 430 м, у середньому близько 10 м (Елизаров, 1955; Шупиков, 1970; Русиняк, 2015).

Відклади першої надзаплавної тераси ( $alQ_{III}$ ) залягають у вигляді смуги шириною не більше 200–400 м. Вони представлені середньою і крупною галькою. Товщина цих відкладів у діапазоні 2–8 м.

Відклади другої надзаплавної тераси ( $alQ_{II}$ ) займають центральну частину території досліджень



**Рис. 1, А.** Тривимірний рельєфний моделювання сел. Солотвина: 1 – відклади третьої надзаплавної тераси ( $alQ_3$ ); 2 – відклади надзаплавної тераси ( $alQ_{II}$ ); 3 – відклади надзаплавної тераси ( $alQ_{III}$ ); 4 – алювіальні відклади заплавної тераси ( $alQ_{IV}$ ); 5 – контур соляного штоку по поверхні алювіальних відкладів; 6 – хребет Магура; 7 – солоні озера

**Рис. 1, В.** Загальна схема території Солотвинського родовища: 1 – річка, струмки; 2 – солоні озера; 3 – вулиці; 4 – шахтні поля; 5 – контури підземних виробок; 6 – водовідвідні споруди; інфраструктура: дороги, вулиці, шляхопроводи, залізничні колії, 7 – водовідвідна споруда «Тиса-штольня»; 8 – лінія розрізу геолого-гідрогеологічної схеми (1-1) південного схилу центральної частини Солотвинської солянокупольної структури

**Рис. 1, С.** Геолого-гідрогеологічна схема південного схилу центральної частини Солотвинської солянокупольної структури: 1 – четвертинні відклади, валунно-галечникові відклади; 2 – солотвинська світа, перешарування аргілітів, пісковиків та туфів (а – щільні, б – тріщинуваті); 3 – тереблінська світа, кам'яна сіль з прошарками аргілітів, пісковиків; 4 – свердловина, її номер та рік буріння; 5 – глибина розкриття тріщинних напірних вод солотвинської світи; 6 – рівень ґрунтових вод

**Fig. 1, A.** Three-dimensional relief model of Solotvyn settlement: 1 – sediments of the third floodplain terrace ( $alQ_3$ ); 2 – alluvial sediments of the floodplain terrace ( $alQ_{II}$ ); 3 – alluvial sediments of the  $alQ_{III}$  terrace; 4 – alluvial sediments of the Tysa floodplain terrace ( $alQ_{IV}$ ); 5 – contour of the salt dome on the surface of alluvial sediments; 6 – Mahura ridge; 7 – salt lakes

**Fig. 1, B.** General scheme of the Solotvyn deposit area: 1 – river, streams; 2 – salt lakes; 3 – streets; 4 – mine fields; 5 – contours of mines; 6 – drainage facilities; infrastructure: roads, streets, overpasses, railway tracks; 7 – drainage facility “Tysa-gallery”; 8 – section line of the geological and hydrogeological scheme (1-1) of the southern slope of the central part of the Solotvyn salt dome structure

**Fig. 1, C.** Geological and hydrogeological scheme of the southern slope of the central part of the Solotvyn salt dome structure: 1 – Quaternary sediments, pebble and gravel sediments; 2 – Solotvyn Formation, interlayers of mudstones, sandstones and tuffs (a – dense, b – fractured); 3 – Tereblyanska Formation, rock salt with interlayers of mudstones and sandstones; 4 – well, number and year of drilling; 5 – depth of fractured pressure water of Solotvyn Formation; 6 – water table

та залягають смугою шириною 500–2200 м. Ці відклади представлені галькою і гравієм з шарами піску. Потужність сягає 20–30, іноді – до 60 м.

Відклади третьої надзаплавної тераси ( $alQ_3$ ) приурочені до південного схилу хребта Магура і складені галькою з крупнозернистим піском потужністю до 10 м.

**Неогенова система (міоцен).** У районі розташування затопленого Солотвинського соляного рудника розроблялися поклади солевмісної формації тортонського ярусу (тереблінська формація).

Тектонічно область досліджень являє собою брахіантиклінальну складку, шарнір якої витягнутий в північно-західному напрямку паралельно лінії розлому, по якій розвинена велика частина солянокупольної структури Солотвинської западини (Селянчин, 1986). Падіння гірських порід південно-західних і північно-східних крил складки біля ядра знаходиться в межах 30–45°. У міру відходу від контакту з сіллю кути падіння зменшуються. Так, на відстані 500–700 м від соляного контура кути падіння скорочуються до 15–20°, а на відстані 1500 м – до 3–4° і менше (Елизаров, 1955; Китык, 1983). При контакті солі з вміщуваними породами спостерігаються зони дроблення і брекчії. Крім основної структури, існують складки другого, третього та більшого порядку. Від контакту соляного тіла з вміщуваними породами відходять невеликі розломи, встановлені в основному за гідрогеологічними дослідженнями (Шупиков, 1970; Селянчин, 1986).

У північно-західній частині периклінального замикання складки геофізичними методами (Привалов, Панова, 2008; Шакін, 2010; Йосипенко, 2014; Русиняк, 2015) встановлено ряд радіальних розломів, а також складок, закладених поперек осі основної структури.

### Гідрогеологічні умови

Гідрогеологічні особливості родовища описано в низці звітів (Коросташовець, 1957; Фролов, 1971; Піталенко, 2008; Привалов, Панова, 2008; Тиркель и др., 2009 та ін.).

**Підземні води в алювіальних відкладах четвертинного віку.** Основним джерелом затоплення гірничих виробок родовища є надсолевий водоносний комплекс у четвертинних алювіальних відкладах, який розподілений по всій площі купола.

У четвертинних відкладах центральної і північно-західної частин родовища виявлено чотири водоносних горизонти (в алювіальних відкладах заплави, перша, друга і третя надзаплавні тераси Тиси), які гідравлічно пов'язані між собою (Фролов, 1971).

*Горизонт підземних вод у відкладах заплавної тераси* поширений у південно-західній частині родовища в долині Тиси, яка, утворюючи вигин, відходить від свого кореневого берега майже на 2 км. Абсолютні відмітки поверхні заплавної тераси, що частково захоплює родовище, знаходяться в межах 255–257 м і уступом 2 м піднімаються над урізом русла р. Тиса. Ґрунтові води заплави Тиси приурочені до гальки з високою фільтраційною проникністю. У підшві галечника залягають тортонські аргіліти і пісковики. Глибина до води становить 0,52 м. Висота берега Тиси сягає 2 м, а висота паводків – 4 м і більше. Тому в Затоні було побудовано захисну дамбу. За даними відкачок з одиничних свердловин, водопровідність заплавної галечників знаходиться в межах 500–1000 м<sup>2</sup>/добу. Водоносний горизонт заплавної тераси живиться за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та транзитним стоком р. Тиса під час повеней (Фролов, 1971).

*Горизонт підземних вод першої надзаплавної тераси* поширений в південно-західній частині родовища, де безпосередньо покриває частину соляного купола. Потужність горизонту в середньому становить 5–10 м. Максимальна потужність горизонту (до 30 м) спостерігається біля Солоних озер. Відклади першої надзаплавної тераси представлені галькою, яка підстилається тортонськими аргілітами з прошарками пісковиків. За даними відкачок з одиничних свердловин, водопровідність галечникових відкладів першої надзаплавної тераси знаходиться в межах 50–200 м<sup>2</sup>/добу. Водоносний горизонт живиться за рахунок інфільтрації поверхневих вод і припливу води з другої тераси, а дронується нижньою частиною відвідного каналу «Тиса-штольня» та джерелами, розташованими вздовж берега р. Тиса.

Загалом, у межах Солотвинського родовища пройдено понад 18 000 м водовідвідних споруд. З них у районі Затону та старих шахт – майже 6100 м (завалені до 1946 р.), у районі шахти № 7 – понад 1850 м (функціонували до 1955 р.), у районі шахти № 8 – близько 5800 м, у районі шахти № 9 – понад 1650 м, у західній частині

родовища – майже 2600 м. Більшість водовідвідних споруд закладено до 1940 р., а найбільш вдалу «Тиси-штольню» – у 1904 р. На початок 1990-х років функціонувало близько 7000 м споруд (Селянчин, 1995).

*Горизонт ґрунтових вод другої надзаплавної тераси* відіграє велику роль в обводненні більшої частини Солотвинського родовища. Горизонт представлений галечниками з пісками та валунами з великою кількістю тонкозернистого матеріалу. Глибина до дзеркала ґрунтових вод становить 0,8–6,0 м. Уздовж «Тиси-штольні» галечники другої тераси майже повністю здреновані. Тут рівень ґрунтових вод знаходиться на глибині 14,5–16,5 м. Потужність горизонту в межах родовища сягає від 10 до 50 м і більше. За даними відкачок з одиничних свердловин, водопровідність глинистого галечника другої тераси знаходиться в межах 1–15 м<sup>2</sup>/добу (Коростошовець, 1957; Фролов, 1971). Основним джерелом поповнення водоносного горизонту є інфільтрація поверхневих вод по величезній площі тераси і приплив з водоносного горизонту третьої тераси. Над склепінням соляного купола родовища водоносний горизонт відділений від солі шаром щільних глин середньою потужністю 10–12 м, які в природних умовах надійно ізолювали соляне тіло від прісних вод четвертинного горизонту. В даний час цей водотривкий шар у деяких місцях було ліквідовано гірничими роботами, в результаті чого активізувалися карстові процеси та аномальні припливи води в гірничі виробки.

