

УДК 556.3:504.61:622.016

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.13>

Зенон ХЕВПА, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-6759-9850

e-mail: zenonzxv@gmail.comДержавна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України", Київ, Україна

Віктор ДОЛІН, д-р геол. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-6174-2962

e-mail: vdolin@ukr.netДержавна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України", Київ, Україна

Євгеній ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук, голов. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-6934-618x

e-mail: yakovlevhydro@gmail.com

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

ОЦІНКА РОЗВИТКУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ШАХТНОМУ ПОЛІ СТЕБНИЦЬКОГО КАЛІЙНОГО РОДОВИЩА ЗА ДАНИМИ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Наведено результати аналізу та узагальнення об'єктових гідрогеологічних моніторингових спостережень динаміки рівнів підземних вод. Проведено обробку гідрорежимних досліджень, виконаних у 2009–2021 рр. на території гірничого відводу рудника № 2. Побудовано гідрогеологічні розрізи, які відображають зміни рівнів води та зони геомеханічних (карстово-провальних) порушень водоносних пластів у часі. Найважливішим чинником осідання земної поверхні і деформації фільтраційного потоку є розвиток соляного карсту. Оцінку інтенсивності карстопровальних процесів здійснено на основі інтерпретації результатів динаміки рівнів підземних вод. Об'єктова моніторингова мережа підземної гідросфери складається з більш як 30 кушових спостережних свердловин, пробурених до надсоліного і четвертинного водоносних горизонтів. Визначено основні причини деформацій солепородного масиву та земної поверхні: зменшення геомеханічної міцності ціликів унаслідок їх гідратації та наступного осідання під геостатичним навантаженням покривних порід та осідання внаслідок карстового процесу глинистої товщі, що покриває соліносні породи. За результатами спостережень у просторовому плані проведено гідрогеологічно орієнтоване зонування території гірничого відводу. Унаслідок розвитку складнопобудованої депресії у зоні впливу карстово-провального дренажу практично по всій території протягом 2009–2019 рр. спостерігається пониження рівнів води горизонтів гіпсо-глинистої шляпи. Процес формування депресійної лійки прогресує в північно-західному напрямку, що свідчить про розвиток високопроникного карстового каналу в солях. Значний приплив надсоліних вод на південно-західній та центральній ділянці шахтного поля в поєднанні з інтенсивним закарстуванням соліносного масиву та відкладів гіпсо-глинистої шляпи в межах депресійної лійки призвели до значної деформації земної поверхні, формування карстових провалів та техногенно-екологічних загроз об'єктам критичної інфраструктури. З метою запобігання техногенно спричиненій екологічній катастрофі нагально необхідно розробити наукове обґрунтування гранично допустимих змін екологічних параметрів техногенно-геологічної системи рудника № 2 Стебницького калійного родовища у стадії постмайнінгу.

Ключові слова: гірничі виробки, шахтне поле, деформація земної поверхні, гідрогеологічні свердловини, режимні спостереження, геологічне середовище, дебіт водопритоку.

Постановка проблеми. Рудник № 2 Стебницького калійного родовища від 1978 р. перебуває в аварійному стані внаслідок припливу низькомінералізованої агресивної до соляного масиву води з надсоліного водоносного горизонту. Це супроводжується критичним зволоженням, ослабленням та руйнуванням несучих елементів гірничих виробок (ціликів, стелін та ін.) і розвитком соляного карсту, деформаціями та провалами поверхні. У 2002 р. прийнято рішення щодо мокрої консервації рудника (ДІГГ, 2002). У зоні впливу рудника № 2 створено мережу спостережних свердловин, обладнаних фільтровими колонами в межах основних горизонтів, що формують водоприток у гірничий простір: глинисто-гіпсової шляпи (ГГШ) і розсільного горизонту. У свердловинах проводилися систематичні заміри рівня води. У природних умовах рівні підземних вод встановлювалися на глибинах від 2,7 до 18,2 м від земної поверхні. Після прориву води в рудник № 2 сформувалася депресія, рівні підземних вод фіксуються на глибинах від 0,1 до 49,5 м. Депресія рівня підземних вод надсоліного горизонту латерально видовжена у західному та південному напрямках, що дає підстави для висновку, що основні зони живлення надсоліного водоносного горизонту розташовані в долині р. Вишніці і потоку

Вольєрний, у межах яких можливе формування розуцільнення та підвищеної проникності порід. На цій території відбувається активна інфільтрація річкових і атмосферних вод через алювіальні поклади і глинисто-гіпсову шляпу. У результаті припливу води на поверхню розчинних соліносних відкладень утворюються карстові порожнини, над якими відбувається нерівномірне осідання поверхні (Дяків та ін., 2018, 2019, 2021). У західному напрямку депресія збігається за формою з виходом легкорозчинних калійних руд під гіпсово-глиняну шапку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Геоелекологічні, гідрохімічні, гідрогеоелекологічні аспекти формування водних товщ карстового озера на місці провалу № 27 над рудником № 2 Стебницького гірничо-хімічного підприємства "Полімінерал" (за результатами матеріально-балансового моделювання та моніторингових спостережень) розглянуто у публікаціях В. Дяківа, З. Хевпи, А. Драновської (Дяків та ін., 2018, 2019, 2021). Особливості гідрогеологічних умов Стебницького родовища розглянуті у роботі А. Варламова зі співавторами (Варламов та ін., 1971). Традиції видобутку та соляна геологія на Стебницькій шахті, Передкарпатського регіону, розглянуті у роботі К. Буковського та Г. Чаповського

(Bukowski, Czapowski, 2009). Забруднення і негативний вплив стічних вод на калійних шахтах та іонний дисбаланс у навколишньому середовищі відображений у роботах Н. Бабершке зі співавторами (Baberschke et al., 2019a, 2019b).

Подібне цілеспрямоване вивчення просторово-часових змін рівнів підземних вод у спостережних свердловинах з наданням оцінки розвитку деформацій земної поверхні на шахтному полі рудника № 2 Стебницького родовища калійних солей раніше не проводилося.

Проблеми та явища, що відбуваються у процесі підземного вилугування соляних порід та їх руйнування розглянуті в роботах П. Дутко та В. Зільбершміда зі співавторами (Дудко, 1972; Зільбершмідт та ін., 1992). Техногенні порушення геологічного середовища у районах розробки калійних родовищ обговорено у роботах Я. Семчука (Лукаш та Семчук, 1995; Семчук, 2001; Семчук та Малишевська, 2002). У праці С. Кореневського (Кореневський та Донченко, 1963) розглянуто питання геологічної будови та умов формування калійних родовищ Передкарпаття.

