

DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.316324>

УДК 504.064.2:
:553.63.068.2(477.87)

E-mail:

shekhun@gmail.com
shehunova@nas.gov.ua
<https://orcid.org/0000-0002-5975-3491>
stadnichenkosm@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1038-6878>
siumar@meta.ua
<https://orcid.org/0000-0001-5950-7576>
yakovlev@niss.gov.ua

Ключові слова: Солотвинське родовище кам'яної солі, моніторинг геологічного середовища, гідродинамічна модель, небезпечні геологічні процеси, соляний карст.

Keywords: Sotolvyn rock salt deposit; groundwater flow model, geological environment monitoring, hazardous geological processes, salt karst.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2024. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА СОЛОТВИНСЬКОГО РОДОВИЩА КАМ'ЯНОЇ СОЛІ ТА ПРИЛЕГЛИХ ТЕРИТОРІЙ (ЗАКАРПАТТЯ, УКРАЇНА)

COMPLEX MONITORING SYSTEM PLAN OF THE SOLOTVYN SALT MINE AREA AND ITS SURROUNDINGS (ZAKARPATTIA, UKRAINE)

**Шехунова С. Б., Стадніченко С. М., Сюмар Н. П., Яковлев Є. О.
Stella B. Shekhunova, Svitlana M. Stadnichenko, Natalia P. Siumar,
Evgeniy O. Yakovlev**

Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine, O. Honchara Str. 55-B,
Kyiv, Ukraine, 01601, Ukraine

Розробка родовищ кам'яної солі часто має катастрофічні наслідки, призводить до негативного впливу на навколишнє середовище у довгостроковій перспективі, що може становити загрозу безпеці життєдіяльності населення. Незважаючи на те що розробка Солотвинського родовища була припинена 15 років тому через неконтрольований розвиток карсту, його невідступний прогрес проявляється у розширенні вже існуючих величезних провалів земної поверхні, деградації ландшафту та розвитку інших небезпечних геологічних явищ. Метою даної роботи була розробка комплексної системи моніторингу для своєчасного виявлення і оцінки небезпечних змін стану геологічного середовища та ефективного контролю процесів, що відбуваються після завершення солевидобутку у Солотвині. На підставі отриманих результатів досліджень (польових спостережень, аналізу даних супутникового радіолокаційного моніторингу, геологічного та гідродинамічного моделювання) розроблено план комплексної системи моніторингу, яка вписується у більш широку регіональну структуру для відстеження якісних і кількісних змін поверхневих і підземних вод та деформацій земної поверхні в межах Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій. Впровадження розробленої системи моніторингу з інтегрованою постійно діючою гідродинамічною моделлю має стати засобом безпечного економічного та соціального розвитку селища і основою для оцінок і контролю стану навколишнього середовища для упередження трансграничного забруднення, інструментом управління використання природних ресурсів Солотвина — рапи та покладів кам'яної солі.

Rock salt mining often leads to catastrophic consequences, significant negative environmental impact in long-term perspective and poses a threat to the population's safety. Despite the fact that the exploitation of the Sotolvyn deposit was ceased fifteen years ago due to uncontrolled karst development, its continuous progress is evidenced by the expansion of already existing large sinkholes, landscape degradation and manifestations of other hazardous geological processes. The aim of this study was to develop a complex monitoring system for timely detection and assessment of hazardous changes in the geological environment and effective control of processes that occur within the Sotolvyn post-mining

Цитування: Шехунова С. Б., Стадніченко С. М., Сюмар Н. П., Яковлев Є. О. Система комплексного моніторингу геологічного середовища Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій (Закарпаття, Україна). Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2024. Том 17, вип. 2. С. 3–25. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.316324>.

Citation: Shekhunova S. B., Stadnichenko S. M., Siumar N. P., Yakovlev E. O., 2024. Complex monitoring system plan of the Sotolvyn salt mine area and its surroundings (Zakarpattia, Ukraine). Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 17. Iss. 2. Pp. 3–25. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.316324>.

area. Based on obtained studies results (field observations, remote sensing satellite radar monitoring data analysis, geological and hydrodynamic modelling) the complex monitoring system plan, which fits into the wider regional framework for tracking the surface and near subsurface water qualitative and quantitative changes and the ground surface deformations within Solotvyn area have been developed. The implementation of provided monitoring system with an integrated permanent hydrodynamic model should become a measure for safe economic and social settlement development and a basis for environmental assessments and control to prevent transboundary pollution, as well as a tool for management of Solotvyn natural resources usage – brines and rock salt.

ВСТУП

У багатьох випадках видобуток корисних копалин несе в собі невід’ємний ризик для людей і навколишнього середовища, насамперед геологічного середовища як основного «депоцентру» техногенних наслідків. З огляду на те, що розчинення і руйнування приповерхневих і поверхневих соляних тіл є природним і безперервним процесом, солевидобуток, безперечно, несе в собі певні ризики. Коли таке соляне тіло розкривається бурінням або частини соляного покладу видобуваються без відповідного дотримання встановлених вимог, то спричинені порушення можуть прискорити природне розчинення і обвалення, іноді з неочікуваними екологічними наслідками (Warren, 2016). У всьому світі наслідки видобутку кам’яної солі торкнулися багатьох регіонів, деякі з них мали місце століття тому. До прикладу, у 1909 р. в Іновроцлаві (Польща) сталися катастрофічні провали земної поверхні, а також руйнування будівель через розвиток карстово-суфозійних та інших техногенних процесів (Szczerbowski, Gawatkiewicz, 2023); у 1977 р. утворилося катастрофічне провалля над відпрацьованим підземним простором на родовищі Вапно (Andrusikiewicz, 2017). Обвал на солеруднику Каргіл (Cargill – неподалік м. Хатчінсон, Канзас, США) стався 21 жовтня 1974 р. – утворилась кругла депресія діаметром близько 90 м і завглибшки майже 15 м (Walters, 1978; Warren, 2016). У 1994 р. було втрачено соляну шахту Ретсоф (Retsof, шт. Нью Йорк, США) через формування двох великих круглих ліюк над обваленими гірничими виробками (Шехунова, 2020; Gowan, Trader, 1999; Payment, 2000). Ще одним випадком катастрофічних руйнувань і припинення видобутку солі через розвиток карсту в США є шахти Джефферсон-Айленд і Уікс-Айленд (Луїзіана), які були випадково затоплені водою (1980), після чого утворилися лійки на земній поверхні (Johnson, 2021; Martinez, 1991). 4 березня 1998 р. на соляних шахтах Гелленонкур (Gellenoncourt, поблизу Лотарингії, Франція) стався обвал над соляними кавернами SG4 і SG5, утворилося провалля шириною понад 50 м і 40 м завглибшки (Buffet, 1998; Warren, 2016).