*Горизонт, приурочений до галечників третьої надзаплавної тераси* Тиси, розташований на південному схилі Магурського хребта. Потужність горизонту дорівнює 4–6 м. Ґрунтові води цього горизонту розвантажуються у вигляді джерел, розташованих на схилі хребта і в долині Тиси. Вони живляться атмосферними опадами і припливом води з корінних порід (тортонський комплекс). Відомості про відкачки з цього горизонту відсутні, але, судячи з дебітів джерел, водозбагаченість цього горизонту мала. Горизонт поширений поза межами родовища і на водоприпливи в гірські виробки родовища, вочевидь, практично не впливає.

З аналізу сучасних умов водообміну в надсоляних підземних водах алювіальних відкладів випливає, що їх природний режим руху сильно порушено гірничими виробками, карстовими проваллями.

### ***Підземні води в тортонських породах.***

Навколосольові води приурочені до зони контакту соляного купола з водовміщуючими породами тортонського комплексу. У тортонському комплексі підземні води трапляються в усіх літо-петрографічних відмінностях – туфах, туфітах, аргілітах, мергелях і пісковиках. Їх водозбагаченість визначається ступенем тріщинуватості. Безпосередньо в периферійних частинах родовища навколосольові води утворюються внаслідок інфільтрації атмосферних опадів, але основна зона живлення знаходиться в межах південно-західного схилу Карпат, звідки вони потрапляють через зони розломів у район родовища (Коростошовець, 1957).

За даними відкачок з одиничних свердловин, водопровідність порід у верхній частині товщі тортонського комплексу в зонах між диз'юнктивними тектонічними порушеннями знаходиться в межах 110 м<sup>2</sup>/добу, в зонах розривних тектонічних порушень – 100–200 м<sup>2</sup>/добу (Коростошовець, 1957; Фролов, 1971).

Карстові води в соляному масиві займають практично всю центральну частину родовища. Їх утворення пов'язане з просіданням експлуатаційних і дренажних виробок, які понизили рівень дренування. Дренаж з виробок збільшив приплив прісних алювіальних вод у товщу кам'яної солі, що призвело до утворення карстових пустот та підземних вод, які заповнюють ці порожнини.

Карстово-суфозійні воронки поширені переважно в пухкому шарі гірських порід, що покривають сіль, і приурочені до тектонічних порушень і ділянок підземних виробок. Їх глибина становить 0,7–8 м, діаметр – 2–20 м. Дно більшості воронок зазвичай покрито четвертинними відкладами або антропогенними утвореннями. Деякі карстові форми мають давнє походження і знаходяться в стабільному стані. Водозбагаченість карстового водоносного горизонту у соляних відкладах неогену на деяких ділянках досить висока. Живлення карстових вод у межах другої надзаплавної тераси Тиси відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів і дренування алювіальних вод у карстові провалля. Води розвантажуються через дренажну систему та природним чином, потрапляючи в алювіальні відклади першої надзаплавної тераси у Затоні. Мінералізація карстових вод сягає 300 г/дм<sup>3</sup> (Селянчин, 1995).

Карстово-суфозійні процеси розвиваються в межах соляної діапирової дисгармонійної складки, територіально розташованої в південній та центральній частинах сел. Солотвина. Активний перебіг карстових процесів визначають надсолівні (четвертинні осадові утворення), навколосолівні (солотвинська та тересвинська світи) та внутрішньосолівні (верхньотереблінська підсвіта) води. Поверхневі карстопрояви представлені суфозійно-карстовими й провальними воронками, колодязями, карстовими деформаціями просідання, нерівномірно розміщеними по тілу соляного штоку. Проте загальну кількість закартованих у ХХ ст. карстопроявів встановити неможливо через постійну відсіпку їх гравійно-галечниковим матеріалом. Крім того, до 2000-х років були наявні також останцеві карстові форми – соляні гриби і соляні скелі та спостерігався відкритий карст (Шехунова та ін., 2019; Shekhunova et al., 2019, 2021).

Вже на кінець 1990-х років тут нараховувалося 14 карстових воронок, карстово-суфозійними процесами було зруйновано стеліни шахтних камер і атмосферні води отримали безпосередній доступ до покладів солі. Ослаблені зони крупних карстових провалів ускладнені численними деформаціями, представленими вертикальними багатоступінчастими тріщинами, що зумовлюють обвалення та формування карстових озер. З 2011 р. зафіксоване зростання водної поверхні озер, з подальшим їх злиттям (сучасна площа озер 10,2 тис. м<sup>2</sup>). За весь час експлуатації родовища регулярних режимних спостережень за карстовим масивом соляного штоку не проводилось, спостереження мали фрагментарний характер та в основному були приурочені до періодів активізації, що супроводжувалися зростанням водоприпливів у водовідливні виробки. За архівними матеріалами, тривалість періодів активізації становила 2–5 років, а періодів відносного затишшя – 1–10 років (Шехунова та ін., 2019).

### Схематизація природних умов

У 2008 р. групою авторів (Шестопапов та ін., 2008; Стеценко та ін., 2021) було створено гідрогеологічну модель Солотвинського родовища для попередньої оцінки стану обводнення родовища та гірничих виробок з метою розробки попередніх рекомендацій, спрямованих на міні-

мізацію впливу солевидобутку на навколишнє середовище. Авторами було виконано детальну схематизацію гідрогеологічних умов території та побудовано якісну математичну модель території досліджень. Єдиним фактором недосконалості цієї моделі було застосування при моделюванні багатшарової системи водоносних горизонтів передумови М'ятієва-Гіринського, згідно з якою у водоносних горизонтах моделі підземні води рухаються тільки горизонтально, а в роздільних слабкопроникних шарах – тільки вертикально. Таке припущення є цілком прийнятним для моделювання суто гідродинамічних умов території. Для кожного горизонту задається параметр водопровідності  $T$  (м<sup>2</sup>/добу), при цьому геометрична конфігурація водоносних горизонтів не має переважного значення. Такий підхід реалізовано у розрахунковому пакеті програми MODFLOW Block-Centered Flow (BCF), яким скористались автори. Варто зазначити, що для вирішення задач, які стояли перед розробниками попередньої моделі, цього було цілком достатньо.

Метою сучасної роботи є побудова такої гідродинамічної моделі, яка б стала основою для вирішення міграційних задач солепереносу у підземних водах за допомогою програми MT3D (MT3D-USGS: Groundwater Solute Transport Simulator for MODFLOW) (Bedekar et al., 2016). Для цього доцільно побудувати математичну фільтраційну модель на базі розрахункового пакета Layer-Property Flow (LPF), який є альтернативою пакетам BCF. Основною його відмінністю є те, що за допомогою пакета LPF задаються параметри горизонтального ( $K_h$ ) та вертикального ( $K_v$ ) коефіцієнтів фільтрації для кожного розрахункового шару моделі, включаючи роздільні слабкопроникні шари (Harbaug et al., 2017). Фактично немає різниці в математичному поданні між водоносними горизонтами та розділяючими їх слабкопроникними шарами, вони відрізняються тільки величиною параметрів коефіцієнтів фільтрації. Таким чином за допомогою пакета LPF вирішується фільтраційна задача в дійсно тривимірній постановці, а не в квазі-тривимірній, як це дозволяв попередній пакет BCF. Це зумовлює необхідність точного, наскільки це можливо, відображення геометрії розрахункових шарів (абсолютних відміток покрівлі і підшви водоносних горизонтів та роздільних водотривких шарів).

На жаль, наразі не існує можливості автоматичної конвертації між моделями, що були створені з використанням різних розрахункових блоків LPF та BCF. Тобто перехід до використання іншого розрахункового модуля вимагає створення практично нової фільтраційної моделі з відповідними гідрогеологічними параметрами та розв'язання серії обернених задач для обґрунтування відповідності математичної моделі природно-антропогенним умовам.

Обґрунтування фільтраційної схеми виконано на основі визначення загального характеру водообміну (інтенсивності, глибини, напрямків і т. д.) у сучасних гідрогеологічних умовах. Воно включало схематизацію структури і форми області фільтрації; фільтраційної неоднорідності об'єкта; граничних умов і основних джерел формування водообміну. При виконанні схематизації граничних умов моделі були проаналізовані та використані як основа дані попередніх робіт з вивчення території Солотвинського родовища (Шехунова та ін., 2015, 2019, 2021; Shekhunova et al., 2019, 2021; Стеценко та ін., 2021).