Формулювання цілей статті. Метою цієї роботи було проаналізувати просторово-часові зміни рівнів підземних вод у спостережних свердловинах та оцінити розвиток деформацій земної поверхні на шахтному полі рудника № 2.

Об'єкт досліджень – техногенно-геологічна система (ТГС) "техногенний комплекс-геологічне середовище" рудника № 2 Стебницького калійного родовища, який практично перебуває у стадії постмаїнінгу шляхом консервації за концепцією "мокрої консервації" (авторска білітаційного затоплення гірничих виробок).

Метод досліджень – комплексний, порівняння, аналіз, моделювання та прогнозування осідань і деформацій земної поверхні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Стебницьке родовище калійних солей (виявлене у 1854 р., експлуатується з 1922 р.) розташоване в Дрогобицькому районі Львівської області, в 9,0 км на північний схід від м. Дрогобич. Родовище умовно поділяється на чотири ділянки: Північно-Західну, Центральну, Південну і Південно-Східну. Північно-Західна ділянка розроблялась рудником № 2, який у 1988 р. законсервовано через складні гідрогеологічні умови. Решта ділянок розробляється рудником № 1. Родовище відроблялось системами ортів і штреків з відбиванням руди свердловинами. До балансових запасів віднесено запаси, які лежать в інтервалі від нижньої межі водозахисного цілика (стелина) до 1037 м від поверхні (абсолютна позначка – 700 м), що відповідають кондиціям і мінімальній промисловій потужності (5 м). До позабалансових віднесено запаси водозахисних ціликів. Гідрогеологічні та інженерно-геологічні умови експлуатації родовища складні внаслідок неоднорідності літологічного складу та геотехнічних параметрів солерудного тіла.

Стебницьке родовище калійно-магнієвих солей у геоструктурному плані розташоване у Внутрішній зоні Передкарпатського прогину і приурочене до відкладів воротищенської соленосної світи нижнього міоцену. Калійні поклади разом із соленосними породами представлені здебільшого брекчіями і зім'яті у вузькі лінійні складки, що зумовлює невитриманість водотривів і зміни глибин залягання та проникності водоносних горизонтів. Глибини залягання калійних солей у складчастих структурах сягають 1000 і більше метрів, потужність продуктивних пластів коливається від кількох до сотні метрів,

складаючи в середньому 20–30 м. Кути падіння пластів – 70–80°. Порооди, які вміщують калійні пласти, є галітовими утвореннями із вмістом кам'яної солі до 59–60 %, соленосними брекчіями, подекуди – соленосними глинами та поліміктовими пісковиками на галітовому цементі.

У наближених до земної поверхні ділянках продуктивна товща перекривається ГГШ, яка складена продуктами вивітрювання соленосних утворень – вторинними матеріалами. Потужність зони змінюється від 15 до 100 м, сягаючи подекуди 150 м. Над соленосними брекчіями ГГШ представлена безструктурними загіпсованими глинами, уламками пісковика, гніздами і лінзами піску. Над калійними покладами "шапка" більше загіпсована (глинисто-гіпсо-ангідритова порода, уламки з прошарками гіпсу серед загіпсованих глин).

Рельєф підшви ГГШ ("соляного дзеркала") складний. Перепад абсолютних відміток підшви до 50–70 м. Найменша потужність ГГШ у долинах річок, де водночас соляні відклади зосереджені на вищих відмітках. Над рудними покладами підшва глинисто-гіпсової шапки утворює псевдо-антиклінальні структури. Походження цих форм може бути пов'язане з боковим стискуванням порід, у результаті чого більш пластичні шари видавлюються з підвищенням їх покрівлі.

У гідрогеологічному відношенні Стебницьке родовище має складну гідрогеофільтраційну структуру, яка здатна до значних змін у техногенних умовах. Гідрогеологічні особливості його зумовлені двочленною будовою розрізу – соленосні відклади на родовищі мають складну гіпсометричну поверхню та скрізь перекриті товщею порід утворених унаслідок змін у зоні гіпергенезу (товща ГГШ).

Підземні води в алювіальних відкладах розвинуті в долинах річок Вишниця, Солониця, Вольєрної та Колпещкої балки. У верхній частині розрізу залягають переважно глини і суглинки, у нижній – не витримані по площі супіщано-суглинисті відклади з великим вмістом гравію або гравійно-галечникові відклади з піщано-глинистим заповнювачем. Коефіцієнти фільтрації в суглинках і глинистих породах із супіщаними прошарками не більші 0,07 м/добу, а в піщаних ґрунтах від 0,18 до 0,47 м/добу. Води гідрокарбонатно-хлоридні натрієві або хлоридно-гідрокарбонатні натрієві з мінералізацією 1–3 г/л. На окремих ділянках нижньої частини розрізу розвинуті гравійно-галечникові відклади із супіщаним заповнювачем. Коефіцієнт фільтрації у гравійно-галечникових відкладах із глинистим і супіщаним заповнювачем – 0,02–0,2 м/добу. У ГГШ підземні води поширені спорадично. Коефіцієнти фільтрації ГГШ дуже низькі та змінюються від 0,0001 до 0,04 м/добу у верхній і середній частинах розрізу, і від 0,00004 до 0,04 м/добу в нижній більш глинистій його частині.

Розсільний горизонт у зоні контакту соленосних порід із глинисто-гіпсовою шапкою розвинутий переважно в межах поширення калійних пластів. У природних умовах горизонт характеризувався повільним водообміном. У верхній і середній частинах розрізу мінералізація підземних вод сягає 5–70 г/л, а поблизу поверхні соляного дзеркала збільшується до 320–350 г/л. За переважальними компонентами води хлоридно-сульфатні натрієво-магнієві, хлоридні натрієві. Будова надсол'ювого колектора залежить від мінерального складу солі. На виходах полімінеральної солі вона являє собою піскоподібний матеріал, який складають залишки слабозрочинних солей, глазериту ($3\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$), мірабіліту ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Нижче по розрізу він змінюється на крупноуламкову сіль різного складу, ще нижче – суцільна сіль з тонкими тріщинами. На

однорідних чисто галітових покладах поверхня зони розчинення може бути гладкою, а глина утворює із сіллю щільний слабопроникний контакт.