У Закарпатті кам’яну сіль видобували ще з часів Римської імперії в с. Олександрівка, Данилівка, Нересниця, м. Тячів (рис. 1) і, зокрема, в с-щі Солотвині, де наслідки солевидобутку є яскравим прикладом катастрофічного впливу на навколишнє середовище гірничовидобувних робіт. Систематична розробка солі Солотвинського родовища підземним способом (шахтами) була розпочата у 1778 р. – з того часу родовище кам’яної солі розробляли дев’ять шахт, більшість з яких були закладені у центральній його частині (Иванченко, Сабов, 1967). Унікальним Солотвино стало у 1980-х роках, коли паралельно з видобутком солі тут працювали підземні алергологічні відділення, лабораторія з вивчення елементарних частинок, тобто відпрацьований підземний простір використовувався комплексно. Водночас масштаби впливу на геологічне середовище також поступово збільшувалися, що призвело до затоплення двох діючих шахт на території ДП «Солотвинський солерудник» з 2007 по 2010 р., утворення величезних провалів земної поверхні та розвитку інших небезпечних геологічних явищ (Шехунова та ін., 2015).

Негативними наслідками солевидобутку в Солотвині є не тільки деградація ландшафту через неконтрольований розвиток соляного карсту, а й забруднення поверхневих та підземних вод. Дана територія є прикордонною, Україна тут межує з Румунією, Угорщиною і Словаччиною, що дає підстави сусіднім державам турбуватися з приводу загрози транскордонного забруднення р. Тиса. За даними Регіонального управління водного господарства Верхньої Тиси (м. Ньїредьгаза, Угорщина) у 2008 р. максимальні концентрації хлоридів перевищували 500 мг/л в околицях м. Тячів, за 35 км нижче за течією від Солотвина. Ймовірно, регуляція водопритоків відбувалась одночасно з відкачуванням мінералізованих вод і скиданням їх у потічки, що впадають у р. Тиса. У 2008 році було запропоновано як новий стандарт SWQS (якості поверхневих вод) для хлоридів >200 мг/л, як порогове значення для визначення якості поверхневих вод. Разом з тим у європейському законодавстві



Рис. 1. Райони солевидобутку в Україні (побудовано з використанням даних (Гурський та ін., 2006; Довгий, 2014; Шехунова, 2020; Примушко, 2021).

Fig. 1. Salt mining areas in Ukraine (compiled using data from Gursky et al., 2006; Dovgyi, 2014; Shekhunova, 2020; Prymushko, 2021).

засолення прісних вод не вважається важливою проблемою і не існує законодавчо встановлених стандартів якості навколишнього середовища для солі. У 2010 р. Міністерство надзвичайних ситуацій України визначило екологічну катастрофу у Солотвині як надзвичайну ситуацію державного рівня, у 2013 р. було припинено роботу ДП «Солотвинський солерудник». Після завершення періоду активного видобутку солі середньорічні концентрації хлоридів у р. Тиса знизилися. Тобто, слід розрізняти миттєві пікові концентрації (з урахуванням сезонності) та загальні довгострокові концентрації хлоридів у річковій воді. Однак вже понад 15 років угорська сторона висловлює занепокоєння щодо ризиків транскордонного забруднення р. Тиса. Це стало однією з причин реалізації у 2019–2023 рр. міжнародного проєкту REVITAL-1 (HUSKROUA/1702/6.1/0072) програми транскордонного співробітництва Європейського інструменту сусідства Угорщина–Словаччина–

Румунія–Україна, спрямованого на планування комплексної системи моніторингу геологічного середовища в Солотвині.

Попередні дослідження міжнародного рівня за участі авторів були зосереджені на виявленні та описі небезпечних геологічних процесів природного та природно-техногенного характеру, їх картуванні, аналізі та ранжуванні в рамках реалізації проєкту ImProDiReT-783232 (2018–2020 рр.) за підтримки Генерального Директорату Європейської комісії з питань цивільного захисту та гуманітарної допомоги DG ECHO (Shekhunova et al., 2019).

З огляду на дефіцит кам'яної солі в Україні через втрату Артемівського родовища внаслідок російської агресії виконано роботи, спрямовані на визначення перспектив освоєння природних ресурсів Солотвина, зокрема відновлення солевидобутку, на підставі зниження ризиків в рамках реалізації науково-дослідного проєкту «Стратегічна

мінеральна сировина для відновлення економіки України: аналіз ресурсів та запасів, розробка критеріїв пошуку для нарощування їх мінерально-сировинної бази» (2023–2024 рр.) державної програми пріоритетних досліджень.