Перш за все на базі аналізу вихідних геологічних даних та уточненої інтеграційної геологічної моделі Солотвинської солянокупольної структури (детальної геологічної будови поверхні соляного штоку та літології надсолевих відкладів) (Шехунова та ін., 2015, 2021) була побудована концептуальна геологічна модель досліджуваної території. При цьому були враховані та схематизовані наступні водоносні горизонти та геологічні формації:

- водоносний горизонт четвертинних відкладів заплави р. Тиса та надзаплавних терас, представлених різноманітними валунно-галечниковими відкладами з різними зонами значень коефіцієнтів фільтрації;
- роздільний шар між четвертинними відкладами та ділянками соляного штоку, представлений темно-сірими глинами («палаг»);
- водоносний горизонт у карстових виходах солянокупольної структури під алювіальні відклади (кам'яна сіль перекрита «палагом» з гідравлічними «вікнами»);
- водоносний горизонт у перешаруваннях трищинуватих аргілітів, пісковиків, туфів (солотвинська світа) (рис. 2);
- практично водонепроникна структура – соляний шток (кам'яна сіль світло-сіра та сіра тереблінської формації).

Результатом цього етапу роботи стали цифрові карти і числові масиви відміток поверхні землі, покрівлі та підшви водоносних горизонтів та роздільних шарів, абсолютні відмітки рівнів у поверхневих водотоках (р. Тиса, карстові форми, солоні озера та струмки).

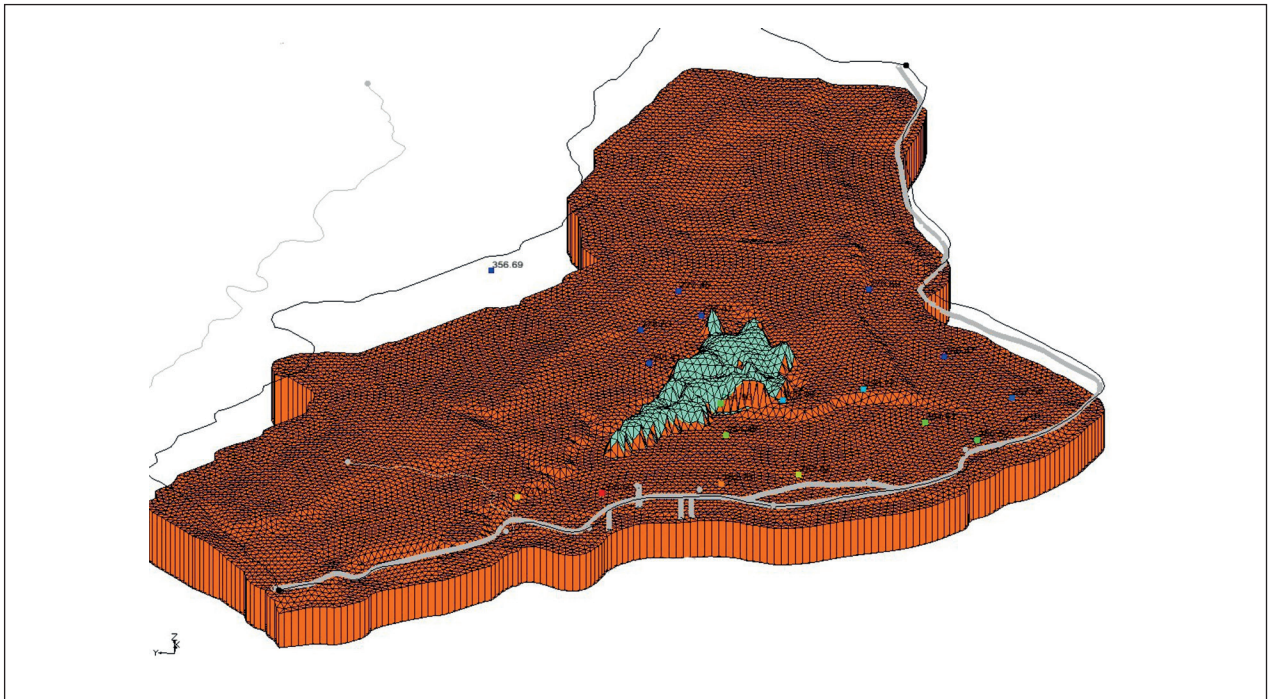
Для побудови поверхні землі були використані дані супутникової тривимірної цифрової моделі Землі та карти SRTM3 (Gesch et al., 1999), а також геоморфологічна модель Солотвинської солянокупольної структури та прилеглих територій (Шехунова та ін., 2015; Shekhunova et al., 2021).

Застосування в роботі сучасних геоінформаційних технологій дозволило оптимізувати процеси створення і введення масивів вихідних даних у систему моделювання. Дані цих цифрових карт використовувалися в подальшому для обліку просторової неоднорідності основних гідрогеологічних параметрів водоносних горизонтів.

Для обґрунтування контурів та граничних умов моделі за допомогою цифрової моделі рельєфу були побудовані лінії вододілів. Границі моделі в основному вибиралися вздовж вододілів гірського Магурського хребта та контура р. Тиса. Це є відмінністю від попередньої моделі Солотвинського родовища, яка охоплювала більшу площу ділянки межиріччя Тиса-Апшиця з гірським хребтом. Розрахункова сітка була створена в межах вибраного контура. Площа модельної області становить 24,6 км<sup>2</sup>. Розмір розрахункових блоків змінюється від 50 м по площі моделі до 25 м для апроксимації річок та території, прилеглої до соляного діяпіру, що потребують більш детального вивчення. Схему розрахункової сітки та граничних умов (ГУ) моделі наведено на рис. 3.

Водоносний комплекс четвертинних відкладів був схематизований як перший від поверхні безнапірний водоносний горизонт з граничною умовою другого роду ГУ-2 (непроникна границя по вододілу Магурської гряди). На р. Тиса задано граничні умови третього роду ГУ-3 (модуль RIVER). Коефіцієнти фільтрації підруслових відкладів дорівнюють  $K_0 = 0,55$  м/добу, абсолютні позначки рівнів у річці визначені по топографічних картах та супутниковій тривимірній моделі рельєфу Землі. Коефіцієнти фільтрації  $K$  (м/добу) задавалися відповідно з виділеними за результатами





**Рис. 2.** Тривимірний геологічний моделювання водонасиченого горизонту у перешаруваннях тріщинуватих аргілітів, пісковиків, туфів (солотвинська світа) з солянокупольною структурою

**Fig. 2.** Three-dimensional geological model of the aquifer in interbedded fractured mudstones, sandstones, tuffs (Solotvynska Suite) with salt-dome structure

геоморфологічного аналізу супутникової тривимірної моделі рельєфу по зонах заплави, надзаплавних терас та вододілів у діапазоні від 0,1 м/добу в районі гірських схилів до 100 м/добу в районі поширення добре промитих галечникових відкладів у заплаві р. Тиса. Детальний опис величин коефіцієнтів фільтрації буде надано у розділі, присвяченому розв'язанню обернених задач.

Роздільний шар між четвертинними відкладами та ділянками соляного штоку, представлений темно-сірими глинами («палаг»), був схематизований як другий від поверхні водонасичений горизонт, що може бути автоматично конвертований з напірного до безнапірного стану та навпаки (convertible). Зона поширення горизонту відповідає контуру соляного штоку. Коефіцієнт фільтрації було задано у межах 0,0001 м/добу. Наявність зон підвищеної водопровідності враховувалась при моделюванні автоматично за рахунок коливання потужності «палагу» відповідно до змін абсолютних відміток покрівлі та підшви цих відкладів.

Водонасичений горизонт у карстових виходах солянокупольної структури під алювіальні відклади та «палаг» був схематизований як

третій від поверхні водонасичений горизонт, що може бути автоматично конвертований з напірного до безнапірного стану та навпаки (convertible). Зона поширення горизонту відповідає контурам розповсюдження соляного штоку. Немає достовірних даних про величину коефіцієнта водопровідності солянокарстового водонасиченого горизонту. За даними попередніх робіт (Шестопапов та ін., 2008; Стеценко та ін., 2021), ця величина задавалася в діапазоні 0,1–10 м/добу.

Водонасичений горизонт у перешаруваннях тріщинуватих аргілітів, пісковиків, туфів (солотвинська світа) та соляний шток (кам'яна сіль світло-сіра та сіра тереблінської світи) були задані на моделі у вигляді одного розрахункового горизонту із різними значеннями гідрогеологічних параметрів. В зоні поширення практично водонепроникних соляних відкладів коефіцієнт фільтрації дорівнював 0,0001 м/добу. Для тріщинуватих аргілітів, пісковиків, туфів цей параметр становив 0,01 м/добу.

Величина інфільтраційного живлення визначена за результатами попереднього аналізу вихідної інформації по району робіт. Вона була задана на першій від поверхні водонасичений горизонт.