Соленосні відклади в цілому водотривкі. У підземних виробках за час експлуатації рудника було понад 40 проявів розсолу на всіх горизонтах шахти у вигляді вологих плям і капежів. Вони приурочені до прошарків ангідриту і зон розвитку в калійних пластах карналіту, полігаліту, епсоміту і глазериту.

Критичні зміни гідрогеологічних умов зумовлені проливом розсолів із надсолітового колектора у жовтні 1978 р. на контакт рудного покладу нижньої лінзи пласта № 10 із соленосними породами в камеру 115 рудника № 2. Спершу в незначних кількостях потрапляли води сульфатного типу з великим вмістом хлоридів натрію і сульфатів магнію, потім за різкого збільшення дебітів їх змінили води, в яких хлорид магнію відсутній, а у великій кількості присутні сульфати натрію. У результаті постійного росту водопритливів у соленосній товщі утворилась значна кількість карстових та суфозійно-карстових пустот і порожнин. У районі прориву води сформувалась депресійна лійка. Для перехоплення води було створено

дренажний горизонт. Водопритлив поступово збільшився з 500–600 до 900–1100 м³/добу. У районі родовища поширені водоносний горизонт у четвертинних відкладах і розсільний горизонт у зоні контакту соленосних порід із глинисто-гіпсовою шапкою. Води пролювіально-делювіальних відкладів у малопотужних супіщано-суглинистих відкладах (1–5 м) поширені спорадично і являють собою верховодку з обмеженим впливом на формування припливів.

Результати гідрогеологічних досліджень. Для стеження за рухом вод і визначення їхнього хімічного складу на шахтному полі Стебницького калійного родовища було створено мережу гідрогеологічних спостережних свердловин, профільно-центрична схема розташування яких враховувала вплив структурно-геологічної будови, змін літологічного складу та потенційних напрямків розвитку карстово-провальних форм на формування депресійної лійки (профілі показано на рис. 7). Вона включає понад 30 свердловин, пробурених на нижню, центральну та верхню частини розрізу ГГШ. Спостереження за рівнями води у свердловинах проводили щомісяця (табл. 1), хімічний склад визначали двічі на рік.

Таблиця 1

Абсолютні відмітки рівня води в гідроспостережних свердловинах на шахтному полі рудника №2

№ свердловини	Абсолютна відмітка устя, м	Грудень 2009		Грудень 2019		Різниця відміток XII.2009–XII.2019
		Глибина до води, м	Абсолютна відмітка, м	Глибина до води, м	Абсолютна відмітка, м	
96-с	334,23	1,8	332,43	1,55	332,68	0,25
135-с	338,07	3,26	334,81	19,70	318,37	16,44
153-с	335,7	47,95	287,75	39,45	296,25	8,5
154-с	338,4	22,40	316,0	25,10	313,3	2,7
155-с	344,3	9,83	334,47	49,50	294,8	39,67
180-с	343,16	14,93	328,23	17,10	326,06	2,17
182-с	353,98	29,80	324,18	28,0	325,98	1,8
135-с'	338,07	1,39	336,68	1,68	336,39	0,29
153-с'	335,7	38,76	296,94	34,40	301,30	4,36
154-с'	338,4	13,17	325,23	13,75	324,65	0,58
155-с'	344,3	6,80	337,5	30,68	313,62	23,88
175-с	325,96	15,80	310,16	41,80	284,16	26,0
180-с'	343,16	9,89	333,27	9,78	333,38	0,11
182-с'	353,98	20,20	333,78	27,70	326,28	7,5
136-с	340,16	3,36	336,80	8,95	331,21	5,59
143-с	354,92	12,13	342,79	21,69	333,23	9,56
160-с	338,59	3,23	335,36	6,23	332,36	3,0
167-с	325,0	3,40	321,60	2,33	322,67	1,07
168-с	320,33	2,7	317,63	5,47	314,86	2,77
173-с	335,25	6,15	329,10	5,81	329,44	0,34
136-с'	340,16	2,67	337,49	4,10	336,06	1,43
141-с'	357,8	8,67	349,13	12,29	345,51	3,62
168-с'	320,33	2,75	317,58	0,37	319,96	2,38
167-с'	325,0	0,89	324,11	1,85	323,15	0,96

Просторова інтерпретація динаміки рівня підземних вод у спостережних свердловинах свідчить про істотну латеральну гідрогеологічну диференціацію території:

- між шахтними полями рудників № 1 і № 2 та на східному фланзі шахтного поля рудника № 2, яка контролюється свердловинами № 141, 143, 168, 170 171, 172, 173 та ін. У цих свердловинах протягом водопритливу в рудник № 2 спостерігалось пониження рівня (рис. 1, 2). Після ліквідації водопритливу почалося відновлення рівнів і вони стабілізувалися на природних відмітках. Невеликі коливання вірогідно пов'язані із сезонними змінами живлення;

- на західному фланзі шахтного поля рудника № 2 (свердловини № 96, 101, 150, 151, 167, 181, 182 та ін.). Ці свердловини оточують утворені карстові озера, які у

період їх наповнення були дренами водоносних горизонтів покривних порід. У них спостерігається поступове зростання рівня, що свідчить як про зменшення дренавання, так і про відновлення інфільтраційного живлення водоносного горизонту (рис. 3, 4). Водночас у свердловинах № 182, 151, пробурених на цій території, спостерігається швидке пониження рівня води. Це може свідчити про розвиток карстового каналу в солях і про наближення до свердловини зони безнапірної течії розсолів. Постійне пониження почалося в середині 2009 р., коли спостерігалась інтенсифікація карстових провалів і перехоплення ними підземного потоку.

- на південному фланзі шахтного поля рудника № 2 у долині р. Вишніці (свердловини № 180, 154, 153, 157, 160, 166 та ін.), а також у центральній частині шахтного

поля рудника № 2 (№ 134, 135, 136, 155, 175 та ін.). Тут спостерігається в загальному зростання рівнів, що свідчить про збільшення інфільтрації. Особливо різкий ступеневий ріст відзначається у свердловині № 175 та 155. За 10 років рівень понизився у свердловині № 175 на

26 м, у свердловині № 155 на 39,6 м. У період 2015–2018 рр. він змінився різким падінням. Це може свідчити про наближення карстових каналів і збільшення їх дренажного впливу навколо осушеної зони над дренажними виробками і пластом № 10 (рис. 5, 6).