У статті викладено результати виконаних досліджень, на основі яких обґрунтовано розроблену систему комплексного моніторингу території колишнього гірничодобувного підприємства у Солотвині. Функціонування цієї системи надасть можливість своєчасно виявляти та оцінювати небезпечні зміни стану геологічного середовища і фактори впливу на безпеку життєдіяльності населення на локальному та транскордонному рівнях.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ І МЕТОДОЛОГІЯ

Геомоніторинг стану навколишнього середовища: цілі, нормативна база, функції. Важливим аспектом досліджень видобутку корисних копалин є безперервний моніторинг території для отримання повного розуміння процесу. Такий підхід дає можливість визначити важливі аспекти гірничодобувної діяльності та її наслідки. За даним напрямом розроблені спеціальні системи моніторингу впливу на довкілля діяльності гірничодобувних підприємств на основі поєднання методів дистанційного зондування Землі, геофізичних досліджень, геодезичного знімання, моделювання та/або імітації ризиків та об'єднання їх в інтегровані системи управління ризиками (Johnson, 2005; Paskaleva et al., 2010; Gutiérrez et al., 2014; Alkhatib, Paffenholz, 2019; Cooper, 2020; Kretschmann, Nguyen, 2020; Pawlik, Rudolph, 2024). Імплементация таких систем моніторингу надає можливість у майбутньому ефективно контролювати всі важливі процеси, що відбуваються після завершення видобутку корисних копалин і вживати превентивних заходів. Застосування супутникових даних дозволяє виявити зміщення земної поверхні і, таким чином, спрогнозувати потенційне осідання землі та утворення карстових лійок (Cooper, 2002; Padmanaban, Bhowmik, Cabral, 2017; Kretschmann, 2020). Інтегрування результатів дистанційного зондування з результатами дослідження стану геологічного середовища сприяє значно ефективнішій інтерпретації, що також важливо для прогнозування, оцінки та управління ризиками (Pawlik et al., 2022).

Моніторинг геологічного середовища — це система спостережень, збору, обробки, передавання, зберігання та аналізу інформації про стан геологічного середовища, прогнозування

його змін, розробки науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття відповідних рішень (Засади формування ..., 2022; Копач та ін., 2009). Моніторинг стану геологічного середовища здійснюється щодо екзогенних та ендемогенних геодинамічних процесів (визначення їх просторових характеристик, активності проявів), підземних вод (оцінка ресурсів, гідрогеологічні та гідрохімічні показники і властивості); геохімічних показників, геофізичних параметрів тощо.

Правові засади здійснення моніторингу навколишнього середовища регулюються Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» (Закон України «Про охорону...», 1991), основні принципи функціонування державної системи моніторингу довкілля визначені Постановою Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 № 391 «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» (Постанова Кабінету Міністрів..., 1998). Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 13.06.2024 № 684 «Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем» визначені механізм організації та порядок функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем, в тому числі геологічного середовища (Постанова Кабінету Міністрів від 13.06.2024 ..., 2024).

Правове визначення та підтримка організації і здійснення державної системи моніторингу довкілля в частині державного моніторингу вод визначаються такими правовими актами:

- *Водний кодекс України* (Водний кодекс України..., 1995);
- *Закон України «Про затвердження Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року»* (Закон України «Про затвердження..», 2013);
- *Постанова Кабінету Міністрів України від 19 вересня 2018 р. № 758 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод»* (Постанова Кабінету Міністрів..., 2018).

Закон України «Про державну геологічну службу України» містить поняття «моніторингу геологічного середовища» і «моніторингу мінерально-сировинної бази» та, серед інших основних завдань, покладає на державну геологічну службу України завдання з моніторингу мінерально-сировинної бази, геологічного середовища та підземних вод (Закон України «Про державну...», 1999).

Важливим аспектом національного законодавства є положення статті 22 Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», що передбачають проведення спостереження за станом навколишнього природного середовища та рівнем його забруднення підприємствами, установами та організаціями, діяльність яких призводить або може призвести до погіршення стану навколишнього природного середовища (Стаття 22 Закону України «Про охорону...», 1991). Крім того, передбачено, що зазначені підприємства, установи та організації зобов'язані безоплатно передавати відповідним державним органам аналітичні матеріали своїх спостережень.

Глава 6 Водного кодексу України передбачає ведення державного обліку вод і Державного водного кадастру (Глава 6 Водного кодексу..., 1995). Завданням державного обліку вод є встановлення відомостей про кількість і якість вод, а також даних щодо водокористування, на підставі яких здійснюється розподіл води між водокористувачами та розробляються заходи щодо раціонального використання і охорони вод та відтворення водних ресурсів. Відповідно до Порядку ведення державного обліку водокористування «організація ведення державного обліку водокористування здійснюється Держводагентством та покладається на Держводагентство і ДСНС (у частині поверхневих вод) та Держгеонадра (у частині підземних вод)».

Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII встановлює правові та організаційні засади оцінки впливу на довкілля, спрямованої на запобігання шкоді довкіллю, забезпечення екологічної безпеки, охорони довкілля, раціонального використання і відтворення природних ресурсів, у процесі прийняття рішень про провадження господарської діяльності, яка може мати значний вплив на довкілля, з урахуванням державних, громадських та приватних інтересів (Закон України «Про оцінку...», 2017).