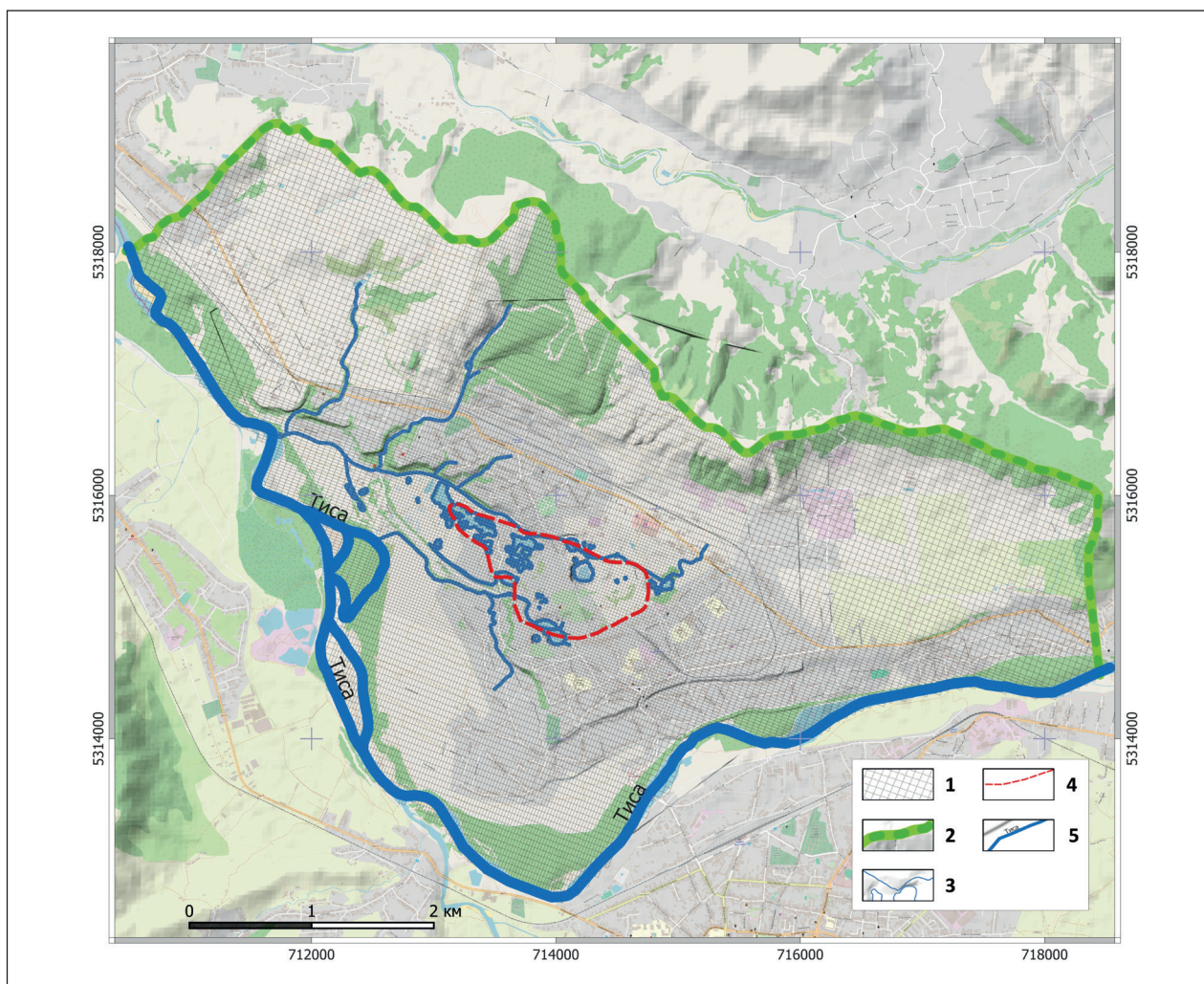
Відповідно до попередньо виконаної геоморфологічної зональності його величина коливалась у діапазоні 200–250 мм/рік.

Гідрологічні елементи представлені болотами, озерами, струмками (найбільші з них Ізвор, Глюд, Млинський, Банський, Малий Солотвин) були схематизовані як граничні умови третього роду ГУ-3 (модуль DRAIN). Коефіцієнти фільтрації підруслових відкладів дорівнюють  $K_0 = 0,55$  м/добу, абсолютні позначки рівнів у струмках та водоймах визначені по топографічних картах та супутниковій тривимірній моделі рельєфу Землі.

Водозабірні свердловини, що використовуються для водопостачання Солотвина, були схематизовані як граничні умови другого роду з постійним від'ємним дебітом. Дані по величині

водовідбору на сучасний період часу потребують уточнення. Значення водовідбору, заданого на моделі по водоносному горизонту четвертинних відкладів, були запозичені з попередніх робіт (Фролов, 1971; Шестопалов та ін., 2008; Стеценко та ін., 2021). У подальшому створена концептуальна модель була конвертована у тривимірну розрахункову сітку з формуванням відповідних цифрових масивів гідрогеологічних параметрів та геометрії водоносних горизонтів.

Таким чином, було створено попередню математичну гідрогеологічну модель території Солотвинського родовища, яка цілком придатна для проведення розрахункових експериментів, але потребує коригування вихідних модельних параметрів під час розв'язання обернених задач.



**Рис. 3.** Карта граничних умов і просторової дискретизації моделі: 1 – розрахункова сітка моделі; 2 – граничні умови другого роду; 3 – граничні умови третього роду – дрена (струмки й озера); 4 – контур соляного штоку по поверхні алювіальних відкладів; 5 – гранична умова третього роду (р. Тиса)

**Fig. 3.** Map of boundary conditions and spatial model discretization: 1 – model grid; 2 – boundary conditions of the second type; 3 – boundary conditions of the third type – drainage (streams and lakes); 4 – contour of the salt dome on the surface of alluvial sediments; 5 – boundary condition of the third type (Tysa River)

### Розв'язання оберненої (зворотної) фільтраційної задачі на сучасний період

Для перевірки відповідності створеної математичної моделі природним гідрогеологічним умовам об'єкта досліджень було виконано розв'язання кількох обернених задач для уточнення розрахункових параметрів.

За результатами моніторингових досліджень, що проводилися в період липень–листопад 2021 р. партнерами в рамках реалізації проекту Ревітал 1 (Університет Мішкольця, Угорщина), були отримані дані режимних спостережень (всього 15 свердловин) за рівнями підземних вод четвертинного водоносного горизонту (див. таблицю). Ці дані використані в якості «контрольних точок» для збігу модельних розрахункових та натурних рівнів підземних вод.

Коефіцієнти фільтрації порід четвертинного водоносного комплексу змінювалися і підбиралися на моделі до фактичних відміток рівнів підземних вод у спостережних свердловинах станом на вересень 2021 р. Варто зазначити, що амплітуда коливання рівнів підземних вод за вказаний період часу лежить в діапазоні від 0,6 до 3 м (для більшості свердловин – близько 0,8–1,0 м). Окрім того, рівень в р. Тиса може зазнавати значних змін у різні періоди часу. Амплітуда коливань рівнів у річці може досягати 2 м у випадку сильного паводку. Тому для розв'язання обернених задач була прийнята допустима точність збігу модельних розрахункових та натурних рівнів підземних вод у діапазоні 1 м.

Розв'язання стаціонарної оберненої задачі було проведено із використанням універсального математичного пакета розв'язання інверсних задач PEST (Model-Independent Parameter Estimation) (Doherty, 2015).

В ході розв'язання оберненої стаціонарної задачі були виділені зони четвертинного водоносного горизонту із змінними коефіцієнтами фільтрації відповідно до геоморфологічної будови території, тобто враховувалися заплава та надзаплавні тераси р. Тиса. Додатково в якості параметра, який підбирався, був заданий коефіцієнт фільтрації роздільного шару між четвертинним водоносним горизонтом та карстово-тріщинним горизонтом соляного штоку («палагу»). Карта зон визначених параметрів та їх оптимізованих значень наведена на рис. 4. Отримані

в ході розрахункових експериментів за допомогою програми PEST результати подані у таблиці.

В результаті багатоваріантного розв'язання оберненої задачі абсолютні похибки модельних рівнів підземних вод у цілому не перевищують 1 м (рис. 5; 5, B), що, як було зазначено вище, є цілком прийнятним результатом. Просторовий розподіл «контрольних точок» по території, що моделювалася, охоплює зони терас і заплави р. Тиса та зону розповсюдження соляного штоку (рис. 5, A), тобто достовірність отриманих результатів розподілу рівнів підземних вод першого від поверхні водоносного горизонту можна вважати достатньо вірогідною. На жаль, немає достовірних моніторингових даних про інші водоносні горизонти, що були задані на моделі. Тому їх основні гідрогеологічні параметри не змінювалися в ході розв'язання оберненої задачі відносно заданих на етапі первинної схематизації моделі.