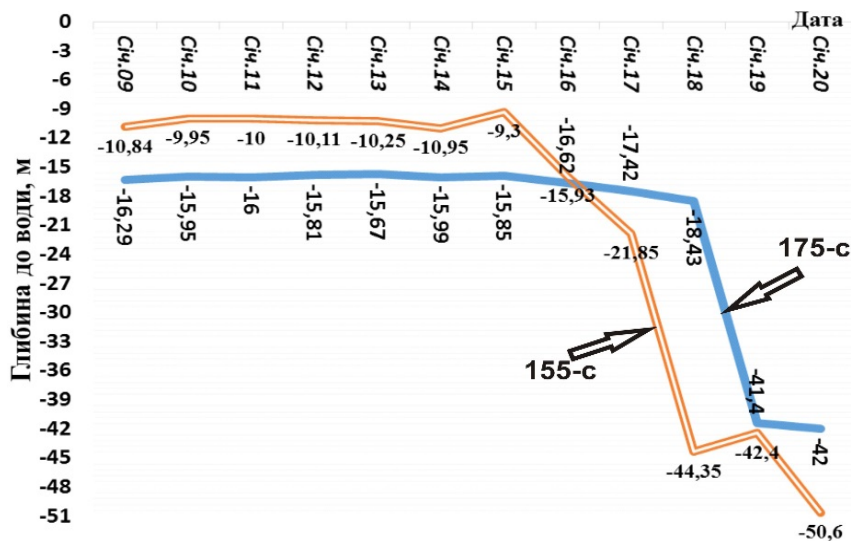


Рис. 1. Графік зміни у 2009–2020 роках рівня води в гідропостережній свердловині 175-С, абсолютна відмітка устя 325,96 м та свердловині 155-С, абсолютна відмітка устя 344,3 м

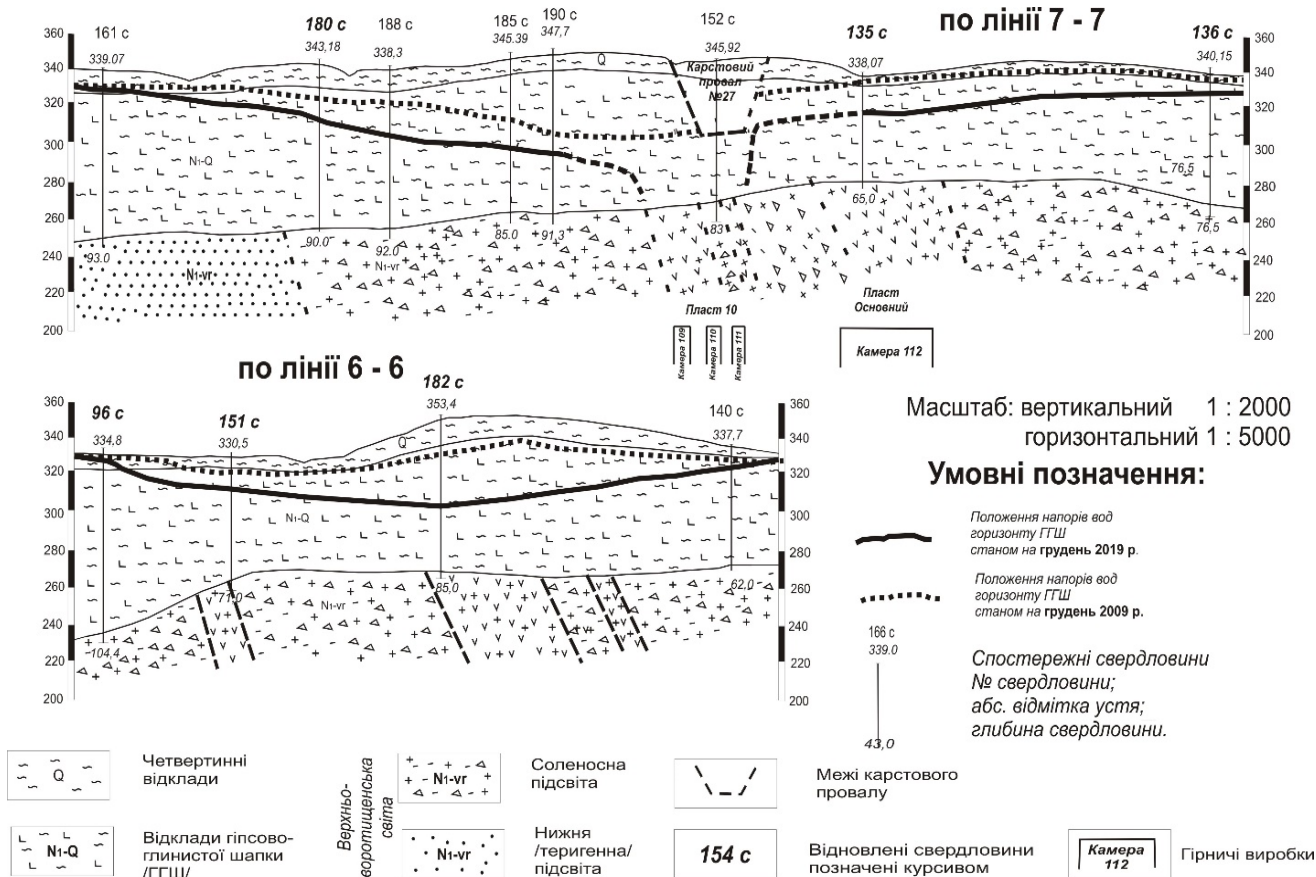


Рис. 2. Гідрогеологічні розрізи на ділянці прориву надсолевих вод у рудник № 2, по лінії 6–6; 7–7

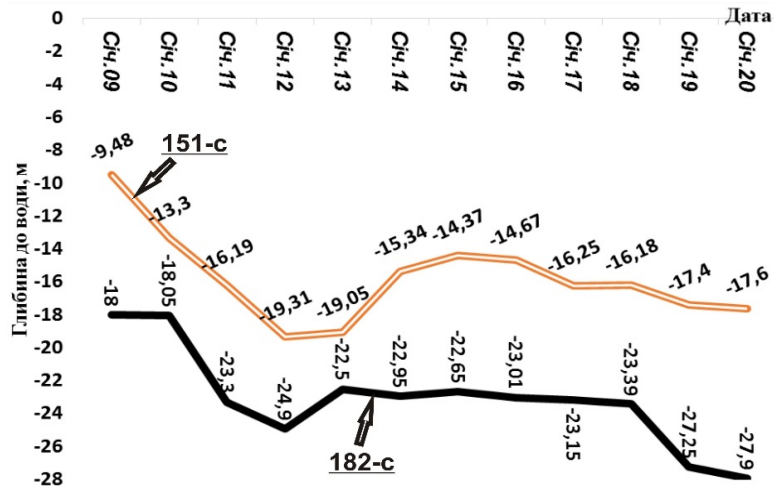


Рис. 3. Графік зміни у 2009–2020 роках рівня води в гідропостережній свердловині 182-С, абсолютна відмітка устя 353,98 м та 151-С, абсолютна відмітка устя 331,02 м