До списку стандартів ЄС:

- Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2000 року про встановлення засад діяльності Співтовариства у сфері водної політики «Водна рамкова директива» (Directive 2000/60/EC ..., 2000);
- Директива 2004/35/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 квітня 2004 року про екологічну відповідальність щодо запоби-

гання та усунення екологічної шкоди (Directive 2004/35/EC..., 2004);

- Директива 2006/118/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 12 грудня 2006 року про захист підземних вод від забруднення та погіршення якості (Directive 2006/118/EC..., 2006);
- Директива 2006/21/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 15 березня 2006 року про управління відходами видобувних галузей та внесення змін до Директиви 2004/35/ЄС – Заява Європейського Парламенту, Ради та Комісії (Directive 2006/21/EC..., 2006);
- Директива Комісії 2009/90/ЄС від 31 липня 2009 року, що встановлює, відповідно до Директиви 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради, технічні специфікації для хімічного аналізу та моніторингу стану води (текст має відношення до ЄЕЗ) (Commission Directive 2009/90/EC..., 2009);
- Директива (ЄС) 2020/2184 Європейського Парламенту та Ради від 16 грудня 2020 року про якість води, призначеної для водопостачання (нова редакція) (Directive (EU) 2020/2184..., 2020);
- Протокол про стратегічну екологічну оцінку до Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті (Protocol on Strategic ..., 2008);
- ISO 31000:2018: Управління ризиками – принципи та настанови щодо впровадження. Міжнародна організація зі стандартизації (ISO 31000:2018..., 2018).

Аналіз актуальних політик і директив, пов'язаних з екологічними проблемами на території шахт постмайнінгу в ЄС – проєкт DEMINE (Analysis ..., 2018), є таким:

- Кілька адміністрацій та галузевих департаментів є компетентними щодо стічних вод із закритих шахт. У багатьох випадках адміністрація, яка має здійснювати очищення шахтних стоків, чітко не визначена. У нормативно-правових актах має бути чітко визначена адміністрація, відповідальна за очищення стічних вод.
- Критерії, які використовують держави-члени для декларування «Національного реєстру небезпечних для здоров'я та довкілля видобувних галузей», не є чіткими. Адміністрації, відповідальні за управління водними ресурсами, мають періодично відбирати проби з тих шахтних стоків із закритих шахт, які вважаються найбільш небезпечними, з подальшим

аналізом ризику для річки, до якої потрапляють ці стоки.

- Європейське законодавство не встановлює порогових значень для більшості забруднювальних металів, незважаючи на їх визнану токсичність для довкілля. Кожна країна-член ЄС визначає свої власні обмеження. Це створює велику різницю в порогових нормах для всієї Європи, які мають бути уніфіковані.
- У європейському законодавстві засолення прісних вод не вважається важливою проблемою і не існує законодавчо встановлених стандартів якості навколишнього середовища для солі. Для захисту прісних вод слід розробити стандарти засоленості для конкретних іонів та сумішей іонів, а не лише для загальної мінералізації.

Геологічний контроль за вивченням і використанням надр регулюється відповідно до Положення про Державну службу геології та надр України, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 1174 від 30.12.2015 (зі змінами) (Положення про Державну..., 2015), Держгеонадра реалізує державну політику у сфері геологічного вивчення та раціонального використання надр.

Геомоніторинг стану навколишнього середовища Солотвина. На досліджуваній території формується нерівноважна складна природно-техногенна геосистема в межах зони техногенного впливу соляних шахт, з якою пов'язане формування екологічних загроз безпеці життєдіяльності на території селища.

Нині вкрай необхідна сучасна система моніторингу даної природно-техногенної геосистеми, що дало б можливість своєчасно виявляти та оцінювати небезпечні зміни стану геологічного середовища. Зокрема, для оцінки ризиків і прогнозування розвитку небезпечних геологічних процесів необхідний моніторинг розвитку карсту, осідань (деформацій земної поверхні), кількості та якості поверхневих і підземних вод (рівень і хімічний склад). Моніторинг якості підземних вод є одним з найважливіших аспектів захисту ресурсів підземних вод, найефективніше він реалізується шляхом створення мережі спостережних свердловин. Таким чином, небажаний вплив на навколишнє середовище можна виявити на ранній стадії та ефективно усунути. Частота моніторингу має бути достатньою для отримання репрезентативних даних стосовно параметра, що контролюється. Свердловини потрібні вище

і нижче за течією, у напрямку потоку підземних вод, для моніторингу змін рівня і якості води на території, а також для моніторингу продуктивності і стабільності параметрів. Крім того свердловини повинні бути розміщені у водовмісних породах та/або зонах перетікання (вздовж ліній розломів) (Шестопапов, Люта, 2016; Bravante, Holden, 2009; Scheidler et al., 2021).

Таким чином, основними функціями системи моніторингу навколишнього середовища території Солотвина мають стати спостереження (Zhang, Wang, 2012; Vandenberg, Salzsauler, Donald, 2016; Kretschmann, 2020; Stadnichenko et al., 2023) за:

- станом будівель і природних об'єктів у зоні впливу шахтного поля;
- станом надр у зоні впливу гірничих робіт;
- розвитком природних і техногенних небезпечних геологічних процесів, які є потенційно небезпечними для населення:
 - карст і суфозія (осідання, карстові лійки, провали),
 - повінь, паводки, підтоплення,
 - схилі процеси (ерозія, зсуви).
- за зсувонебезпечними ділянками;
- за забудовою площ залягання корисних копалин;
- станом гідротехнічних споруд в організаціях, підконтрольних органам державного гірничого нагляду;
- витратами, рівнем і складом поверхневих і підземних вод;
- забрудненням, спричиненим використанням надр, поверхневих вод і геологічного середовища, зокрема підземних вод;
- дотриманням встановленого режиму в зонах і округах санітарної та гірничо-санітарної охорони родовищ підземних вод, а також корисних копалин, віднесених до категорії бальнеологічних;
- розробкою ділянок родовищ корисних копалин;
- обліком руху запасів корисних копалин (у разі легалізації використання розсолів вони будуть вважатися корисними копалинами);
- експертними оцінками та прогнозуванням шкідливого впливу гірничих робіт на навколишнє природне середовище, рівнем раціонального і комплексного використання запасів корисних копалин та забезпечення охорони надр.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для обґрунтування системи моніторингу території Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій були виконані наступні роботи:

- **Створено базу даних з геології Солотвинської солянокупольної структури** та вмісних порід – дані свердловин, картографічні дані тощо (Елизаров, 1955; Короткевич, 1957; Иванченко, Сабов, 1967; Фролов, 1971; Китык, 1983; Селянчин, 1986; Шакин, 2010; Йосипенко, 2014). Проведено роботи зі збору, аналізу обробки фондової геологічної інформації для удосконалення базової інтеграційної геологічної моделі та гідродинамічної моделі системи підземного водообміну, виконано обробку та аналіз вихідних архівних даних геологічних розрізів четвертинних відкладів 395 свердловин, пробурених у межах Солотвинського родовища кам'яної солі за період з 1922 по 1982 р. (Шупиков, 1970; Фролов, 1973; Селянчин, 1995; Піталенко, 2008; Тиркель, 2009 та ін.).

- **Розроблено комплексну геологічну модель Солотвина**, зокрема детальну літологічну модель перекриваючих відкладів солянокупольної структури. Модель включає побудовані шляхом ГІС-технологій за значеннями окремих точок (свердловин) узгоджені математичні моделі границь і товщини осадової формації, яка перекриває соляне тіло (Шехунова та ін., 2021). Урахування в інтеграційній геологічній моделі тектонічних елементів, потужності перекривних відкладів, їх літологічного складу необхідне для уточнення гідродинамічної моделі, прогнозу карсту і правильного розміщення спостережних свердловин моніторингу.

- **Створено базу даних проявів небезпечних екзогенних природних і природно-техногенних геологічних процесів** (карстово-суфозійних (просідання, карстові провалля, обвали), повеней і паводків, підтоплень, схлизових процесів (ерозія, зсуви) для території Солотвина на підставі комплексування натурних візуальних моніторингових спостережень і результатів оцінки деформацій земної поверхні з використанням методів дистанційного зондування Землі (аналіз даних моніторингу DInSAR) (Шехунова та ін., 2019; Pakshin et al, 2021; Shekhunova et al., 2019, 2020, 2021a, 2021b). На основі польових робіт із завірки даних супутникового моніторингу, оцінки проявів небезпечних геологічних процесів та вивчення розломних зон було встановлено таке:

- Сельбищна зона Солотвина безпосередньо примикає або розміщується у геодинамічно активній частині солянокупольної діапирової структури, ядро якої має виходи на денну поверхню.
- У центральній частині Солотвинської солянокупольної структури внаслідок тривалого активного видобутку корисних копалин із застосуванням буровибухових технологій (на останньому етапі розробки родовища) земна поверхня та надра суттєво порушені шахтами та іншими виробками, карстовими та карстово-суфозійними ліями.
- На території налічується понад 140 локальних полігонів розвитку карсту загальною площею понад 12,3 га та об'ємом карстових лійок і провалів понад 5 млн м³.
- У складних економічних умовах (військова агресія росії, особливо її гостра фаза з 2022 р., і певною мірою поширення епідемії COVID-19) населення с-ща Солотвин знаходить можливості та ресурси для реалізації проєктів з розвитку туристичної інфраструктури. Проте спостерігається залучення у використання, зокрема під забудову, територій, на яких зафіксовано вертикальні зміщення. Для бальнеологічних цілей з провалів шахти № 7 відкачуються розсоли.
- На території затоплених і непрацюючих (ліквідованих) шахт спостерігаються розширення площі просідання та поступове вирівнювання схилів навколо карстових кратерів і провалів (Шехунова та ін., 2019; Shekhunova et al., 2019, 2020). Водночас наявність карстово-суфозійних воронок (провалів) з вертикальними стінками є індикатором продовження активних карстово-суфозійних процесів (Shekhunova et al., 2021b).

Оцінено вертикальні зміщення об'єктів і земної поверхні із застосуванням інтерферометричної обробки даних супутникового радарного моніторингу космічними апаратами Sentinel-1A та 1B (аналіз даних DInSAR 2016–2021 рр., SBAS метод; Copernicus EMSN-030, EMSN-064; а також із використанням методів обробки супутникових радарних даних PS (постійних розсіювачів) і SBAS (площинний інтерферометричний аналіз) у 2016–2021 рр. у співпраці з Центром прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля, Україна).

За результатами аналізу даних вертикальних деформацій земної поверхні, будівель і споруд

у межах Солотвинського родовища кам'яної солі за останніми даними супутникового радарного моніторингу (30.06.2020–12.10.2021 рр.) визначено п'ять зон інтенсивних осідань із середньою швидкістю вертикальних зміщень від -6 до -126 мм/рік (рис. 2). Встановлено, що зони осідань навколо шахт № 7–9 є значними за площею і кожна з них має виражену мульду просідання, в якій найбільші осідання визначені фактично у її центрі; з віддаленням від центру інтенсивність осідання земної поверхні поступово зменшується; небезпечною є територія шахти № 7, західна та східна частина території шахти № 8 (Pakshin et al., 2021).

Оцінено просідання земної поверхні та прояви небезпечних геологічних процесів на об'єктах

критичної інфраструктури. Найвищі значення деформації поверхні від $-94,93$ до $-139,98$ мм за швидкості вертикального зміщення від $-34,08$ до $-67,54$ мм/рік визначені для об'єктів/ділянок (об'єктів критичної інфраструктури), розташованих у межах першої зони, що характеризується найбільш інтенсивним розвитком карстово-суфозійних процесів, з якими пов'язані утворення провалів, обвалів, зсувів та осідань (Shekhunova et al., 2021a).