Крім того, паралельно із розв'язанням оберненої задачі одним з важливих завдань є дослідження чутливості моделі до зміни тих чи інших гідрогеологічних параметрів, що дозволяє більш цілеспрямовано досягати функціональної відповідності моделі природним умовам. При визначенні вказаного вище набору параметрів також аналізувалася чутливість моделі до їх зміни. Були розглянуті такі варіанти змін гідрогеологічних параметрів: зональні зміни параметра коефіцієнта фільтрації водоносного горизонту четвертинних відкладів відповідно до прийнятої модельної схематизації (перший горизонт) та роздільного шару «палагу» (другий горизонт). Результати дослідження чутливості моделі показують (рис. 5, C), що модельні рівні у четвертинному водоносному горизонті найбільш чутливі до зміни фільтраційних параметрів другої надзаплавної тераси (зона 1), заплави р. Тиса (зона 70) та першої надзаплавної тераси (зона 5). Це цілком логічно з гідрогеологічної точки зору, оскільки саме на цій території відбувається транзит підземного стоку в р. Тиса. Чутливість моделі до зміни фільтраційних властивостей «палагу» дуже низька. Але це пов'язано, скоріше за все, з тим, що всі «контрольні точки» знаходяться в першому від поверхні водоносному горизонті. Якщо з'являться додаткові дані по інших горизонтах, то це безумовно змінить ситуацію на краще та дозволить уточнити додаткові параметри моделі по інших горизонтах.

Таблиця. Результати визначення коефіцієнтів фільтрації Кф (м/добу) при розв'язанні оберненої задачі  
 Table. Results of hydraulic conductivity (K, m/day) estimation by solving of inverse problem

| Варіант | Модельна похибка | Зона 22 | Зона 1 | Зона 70 | Зона 5 | Зона 211 |
|---------|------------------|---------|--------|---------|--------|----------|
| 1       | 2645,3           | 0,1     | 0,2    | 50      | 3      | 0,001    |
| 2       | 2486,6           | 0,06    | 0,22   | 50,78   | 3,05   | 0,00020  |
| 3       | 2011,6           | 0,01    | 0,27   | 53,36   | 3,23   | 0,00020  |
| 4       | 610,8            | 0,01    | 0,65   | 68,15   | 4,14   | 0,00020  |
| 5       | 40,7             | 0,01    | 2,04   | 100,00  | 5,24   | 0,00020  |
| 6       | 38,3             | 0,05    | 2,06   | 100,00  | 5,20   | 0,00023  |
| 7       | 35,2             | 0,05    | 2,11   | 100,00  | 5,15   | 0,00027  |
| 8       | 19,5             | 0,05    | 2,78   | 100,00  | 4,64   | 0,00027  |
| 9       | 19,4             | 0,05    | 2,83   | 100,00  | 4,53   | 0,00027  |

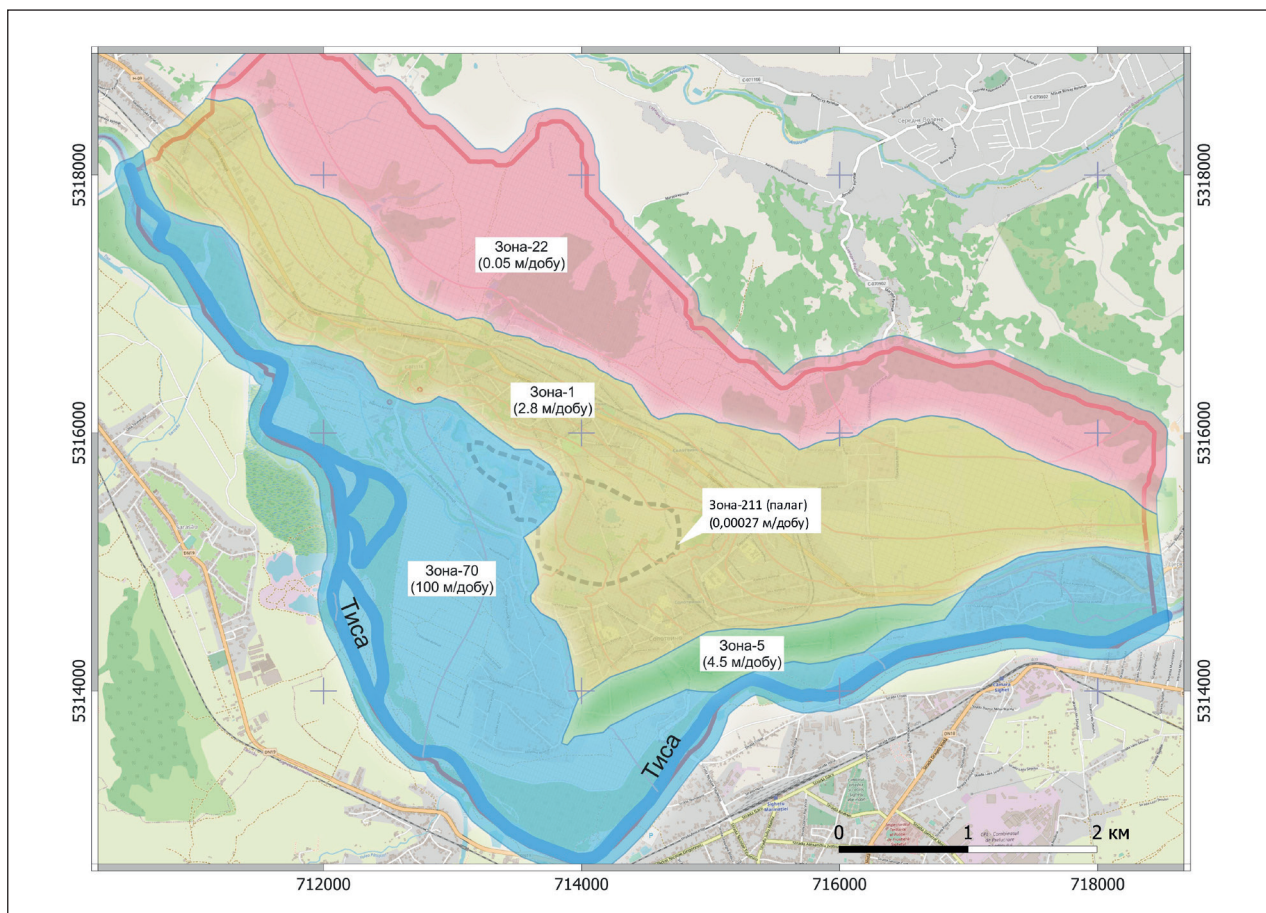
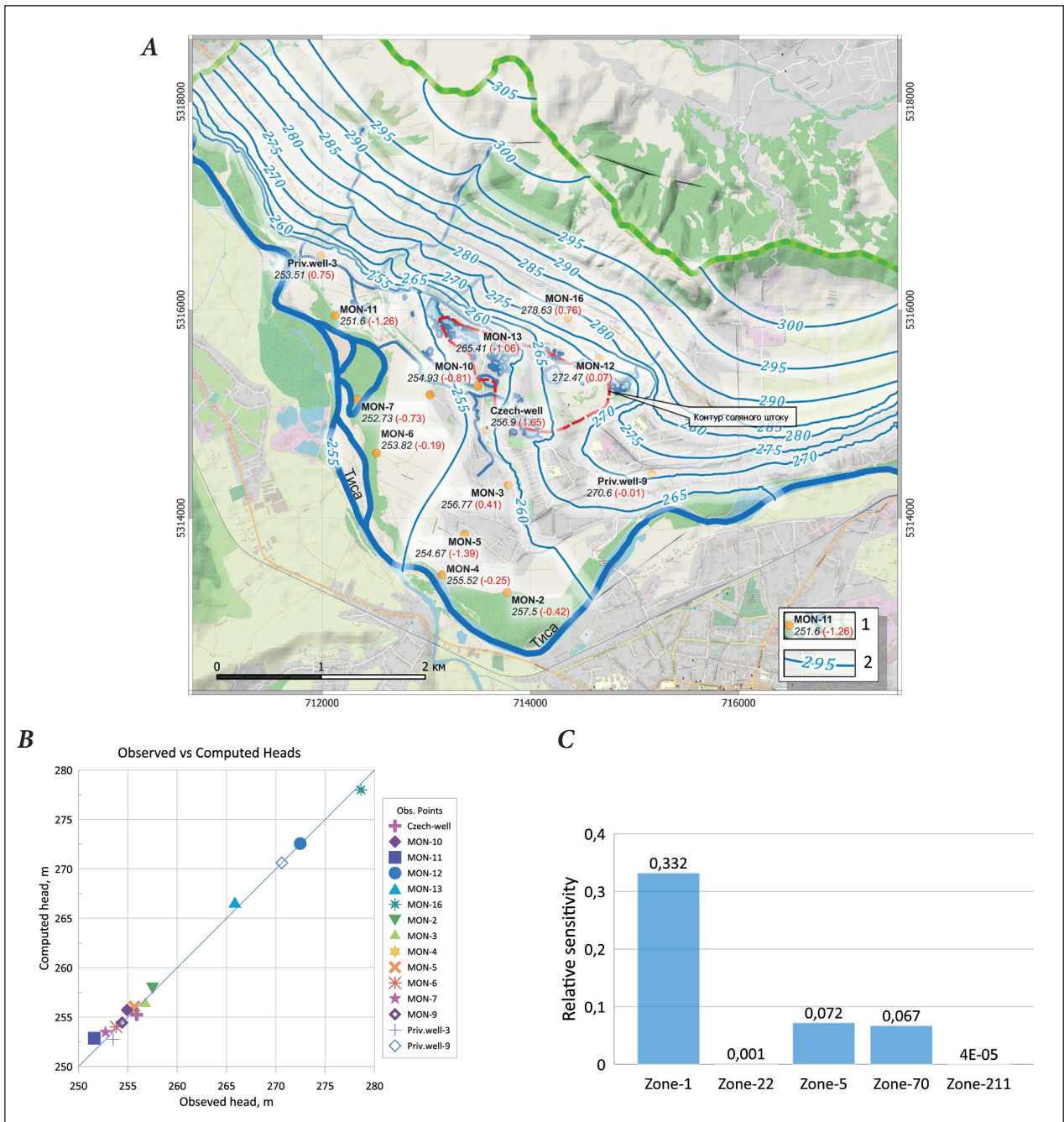