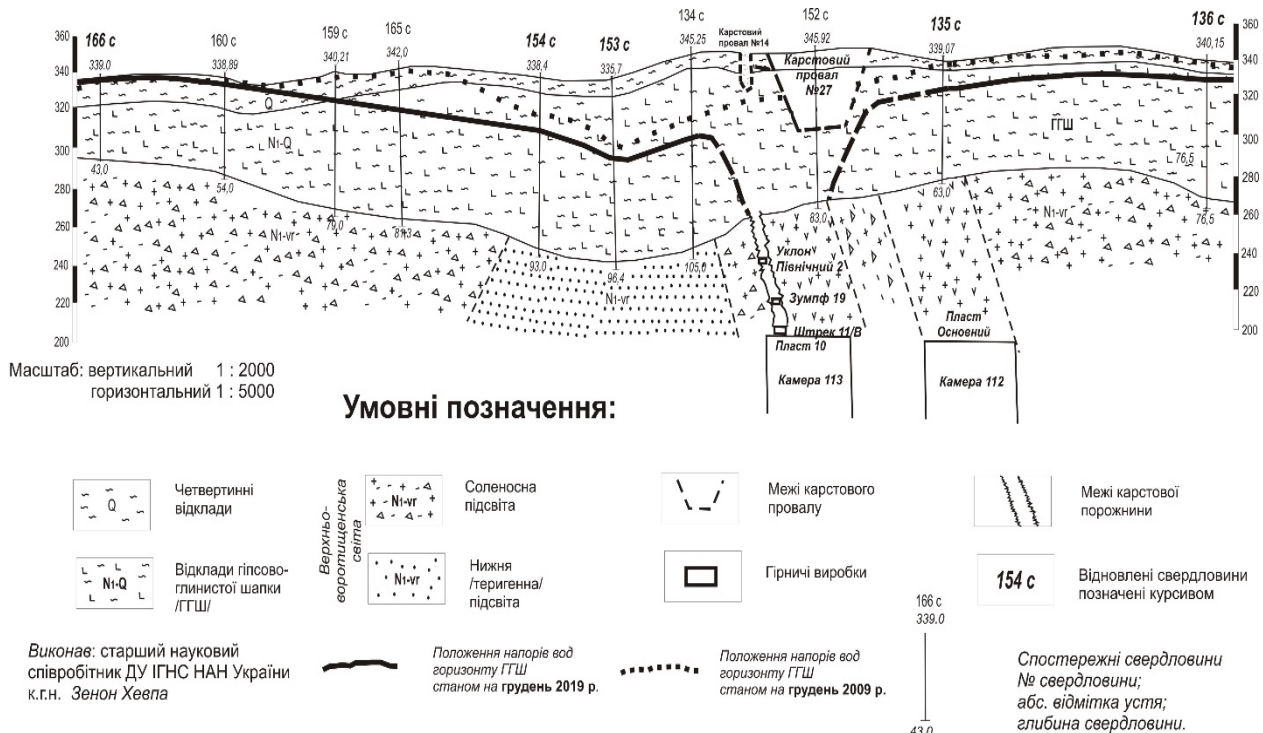


Рис. 4. Гідрогеологічний розріз на ділянці прориву надсолевих вод у рудник № 2, по лінії 4-4

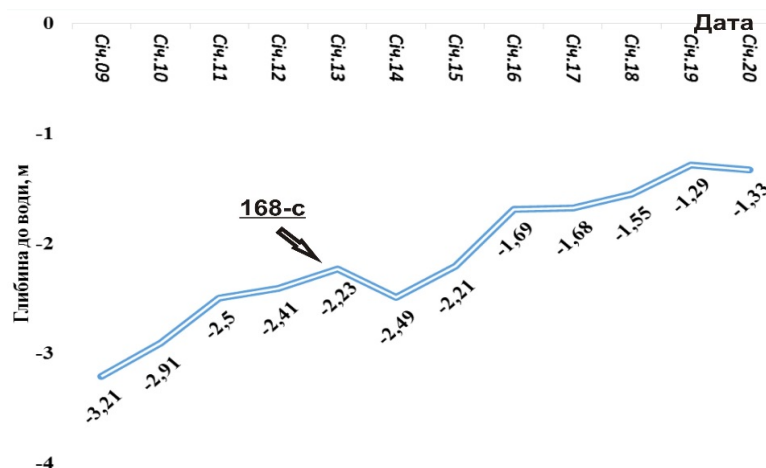
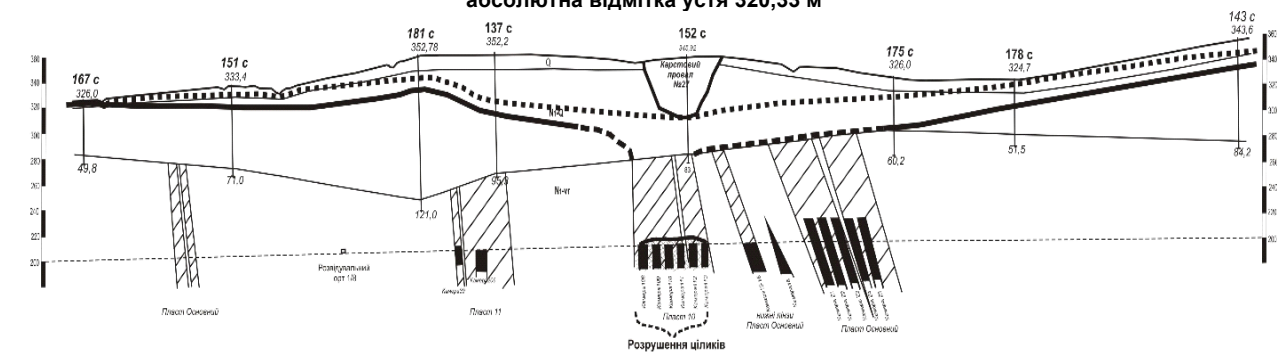