Узагальнено та проаналізовано дані стосовно інтенсивності та величини вертикальних деформацій земної поверхні за даними супутникового радіолокаційного моніторингу за період 2016–2021 рр. Виявлено закономірності поширення вертикальних зміщень земної поверхні,

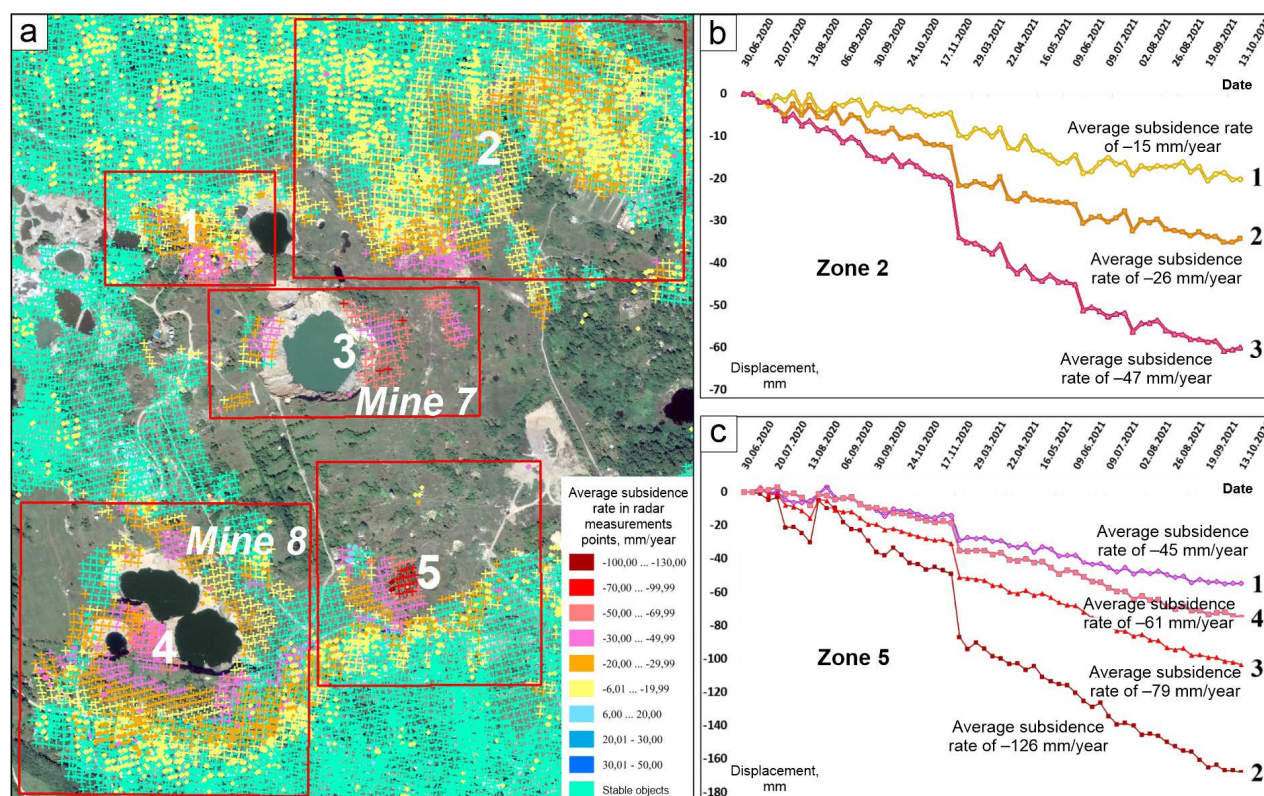


Рис. 2. Оцінка вертикальних зміщень земної поверхні за допомогою інтерферометричної обробки даних супутникового радіолокаційного моніторингу (PS&SBAS) за період з 06.2020 р. по 06.2021 р. (з використанням даних Центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Державного космічного агентства України): а – зони концентрованих деформацій; б – графік вертикальних зміщень зони концентрованих деформацій № 2, максимальна середня швидкість осідання -47 мм/рік; с – графік вертикальних зміщень зони концентрованих деформацій № 5, максимальна середня швидкість осідання -126 мм/рік.

Fig. 2. Assessment of ground surface vertical displacements using interferometric processing of satellite radar monitoring data (PS&SBAS) for the period from 06/2020 to 06/2021 (using data provided by the Center for receiving and processing special information and control of the navigation field, State Space Agency of Ukraine): а – zones of concentrated deformations; б – graph of vertical displacements for the zone of concentrated deformations #2, the maximum average subsidence rate is -47 mm/year; с – graph of vertical displacements for the zone of concentrated deformations #5, the maximum average subsidence rate is -126 mm/year.

які зафіксовано не лише у контурі гірничих робіт, а й за їх межами. За результатами ретроспективної обробки у зоні досліджень визначено зони концентрованих деформацій, а також динаміку осідань у місцях радарних вимірювань (рис. 3). На підставі оцінювання даних вертикальних зміщень об'єктів і ділянок земної поверхні, отриманих за допомогою інтерферометричної обробки даних супутникового радіолокаційного моніторингу, обраховано значення нагромаджених деформацій земної поверхні за період 2016–2021 рр., які сягають –385,12 мм; встановлено, що шахти № 7, 8 та 9 становлять загрозу техногенній безпеці Солотвина.

● **Доповнено геологічну модель проявами небезпечних екзогенних природних і природно-техногенних геологічних процесів, а також на карту нанесено результати оцінки ризиків небезпек.** Детальний ситуативний план території Солотвинського солерудника та його околиць з об'єктами критичної інфраструктури та іншими об'єктами (зокрема дошкільними та шкільними навчальними закладами), розташованими в межах або поблизу зони техногенного впливу гірничовидобувних робіт та прояву небезпечних

екзогенних геологічних процесів наведено на рис. 4.