Рис. 4. Карта зональності параметра коефіцієнта фільтрації водоносного горизонту четвертинних відкладів та «палагу» (зона 211, другий горизонт) за результатами розв'язання стаціонарної оберненої задачі

Fig. 4. Map of zonation of the hydraulic conductivity of the Quaternary aquifer and the "palah" (zone 211, second horizon) based on the model calibration results



**Рис. 5, А.** Карта гідроізогіпс модельних рівнів водоносного горизонту четвертинних відкладів за результатами розв'язання стаціонарної оберненої задачі: 1 – моніторингова свердловина, зверху – назва та номер свердловини, знизу – натурний рівень підземних вод, у дужках червоним кольором – різниця між натурним та модельним значенням рівня; 2 – гідроізогіпси модельних розрахункових рівнів підземних вод першого від поверхні водоносного горизонту четвертинних відкладів

**Рис. 5, В.** Результати розв'язання оберненої стаціонарної задачі за даними моніторингу підземних вод (за період червень-листопад 2021 р.)

**Рис. 5, С.** Діаграма значень відносної чутливості модельних розрахункових рівнів водоносного горизонту четвертинних відкладів до зміни зональних коефіцієнтів фільтрації за результатами розв'язання стаціонарної оберненої задачі

**Fig. 5, A.** Map of hydraulic head contours of the Quaternary aquifer based on the steady-state inverse problem solution results: 1 – monitoring well, top – name and number of the well, bottom – observed groundwater head value; difference between observed and model calculated values in red brackets; 2 – contours of model calculated hydraulic head of Quaternary aquifer

**Fig. 5, B.** Model calibration result based on groundwater monitoring data (June–November 2021)

**Fig. 5, C.** Diagram of the relative sensitivity of the model hydraulic heads of the Quaternary aquifer to hydraulic conductivity zonal changes based on the results of inverse problem solution

Отже, на підставі викладеного вище можна зробити висновок, що, незважаючи на деякі недоліки та неточності, що зумовлені самою математичною та феноменологічною суттю процесу створення моделей, основна мета розв'язання оберненої стаціонарної задачі виконана. Гідродинамічна ситуація, що відтворена на моделі, задовільно відображає природні умови. Модель в цілому можна рекомендувати для застосування при вирішенні практичних задач.

### Прогнозне моделювання

З метою врахування можливого розповсюдження соляних розсолів та їх впливу на якість ґрунтових вод на території, прилеглої до соляного штоку, були проведені розрахунки дійсної швидкості фільтрації підземних вод та ліній течії просування інертного забруднювача за допомогою програми MODPATH (Pollock, 2016).

Результати попереднього моделювання показують (рис. 6), що час просування інертного забруднювача від контура розповсюдження соляного штоку до р. Тиса становить приблизно 2–3 роки.

Варто зазначити, що для подібного роду розрахунків дуже важливим параметром, що впливає на результат моделювання, є значення  $n_e$  – ефективної пористості. Визначення дійсної швидкості потоку підземних вод вимагає постановки спеціальних трасерних експериментів, які достатньо складні у реалізації та вимагають багато людських та фінансових ресурсів.

Тому, як правило, використовують дані лабораторних досліджень, описаних у наукових джерелах. Для гравійно-галечникових відкладів значення ефективної пористості знаходяться в діапазоні 0,2–0,35. Як можна побачити, цей параметр може коливатися в досить широких межах. Для розрахунків нами було прийняте значення  $n_e = 0,3$  (Yu et al., 2015), що, на наш погляд, відповідає природним літологічним характеристикам порід досліджуваної території. Проте у разі наявності анізотропії фільтраційних параметрів, зокрема у зонах тектонічних порушень (розломів), дійсні швидкості потоку ґрунтових вод можуть суттєво змінюватися. Це може прискорювати та інтенсифікувати процеси розповсюдження

засолених підземних вод у водоносних горизонтах. Відповідні зміни фільтраційних параметрів мають бути визначені і враховані в моделі. Таким чином, гідродинамічне моделювання потребує уточнення шляхом урахування тектонічних порушень в моделі. Більш детально проблеми засолення водоносних горизонтів та їх взаємодії із соляними відкладами Солотвинського родовища будуть розглянуті при побудові наступних міграційних моделей масопереносу у підземних водах, основою для яких буде слугувати створена фільтраційна модель.

### Висновки

Створена модернізована гідродинамічна модель Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій на основі уточнених фільтраційних параметрів надсолевих відкладів Солотвинської солянокупольної структури та осучасненої бази геологічних даних (детальної геологічної будови поверхні соляного купола та літології надсолевих відкладів) з використанням розрахункового блоку LPF програми MODFLOW. Це зумовило максимально точне відображення геометрії розрахункових шарів (абсолютних відміток покрівлі та подошви водоносних горизонтів та роздільних водотривких шарів). У результаті було вирішено фільтраційну задачу в дійсно тривимірній постановці, а не в плановій, як це було реалізовано у попередніх роботах.

Розроблена модель включає інформацію про п'ять шарів (основні водоносні горизонти і роздільні шари). В результаті моделювання отримані карти векторів дійсної швидкості фільтрації та гідроізогіпси модельних рівнів підземних вод для двох водоносних горизонтів (четвертинного і тортонського) на основі уточнених фільтраційних параметрів надсолевих відкладів Солотвинської солянокупольної структури та бази даних.

В результаті перевірки відповідності створеної математичної моделі природним гідрогеологічним умовам ділянки дослідження шляхом розв'язання низки обернених задач встановлено, що гідродинамічна ситуація, відтворена на моделі, задовільно відображає природні умови, а отже, отримана модель може бути використана для вирішення практичних завдань.