Рис. 5. Графік зміни у 2009–2020 роках рівня води в гідропостережній свердловині 168-С, абсолютна відмітка устя 320,33 м



Масштаб: вертикальний 1 : 2000
горизонтальний 1 : 5000

Умовні позначення:



Рис. 6. Гідрогеологічний розріз на ділянці прориву надсолевих вод у рудник № 2, по лінії 5–5

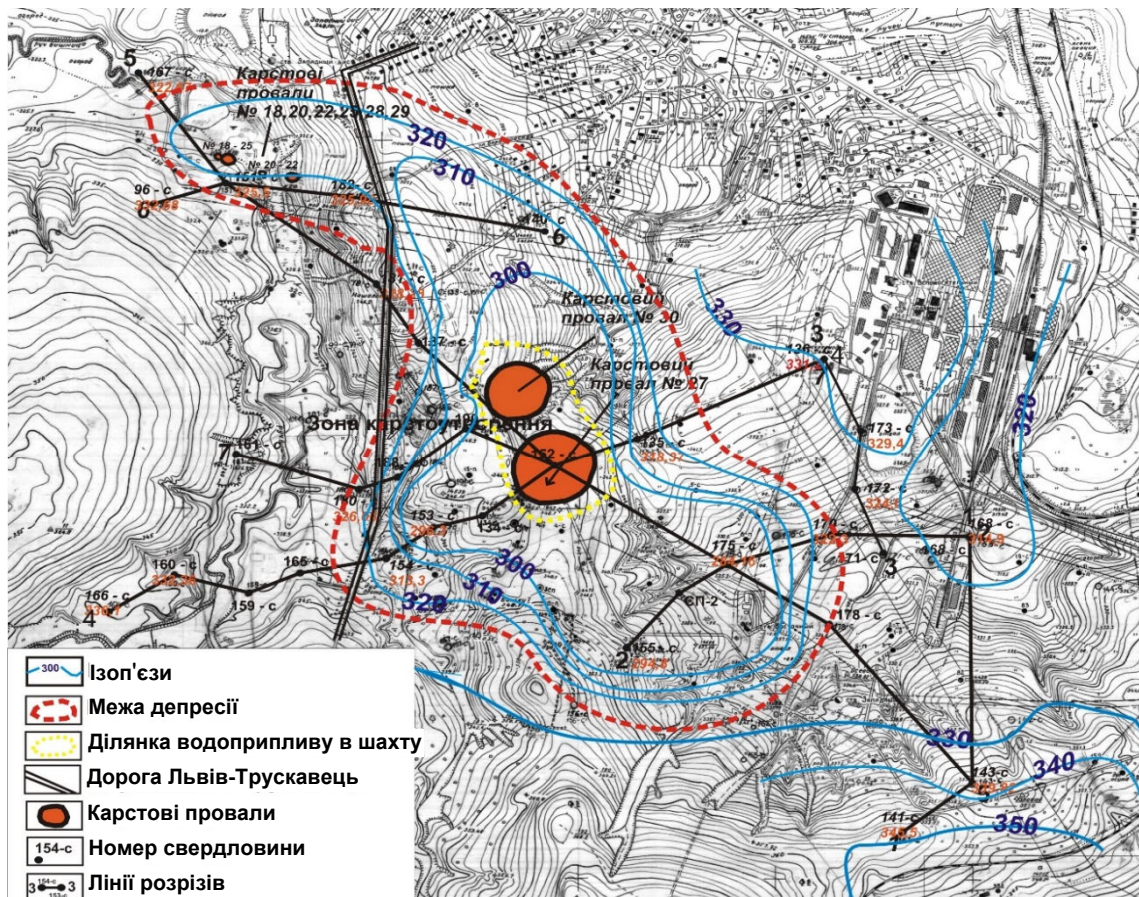


Рис. 7. Карта-схема ізоп'єз горизонту гіпсо-глинистої шляпи рудника № 2 Стебницького калійного родовища

Спостережувана динаміка рівнів підземних вод свідчить про формування депресійної лійки, яка простягається від Трускавецького лісового масиву на південному сході в північно-західному напрямку вздовж нашарування покладів.

Рівень напорів від горизонту гіпсо-глинистої "шляпи" в 2019 р. встановлювався в цьому районі на глибинах від 0,1 до 49,5 м, тоді як до виникнення течі глибина рівнів встановлювалася на глибині 11–15 м. Режимні

спостереження в мережі свердловин вказують на зниження рівнів з північно-західної сторони течії. Положення рівнів у свердловинах № 182, 151, 175, 155, 135, 136 є значно нижчим порівняно із замірами в інших свердловинах, це вказує на те, що процес розвитку депресійної лійки продовжує прогресувати, збільшуючи її площу.

На основі наших спостережень за рівнем води у свердловинах побудовано карту-схему ізоп'єз надсольового водоносного горизонту (рис. 7).

Форма ізоп'єз збігається з маркшейдерськими даними щодо осідання земної поверхні, які були нами зіставлені. У районі східної мульди, де розташовані виробки дренажного горизонту, спостерігається зона осушення, у якій водоносний горизонт повністю здренований. Навколо зони осушення утворилася депресійна лійка завглибшки близько 30 м від початкової поверхні водного дзеркала. Від центру депресійної лійки спостерігаються її три субдепресії (різнорозмірних фрагментів): перша витягнута до східного стовбура, друга – до ставка на р. Вишніці, третя – в напрямку до західної мульди. Ці субдепресії (різнорозмірних фрагментів) вказують на напрямки розвитку ділянок підвищеної проникності та найбільших припливів води в гірничі виробки.

Від депресійної лійки до західної мульди простежується вузька депресія, яка в плані збігається з виходом під гіпсово-глиняну товщу калійних пластів, вилугування яких могло призвести до розущільнення покривних порід з формуванням зони підвищеної проникності. Порівняння схеми ізоп'єз з картою просідання поверхні однозначно вказує на визначну роль соляного карсту в розвитку деформацій поверхні. Прикладом цього є карстовий провал № 27 (розмір 250х200 м, глибина 45 м), який утворився 30 вересня 2017 р. у 300 м на схід від дороги Львів–Трускавець і розташований над підземними відробленими камерами 109–115 Пд–Сх пласта, та карстовий провал № 30 (розмір 110х100 м, глибина до 50 м) з дуже крутими, майже вертикальними бортами, які постійно обвалюються, який утворився 15 березня 2020 р. і розташований 90 м на Пн–Зх від карстового провалу № 27 (рис. 4, 7). Оскільки депресійна лійка досягла дрен району основного живлення, то в подальшому прогнозовано потрібно очікувати її поглиблення та можливого утворення карстових провалів на земній поверхні.