Прояви деформацій на поверхні це проксимальні процеси, що відбуваються на глибших горизонтах. Особливість карстово-суфозійних процесів у соляних масивах — різка втрата несучої здатності і катастрофічний характер утворення провалів та карстово-суфозійних лійок. Для встановлення закономірностей розвитку карсту треба мати інформації про потоки підземних прісних вод.

● **Уперше розроблено гідродинамічну модель для території Солотвинської солянокупольної структури та прилеглих територій** на підставі концептуальної геологічної моделі з урахуванням тектонічних порушень та даних попереднього моніторингу підземних вод. Гідродинамічна модель включає інформацію про п'ять шарів (геологічних одиниць — пластів) з картами векторів швидкостей, ізоліній рівня підземних вод, ліній потоку для двох водоносних горизонтів (четвертинного і тортонського) з урахуванням та без урахування тектонічних порушень різного рангу (Шехунова та ін., 2023). За результатами розв'язання низки обернених задач, зокрема з використанням даних пре-моніторингу (забезпечено

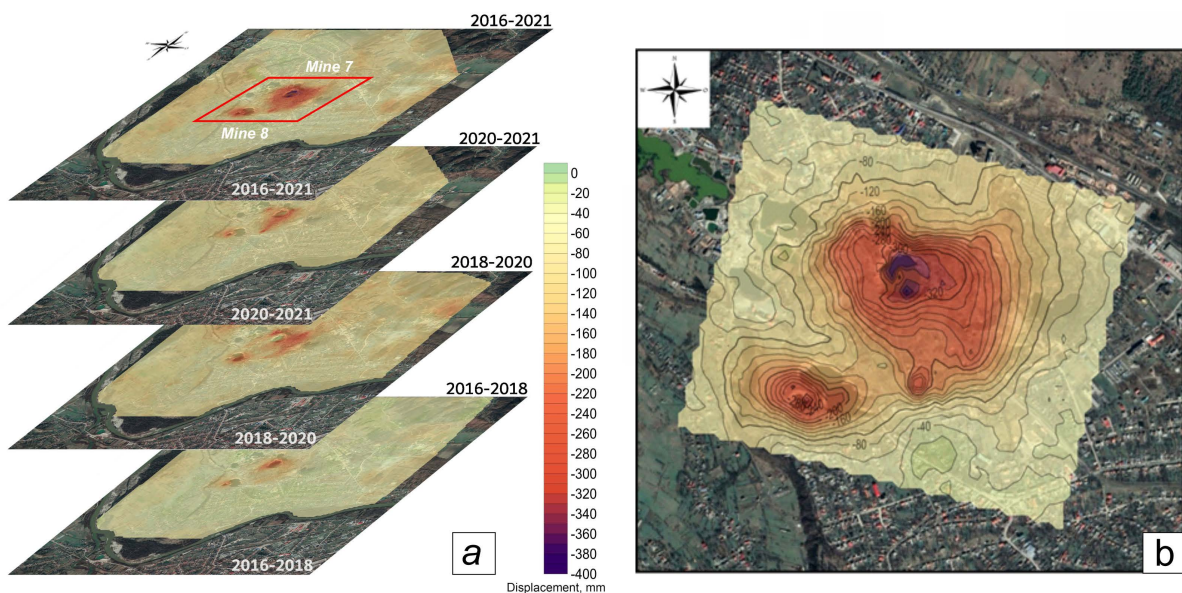


Рис. 3. Результати ретроспективної обробки даних вертикальних деформацій земної поверхні за період 2016–2021 рр.: а — динаміка зміни максимальних вертикальних зміщень земної поверхні; б — зона максимальних значень вертикальних зміщень земної поверхні, збільшений фрагмент рис. а.

Fig. 3. Results of retrospective processing of vertical deformation of the ground surface for the period 2016–2021: a — dynamics of changes in the maximum vertical ground surface displacements; b — zone of maximum values of vertical ground surface displacements, enlarged fragment of Fig. a.