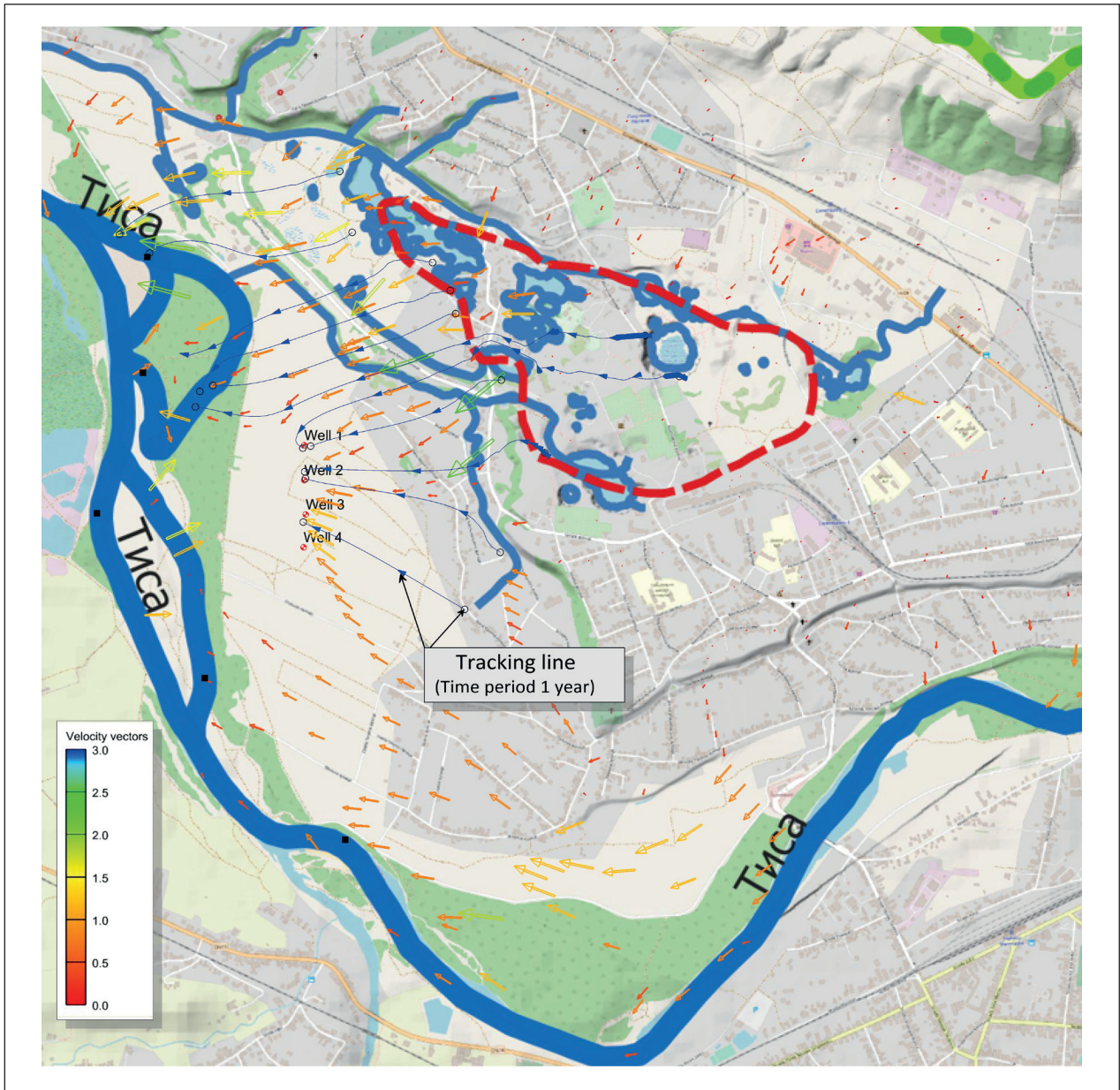


Рис. 6. Карта-схема векторів дійсної швидкості потоку підземних вод водоносного горизонту четвертинних відкладів за результатами моделювання

Fig. 6. Schematic map of the actual groundwater flow velocity vectors of the Quaternary aquifer based on modelling results

Модель дозволяє в першому наближенні спрогнозувати напрямок руху та дійсну швидкість підземних вод. За результатами попереднього моделювання встановлено, що час просування інертного забруднювача від контура розповсюдження соляного штоку до р. Тиса становить приблизно 2–3 роки.

Гідродинамічне моделювання може бути уточнене в подальших дослідженнях шляхом урахування в моделі тектонічних порушень (розломів). На ділянках тектонічних порушень

можливе посилення водообміну, що може прискорювати та інтенсифікувати процеси розповсюдження засолених підземних вод у водоносних горизонтах.

Розроблена модернізована гідродинамічна модель Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій буде використана для обґрунтування мережі моніторингових гідрологічних постів та гідрогеологічних свердловин, для оптимізації моніторингу процесів забруднення водного середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Елизаров А.Ф. Солотвинское месторождение каменной соли. (Результаты детальной разведки 1948–1949 гг.). Киев, 1955. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 14676. Кн. 1. 71 с.
- Йосипенко Т.М. Комплексні геофізичні дослідження карстових явищ на території Прикарпаття та Закарпаття. Львів, 2014. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 64133. Кн. 1. 257 с.
- Китык В.И., Бокун А.Н., Панов Г.М., Сливко Е.П., Шайдецкая В.С. Галогенные формации Украины: Закарпатский прогиб. Киев: Наукова думка, 1983. 168 с.
- Коростошовець І.П. Гідрогеологічні умови Солотвинського родовища кам'яної солі в Закарпатській області УРСР. Київ, 1957. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 18253/2. Кн. 1. 251 с.
- Питаленко Є.І. Проведення гідрогеологічних і інженерно-геологічних досліджень з метою встановлення місць проникнення води у шахти Солотвинського солерудника та виконання досліджень геомеханічних процесів при розробці Солотвинського родовища кам'яної солі і впливу діяльності соляних шахт на навколишнє природне середовище. Донецьк, 2008. Фонди УкрНДДМІ, інв. № 2302. 59 с.
- Привалов В.А., Панова Е.А. Особенности геодинамики и гидрогеологического режима Солотвинского месторождения каменной соли (Закарпатский внутренний прогиб). *Наук. пр. ДонНТУ. Сер. гірн.-геол.* 2008. № 7(135). С. 155–162.
- Русиняк Р.П. Звіт за результатами пошукового буріння на Солотвинській площі. Харків, 2015. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 64855. Кн. 1. 294 с.
- Селянчин М.И., Иванченко А.И., Габор Л.Т. Отчет о детальной разведке Северного участка Солотвинского месторождения каменной соли в Тячевском районе Закарпатской области УССР за 1977–1986 гг. Берегово, 1986. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 49345. Кн. 1. 210 с.
- Селянчин М.І. Звіт про результати дорозвідки кам'яної солі глибоких горизонтів в межах поля шахти № 8 Солотвинського родовища за 1992–1995 рр. Тячівський р-н Закарпатської області. Берегово, 1995. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 55852. Кн. 1. 328 с.
- Стеценко Б.Д., Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф. Гідрогеологічні проблеми Солотвинського родовища кам'яної солі і їх аналіз з використанням моделювання (Україна). *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України.* 2021. Т. 14, вип. 2. С. 94–110. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245937>
- Тиркель М.Г., Артеменко П.Г., Питаленко Е.И., Педченко С.В. Геомеханические исследования как метод изучения техногенного гидродинамического режима на территории Солотвинского солерудника. *Наук. пр. УкрНДДМІ НАН України.* 2009. № 5, ч. 1. С. 124–130.
- Фролов М.В. Отчёт о разведке участка Солотвинского водозабора за 1969–1971 гг. Подсчет запасов подземных вод на 1 апреля 1971 г. Берегово, 1971. Западная геологическая экспедиция. Киев, 1971. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 33225. Кн. 1. 160 с.
- Шакін А.В. Геолого-економічна оцінка запасів газу Солотвинського родовища Закарпатської області. Львів, 2010. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 64855. Кн. 1. 286 с.
- Шестопалов В.М., Руденко Ю.Ф., Стеценко Б.Д. Разработка предварительной модели Солотвинского солерудника. Киев: Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины, 2008. 59 с.
- Шехунова С.Б., Сюмар Н.П., Стадніченко С.М., Алексєєнкова М.В. Літологічна модель надсоліового комплексу Солотвинської солянокупольної структури в Закарпатті. *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України.* 2021. Т. 14, вип. 2. С. 119–128. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245822>
- Шехунова С.Б., Алексєєнкова М.В., Стадніченко С.М. Закономірності розвитку природних та природно-техногенних небезпечних процесів на території містечка Солотвино (Закарпаття, Україна). *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України.* 2019. Т. 12. С. 70–83. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745>
- 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. *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України.* 2015. Т. 8. С. 233–250. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791>
- Шушиков А.Р., Сабов Ю.В., Васильев И.Н., Таши В.М. Отчет о доразведке в 1967–1970 гг. Солотвинского месторождения каменной соли в Закарпатской области. Берегово, 1970. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 32263. Кн. 1. 120 с.
- Яковлев Є.О., Шехунова С.Б., Алексєєнкова М.В., Сюмар Н.П. Оцінка напружено-деформованого стану порід Солотвинської солянокупольної структури в Закарпатті. *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України.* 2016. Т. 9. С. 83–96. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2016.144246>
- Bedekar V., Morway E.D., Langevin C.D., Tonkin M. MT3D-USGS version 1: A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW: *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A53.* 2016. 69 p. <http://dx.doi.org/10.3133/tm6A53>
- Doherty J. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. PEST: complete theory and what it means for modelling the real world. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing, 2015. 227 p.
- Gesch D.B., Verdin K.L., Greenlee S.K. New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos, Earth and Space Science News.* 1999. Vol. 80 (6). P. 69–70. doi:10.1029/99EO00050
- Harbaugh A. W., Langevin C.D., Hughes J.D., Niswonger R.N., Konikow L.F. MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017. <http://dx.doi.org/10.5066/F7RF5S7G>



- Pollock D.W. 2016. User guide for MODPATH Version 7–A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1086, 2016. 35 p. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20161086>
- 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 Solotvyno (Transcarpathia). *Monitoring*. 2019. Iss. 1. P. 1–5. Published by European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903197>
- Shekhunova S.B., Pakshin M.Yu., Stadnichenko S.M., Liaska I.I., Aleksieienkova M.V. The satellite radar monitoring of post-mining area (Solotvyno, Ukraine). *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov. 2021, Vol. 2021, Mon-21-075. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2075>
- Winston R.B. ModelMuse version 5.1.1: U.S. Geological Survey Software Release, 15 November 2022. <https://doi.org/10.5066/P90QQ94D>
- Yu Ch., Kamboj S., Wang C., Cheng J.-J. Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures. United States: N. p., 2015. Web. <https://doi.org/10.2172/1224969>