Висновки

1. Встановлено, що внаслідок розвитку складнопобудованої депресії у зоні впливу карстово-провального дренажу практично по всій території гірничого відводу рудника № 2 протягом 2009–2019 рр. спостерігається пониження рівнів води горизонтів гіпсо-глинистої шляпи. Процес формування депресійної воронки прогресує в північно-західному напрямку, що свідчить про розвиток карстового каналу в солях.

2. У місцях розвитку карстових процесів, у напорах надсольових вод горизонтів гіпсо-глинистої шапки сформована депресійна лійка, яка простягається на віддалі 1600–1900 м від Трускавецького лісового масиву на південному сході, до р. Вишніця на заході, охоплює ділянки діючої автодороги Львів–Трускавець та запроєктованої і частково збудованої об'їзної траси до м. Трускавець. Осідання поверхні зумовлене розвитком карсту на контакті соленосних порід із глинистою товщею в зоні низхідного розвантаження потоку у виробки дренажного горизонту. Існує висока вірогідність провалів поверхні, які можуть спровокувати обвалення водозахисної товщі над зруйнованими ціликами.

3. Значний водопривплив надсольових вод на південно-західній та центральній ділянці шахтного поля рудника

№ 2 у сполученні з інтенсивним закарстуванням соленосного масиву та відкладів гіпсо-глинистої шляпи в межах депресійної лійки призвело до значної деформації земної поверхні, формування карстових провалів та техногенно-екологічних загроз об'єктам критичної інфраструктури.

4. Додатковим фактором просторово-часової активізації деформацій земної поверхні та розвитку карстово-провальних форм може бути зростання впливу глобальних змін клімату (збільшення зливових опадів, потепління, зростання частоти і висоти повеней і паводків), що вимагає вдосконалення моніторингу на основі впровадження технологій ГІС, ДЗЗ, математичного та натурального моделювання.

5. З метою запобігання техногенно спричиненій екологічній катастрофі нагально необхідно розроблення наукового обґрунтування гранично допустимих змін екологічних параметрів техногенно-геологічної системи "техногенний комплекс-геологічне середовище" рудника № 2 Стебницького калійного родовища у стадії постмаїнінгу шляхом еколого-технологічної консервації.

Acknowledgement. This project has received funding through the MSCA4Ukraine project, which is funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. Neither the European Union nor the MSCA4Ukraine Consortium as a whole nor any individual member institutions of the MSCA4Ukraine Consortium can be held responsible for them.

Список використаних джерел

- Варламов. А.А., Козлов. С.С., Липницький. В.К., Ходьков. А.Є. (1971). Гідрогеологічні умови Стебницького родовища калійних солей. *Матеріали з гідрогеології та геол. ролі підземних вод*. Вид-во ЛДУ, 12–132.
- Дудко, П.М. (1972). Підземне вилугування солей. Надра.
- Дяків, В.О., Хевпа, З.З., Драновська, А.В. (2018). Аварія 30 вересня 2017 року на шахті № 2 Стебницького гірничо-хімічного підприємства "Полімінерал": причини, наслідки та сучасний стан (за результатами моделювання матеріального балансу та моніторингових спостережень): *матеріали П'ятої міжнар. наук.-практ. конф. "Інвестиційні перспективи надрокористування "Україна", Трускавець*. Т. 1, 103–116.
- Дяків, В.О., Хевпа, З.З., Драновська, А.В. (2021). Сучасний стан шахти № 2 Стебницького ГХП "Полімінерал" та його вплив на карстологічну ситуацію (за матеріалами моніторингових спостережень, експериментального та матеріало-балансового моделювання): *матеріали Сьомої міжнар. наук.-практ. конф. "Надрокористування в Україні. Перспективи інвестиційної України"*, Львів. Т. 2, 169–181.
- Дяків, В.О., Хевпа, З.З., Ковальчук, М.М. (2019). Геоекологічна характеристика та гідрохімічний склад товщ карстових озер, утворених на місці провалу № 27 над шахтою № 2 Стебницького гірничо-хімічного підприємства "Полімінерал": *матеріали Шостої міжнар. наук.-практ. конф. "Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування"*, Трускавець. Т. 2, 215–222.
- Зільбершмідт, В.Г., Зільбершмідт, В.В., Каймарк, О.Б. (1992). *Руйнування соляних порід*. Наука.
- Кореневський, С.М., Донченко, К.Б. (1963). Геологія та умови формування калійних родовищ Радянського Передкарпаття. Геологія родовищ калійних солей. *Тр. ВСЕГП. Нов. сер.*, 99, 3–152.
- Лукаш І.О., Семчук Ю.М. (1995). Вплив відходів калійних заводів на гідрохімічний режим підземних вод. *Хімічна промисловість України*, 2, 81–84.
- Рекомендації щодо мокрої консервації шахти № 2 Стебницького ДГХП "Полімінерал" (2002). *ДІГГ*. (с. 18–24). Калуш.
- Семчук, Ю.М., Малишевська, О.С. (2002). Дослідження процесів розчинення та вимивання соляних порід для оцінки наслідків затоплення калійних шахт. *Хімічна промисловість України*, 1, 9–12.
- Семчук, Я.М. (2001). Техногенне порушення геологічного середовища в районах розробки калійних родовищ. *Вугілля України*, 9 (537), 41–45.
- Baberschke, N., Irob, K., Preuer, T., Meinelt, T., Kloas, W. (2019a). Potash mining effluents and ion imbalances cause transient osmoregulatory stress, affect gill integrity and elevate chronically plasma sulfate levels in adult common roach, *Rutilus rutilus*. *Environmental Pollution*, 249, 181–190. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.004 [in German].
- Baberschke, N., Schulzik, L., Preuer, T., Knopf, K., Meinelt, T., and Kloas, W. (2019b). Potash mining effluents and ion imbalances cause transient stress in adult common roach, *Rutilus rutilus*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 180, 733–741. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.05.069.
- Bukowski K., Czapowski G. (2009). Salt geology and mining traditions: Kalush and Stebnyk mines (Fore-Carpathian region, Ukraine). *Geotourism/Geoturystyka*, 3(18), 27–34. DOI: 10.7494/geotour.2009.18.3.27.

References

- Baberschke, N., Irob, K., Preuer, T., Meinelt, T., Kloas, W. (2019a). Potash mining effluents and ion imbalances cause transient osmoregulatory stress, affect gill integrity and elevate chronically plasma sulfate levels in adult common roach, *Rutilus rutilus*. *Environmental Pollution*, 249, 181–190. [in German]. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.004.
- Baberschke, N., Schulzik, L., Preuer, T., Knopf, K., Meinelt, T., and Kloas, W. (2019b). Potash mining effluents and ion imbalances cause transient stress in adult common roach, *Rutilus rutilus*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 180, 733–741. [in German]. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.05.069.
- Bukowski, K., Czapowski, G. (2009). Salt geology and mining traditions: Kalush and Stebnyk mines (Fore-Carpathian region, Ukraine). *Geotourism/Geoturystyka*, 3(18), 27–34 [in Polish]. DOI: 10.7494/geotour.2009.18.3.27.
- Dudko, P.M. (1972). Underground leaching of salts. *Nedra* [in Russian].
- Dyakiv, V.O., Khevp, Z.Z., Dranovska, A.V. (2018). The accident on September 30, 2017 at mine №2 of the Stebnytsky mining and chemical enterprise "Polymneral": causes, consequences and current state (based on the results of material balance modeling and monitoring observations). *Fifth international scientific and practical conference "Investment prospects of subsoil use "Ukraine", Truskavets. Conference materials*, Vol. 1, 103–116 [in Ukrainian].
- Dyakiv, V.O., Khevp, Z.Z., Dranovska, A.V. (2021). The current state of mine №2 of the Stebnytsky HPP "Polymneral" and its influence on the karstological situation (based on the materials of monitoring observations, experimental and material balance modeling). *Seventh international scientific and practical conference "Ukrainian subsoil use. Prospects of investment Ukraine"*, Lviv. *Conference materials*, Vol. 2, 169–181 [in Ukrainian].
- Dyakiv, V.O., Khevp, Z.Z., Kovalchuk, M.M. (2019). Geocological characteristics and hydrochemical composition of strata of karst lakes formed at the site of failure №2 above mine №2 of the Stebnytsky Mining and Chemical Enterprise "Polymneral". *The sixth international scientific and practical conference "Subsoil use in Ukraine. Investment prospects", Truskavets. Conference materials*, Vol. 2, 215–222 [in Ukrainian].
- Korenevskiy, S.M., Donchenko, K.B. (1963). Geology and conditions of formation of potash deposits of Soviet Precarpathia. Geology of potash deposits: *Tr. VSEGEI. Nov. sir.*, 99, 3–152 [in Russian].
- Lukash, I.O., Semchuk, Yu.M. (1995). The influence of potash plant waste on the hydrochemical regime of groundwater. *Chemical industry of Ukraine*, 2, 81–84 [in Ukrainian].
- Recommendations for wet conservation of mine No. 2 of the Stebnytsky DHHP "Polymneral" (2002). *DIGG*. (p. 18–24). Kalush [in Ukrainian].
- Semchuk, Y.M. (2001). Man-made disturbance of the geological environment in the areas of development of potash deposits. *Coal of Ukraine*, 9 (537), 41–45 [in Ukrainian].
- Semchuk, Yu.M., Malyshevska, O.S. (2002). Study of processes of dissolution and leaching of salt rocks to assess the consequences of potash mine flooding. *Chemical Industry of Ukraine*, 1, 9–12 [in Ukrainian].
- Varlamov, A.A., Kozlov, S.S., Lipnitskiy, V.K., Khodkov, A.E. (1971). Hydrogeological conditions of the Stebnikovskiy deposit of potash salts. *Materials on hydrogeology and geol. the role of underground waters*. Publishing House of LSU, 124–132 [in Russian].
- Zilbershmidt, V.G., Zilbershmidt, V.V., Kaimark, O.B. (1992). Destruction of salt rocks. *Nauka* [in Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 16.04.23
Прорецензовано / Revised: 31.08.23
Схвалено до друку / Accepted: 18.10.23

Zenon KHEVPA, PhD (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0002-6759-9850

e-mail: zenonzxv@gmail.com

State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Victor DOLIN, DSc (Geol.), Prof., Research Director

ORCID ID: 0000-0001-6174-2962

e-mail: vdolin@ukr.net

State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Eugene YAKOVLEV, DSc (Tech.), Chief Researcher

ORCID ID: 0000-0001-6934-618X

e-mail: yakovlevhydro@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE DEVELOPMENT OF DEFORMATIONS ON THE EARTH'S SURFACE WITHIN THE STEBNYTSKY POTASSIUM DEPOSIT MINE FIELD BY THE DATA OF HYDROGEOLOGICAL SURVEILLANCE

The paper presents the data generalization of the observations of hydrogeological monitoring of mining sites on the dynamics of groundwater level. The processing of hydro-regime studies conducted in 2009–2021 in the area of the mine bypass of the №2 pit was carried out. Hydrogeological sections reflecting changes in water levels over time were prepared. The most important factor in the lowering of the ground surface is salt karst development. The evaluation of the intensity of karst collapse processes was based on the interpretation of the results of the dynamics of the subsurface water level. The site network consists of more than 30 observation wells drilled into suprasaline and Quaternary aquifers. The main causes of deformation of the salt rock massif and the earth's surface have been identified. These are a decrease in the geomechanical strength of the rock due to its hydration and subsequent subsidence under the geostatic load of the overlying rock, and subsidence of the clay layer covering the salt rock due to the karst process. Based on the observed data, hydrogeologically oriented spatial zoning of the mining concession was performed. As a result of the development of a complex depression in the area of influence of the karst drainage, a drop in the water level in the gypsum-clay horizons was observed over the entire area in 2009–2019. The depression funnel runs in a northwesterly direction, indicating the development of a karst channel in the salts. Significant inflow of suprasaline water in the southwestern and central parts of the mine field combined with intense karstification of the salt massif and gypsum-clay cap deposits within the depression funnel resulted in significant deformation of the earth's surface, formation of karst funnels, and technogenic and ecological threats to critical infrastructure objects. To prevent a man-made ecological catastrophe, it is urgent to develop a scientific rationale for the maximum permissible changes in the environmental parameters of the man-made geological system of the №2 mine of the Stebnytsky potash deposit during the post-mining phase.

Keywords: mine processing, mine field, deformation of the earth's surface, hydrogeological wells, regime observations, flow rate of water inflow.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.