Надійшла до редакції 14.12.2022  
Надійшла у ревізованій формі 19.09.2023  
Прийнята 15.12.2023

## REFERENCES

- Bedekar V., Morway E.D., Langevin C.D., Tonkin M. 2016. MT3D-USGS version 1: A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A53. <http://dx.doi.org/10.3133/tm6A53>.
- Charley Yu., Sunita Kamboj, Cheng Wang, Jing-Jy Cheng. 2015. Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures. United States. <https://doi.org/10.2172/1224969>
- Doherty J. 2015. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing, ISBN: 978-0-9943786-0-6.
- Elizarov A.F., Elizarova N.N. 1955. Report. Solotvyn rock salt deposit (Geological exploration in 1948–1949). SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. 14676, vol. 1 (in Russian).
- Frolov M.V. 1971. Report on exploration of the Solotvyn water intake site for 1969–1971. Groundwater reserves estimation as of 1 April 1971. Beregovo, 1971. Western Geological Expedition. Kyiv. 1971. SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. 33225. 1 (in Russian).
- Gesch D. B., Verdin K. L., Greenlee S. K. 1999. New land surface digital elevation model covers the Earth, *Eos, Earth and Space Science News*, 80 (6): 69–70. doi:10.1029/99EO00050.
- Harbaugh A.W., Langevin C.D., Hughes J.D., Niswonger R.N. and Konikow L.F. 2017. “MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017”. doi:<http://dx.doi.org/10.5066/F7RF5S7G>.
- Kityk W.I., Bokun A.N., Panov G.M., Slivko E.P., Schaydietskaya W.C. 1983. Halogen formations of Ukraine: Transcarpathian through. (in Russian).
- Korostashovets Y.P., 1957. Report. Hydrogeological conditions of the Solotvyn rock salt deposit. SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. 18253/2, 1 (in Russian).
- Pitalenko E.I. 2008. Report. Hydrogeological and geotechnical research performance in order to establish site of water entry into the Solotvyn salt mine and geomechanical processes implementation studies in the development of Solotvyno salt deposit and the impact of salt mines on the environment. UkrNDMI Archive, inv. No. 2302 (in Ukrainian).
- Pollock D.W. 2016. User guide for MODPATH Version 7–A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016–1086. ISSN: 2331-1258. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20161086>
- Privalov V.A., Panova E.A. 2008. Geodynamic and hydrogeological regime features of the Solotvyn rock salt deposit (Transcarpathian internal trough). *Scientific works of DonNTU, Series mining geology*, 7 (135): 155–162 (in Russian).
- Rusyniak R.P. 2015. Report. Results of the prospecting drilling in Solotvyn area. SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. 64855, 1 (in Ukrainian).
- Selianchyn M.I. 1986. Report. Exploration of the North site Solotvyn rock salt deposit in 1977–1986. SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. 49345, 1 (in Russian).
- Selianchyn M.I. 1995. Report. Additional exploration deep horizons of mine №8 Solotvyn rock salt deposit in 1992–1995. SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. 55852, 1 (in Ukrainian).
- Shakin A.V., 2010. Report. Geological-economic appraisal Solotvyno gas field, SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No.64855, 1 (in Ukrainian).
- Shekhunova S.B., Aleksieienkova M.V., Stadnichenko S.M. 2019. Regularities of natural and antropogenic hazardous processes development for Solotvyno (Transcarpathia, Ukraine). *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, 12: 70–83. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745> (in Ukrainian).
- Shekhunova S.B., Pakshin M.Yu., Stadnichenko S.M., Liaska I.I., Aleksieienkova M.V. 2021. The satellite radar monitoring of post-mining area (Solotvyno, Ukraine). *Materials of the XV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, 17–19 November 2021, Kyiv, Ukraine. Mon-21-075. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2075>

- Shekhunova S.B., Siumar N.P., Stadnichenko S.M., Aleksieienkova M.V. 2021. The Lithological Model of the suprasalt Complex of the Sotolvyno Salt Dome Structure. *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, 14 (2): 119–128. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245822> (in Ukrainian).
- 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 Sotolvyno (Transcarpathia). *Monitoring 2019*, 1(2019):1–5. Published by European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903197>
- Shekhunova S.B., Aleksieienkova M.V., Stadnichenko S.M., Siumar N.P. 2015. The integrated geological model of Sotolvyno structure as a tool to assess geoeological sustainability of Sotolvyno rock-salt deposit. *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, 8: 233–250. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791> (in Ukrainian).
- Shestopalov V.M., Rudenko Yu. F., Stetsenko B.D. 2008. Development of a preliminary model of Sotolvyn rock salt deposit. Kyiv: State Institution Radioenvironmental Centre of the NAS of Ukraine (in Russian).
- Shupikov A.R., Sabov Yu. V., Vasilev I.N., Tashi V.M. 1970. Report. Additional exploration in 1967–1970 of Sotolvyno rock salt deposit (Transcarpathian region). SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. № 32263, 1 (in Russian).
- Stetsenko B.D., Shestopalov V.M., Rudenko Yu.F. 2021. Hydrogeological problems of the Sotolvyno rock salt deposit and their analysis using modeling (Ukraine). *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, 14 (2): 94–110. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245937> (in Ukrainian).
- Tirkel M.G., Artemenko P.G., Pitalko E.I., Pedchenko S.V. 2009. Geomechanical research as a method of studying man-made hydrodynamic regime in Sotolvyno saltmine. *Transactions of UkrNDMI of the NAS of Ukraine*, 5 (1): 124–130 (in Russian).
- Winston R.B. 2022. «ModelMuse version 5.1.1: U.S. Geological Survey Software Release. <https://doi.org/10.5066/P90QQ94D>
- Yakovlev Ye.O., Shekhunova S.B., Aleksieienkova M.V., Siumar N.P. 2016. Assessment of the stress-strain state of rocks of the Sotolvyno salt-dome structure in Transcarpathia. *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, 9: 83–96. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2016.144246> (in Ukrainian).
- Yosypenko T.M. 2014. Report. Integrated geophysical measurements of the karst in the territory of Carpathian and Transcarpathian. SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No.№ 64133, 1 (in Ukrainian).

Received 14.12.2022

Received in revised form 19.09.2023

Accepted 15.12.2023

## Гідродинамічна модель Солотвинського родовища кам'яної солі

С.Б. Шехунова<sup>1</sup>, Ю.О. Негода<sup>1,2\*</sup>, С.М. Стадніченко<sup>1</sup>, [В.М. Шестопалов<sup>2</sup>], Ю.Ф. Руденко<sup>2</sup>, Н.П. Сюмар<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

E-mail: shekhun@gmail.com; stadnichenkosm@gmail.com; siumar1982@gmail.com

<sup>2</sup> Державна установа «Науково-інженерний центр радіогідроекологічних полігонних досліджень НАН України», Київ, Україна

E-mail: negoda@nas.dov.ua; shestopalov@nas.gov.ua; rud@hydrosafe.kiev.ua

\* Автор для кореспонденції

Розробка родовищ кам'яної та калійної солі в Закарпатті та Передкарпатті (Західна Україна) має потенційний вплив на водні ресурси та транскордонне поширення сольового забруднення. Зокрема, до таких об'єктів належить Солотвинське родовище кам'яної солі на березі р. Тиса на границі України та Румунії. Вплив техногенного навантаження (підземне видобування кам'яної солі) в межах родовища призвів до деформації структури та характеру водообміну, активізації суфозійно-карстових процесів, деформацій земної поверхні, катастрофічних припливів підземних вод у гірничі виробки, а в результаті – до припинення розробки цього родовища у 2010 р. Проте з припиненням солевидобування не припинився розвиток перерахованих вище небезпечних геологічних процесів, обумовлених як природними, так і техногенними факторами. З метою обґрунтування заходів для запобігання забрудненню басейну р. Тиса була створена гідрологічна модель Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій, що дозволило спрогнозувати напрямки та швидкість руху прісних та засолених підземних вод. При побудові моделі використано нові матеріали про особливості геологічної будови та гідрологічних умов досліджуваної території (дані моніторингу підземних вод). Модернізована гідродинамічна модель включає п'ять шарів (основні водоносні горизонти і роздільні шари). В результаті моделювання отримані карти векторів дійсної швидкості фільтрації та гідроізопісї рівнів підземних вод для двох водоносних горизонтів (четвертинного і тортонського). На основі результатів розв'язання низки обернених задач доведена функціональна відповідність моделі природно-антропогенним умовам. За результатами попередніх розрахунків дійсної швидкості фільтрації підземних вод та ліній течії просування інертного забруднювача встановлено, що час його просування від контура розповсюдження соляного штоку до р. Тиса становить приблизно 2–3 роки. Розроблена гідродинамічна модель буде використана для обґрунтування мережі пунктів гідрологічних та гідрологічних спостережень з метою оптимізації моніторингу процесів забруднення водного середовища.

**Ключові слова:** Солотвинське родовище кам'яної солі; підземні води; тривимірна гідродинамічна модель; прогноз; моніторинг.