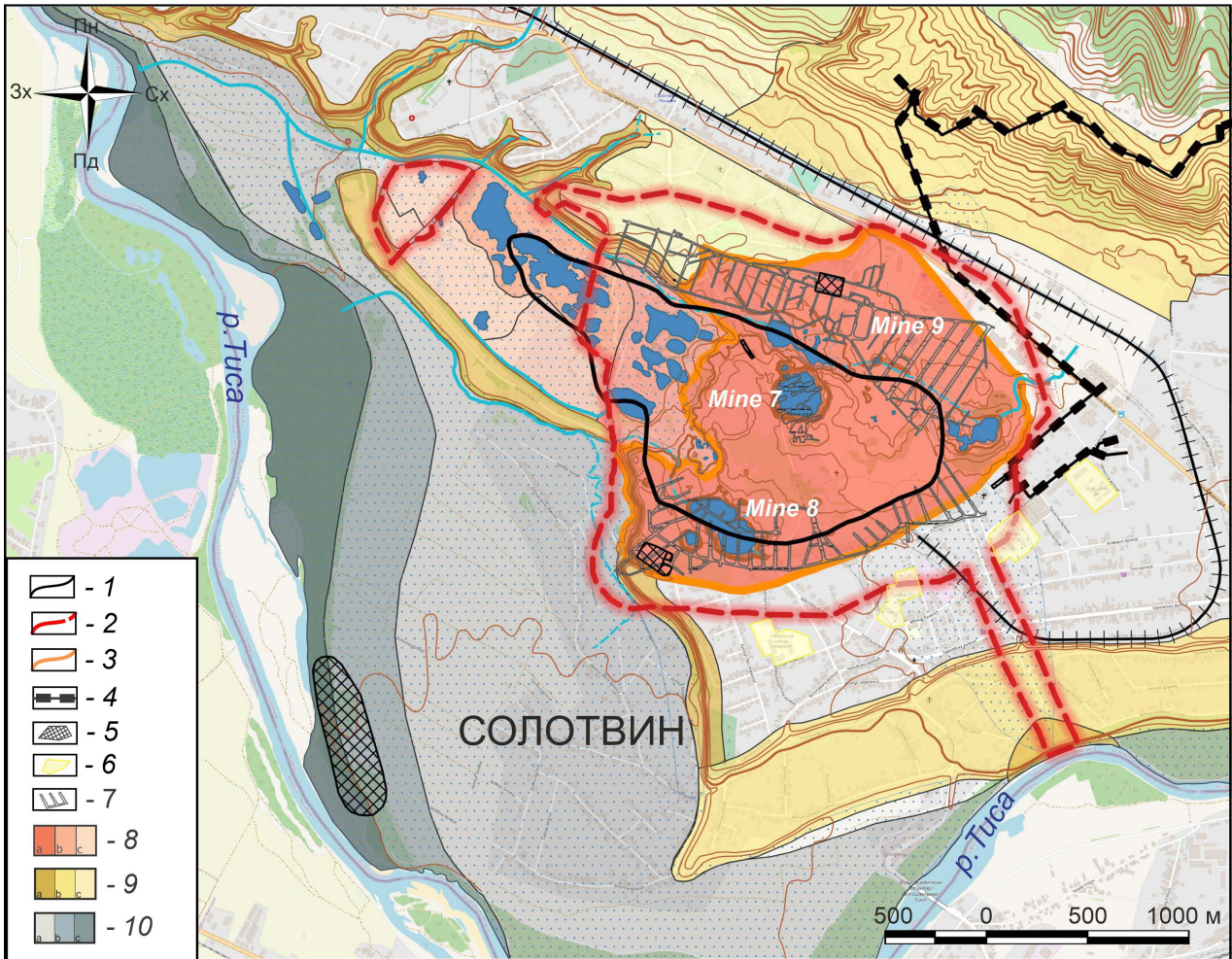


Рис. 4. Ситуативний план Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій із зоною техногенного впливу гірничих робіт з видобутку кам'яної солі та прояву небезпечних екзогенних геологічних процесів: 1 – контур солянокупольної структури по поверхні алювіальних відкладів; 2 – зона техногенного впливу шахт з видобутку кам'яної солі та прояву небезпечних екзогенних геологічних процесів; 3 – зона активного техногенного впливу гірничовидобувних робіт та прояву небезпечних екзогенних геологічних процесів; 4 – газопровід; 5 – об'єкти критичної інфраструктури (електропідстанція, водозабірна насосна станція, очисні споруди каналізації; звалище побутових відходів); 6 – дошкільний та шкільні заклади освіти; 7 – контури гірничих виробок.

Ризики небезпечних природних та природно-техногенних процесів: 8 – карстових: катастрофічний (а), значний (б), помірний (в), незначний (г), 9 – схилів: значний (а), помірний (б), незначний (в), 10 – затоплення паводками та повеннями: значний (а); помірний (б), незначний (в).

Fig. 4. Situational plan of the Sotvyno salt mine area and its surroundings with zone of technogenic impact of salt mining operations and manifestations of hazardous exogenous geological processes: 1 – contour of the salt dome structure on the surface of alluvial sediments; 2 – the zone of technogenic impact of salt mines and development of the hazardous exogenous geological processes; 3 – the zone of active technogenic impact of salt mines and development of the hazardous exogenous geological processes; 4 – gas pipeline; 5 – critical infrastructure objects (power substation, water supply pumping station, sewage treatment facilities, landfill); 6 – preschool and school educational institutions; 7 – contours of mines.

Risk of natural and natural-technogenic hazards: 8 – karst processes: catastrophic (a), high (b), medium (c), low (d), 9 – slope erosion: high (a), medium (b), low (c), 10 – seasonal and flash floods: high (a), medium (b), low (c).

партнером проєкту — Університет Мішкольця, Угорщина), встановлено, що відтворена на моделі гідродинамічна ситуація з достатньою ймовірністю відображає природні умови. Отже модель може бути застосована при розв'язанні практичних задач.

Розроблена гідродинамічна модель використана для обґрунтування оптимальної мережі (визначення кількості та просторового розміщення) моніторингових гідрологічних постів і гідрогеологічних свердловин відповідно до розробленого плану системи моніторингу та режиму спостережень.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для забезпечення сталого розвитку с-ща Солотвина і попередження транскордонного забруднення пропонується створення системи комплексного моніторингу.

На підставі отриманих результатів досліджень (польових спостережень, аналізу даних супутникового радіолокаційного моніторингу, геологічного та гідродинамічного моделювання), а також з урахуванням державних і міжнародних норм моніторингу навколишнього середовища розроблено план комплексної системи моніторингу, яка вписується в більш широку регіональну структуру для відстеження якісних і кількісних змін поверхневих і підземних вод та деформацій земної поверхні в районі Солотвина (рис. 5, табл. 1).

Комплексна схема об'єктового моніторингу території Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій включає:

I. Гідрологічний та гідрогеологічний моніторинг

Параметри: кількісні — рівні та витрата потоку для точок гідрологічних спостережень (річки, джерела); якісні — температура, рН, електропровідність, TDS (мінералізація), лужність, кислотність, твердість, макрокомпоненти — натрій, хлор, сульфати; мікрокомпоненти — бром, йод та ін.

Запропонована мережа гідрологічного та гідрогеологічного моніторингу містить дев'ять гідрологічних пунктів спостережень (чотири — р. Тиса; три — озера, два — затоплені провалля над шахтами № 7, 8; 24 гідрогеологічні пункти спостережень/свердловини (з них п'ять комбінованих пунктів, які складаються з двох свердловин: на четвертинний безнапірний та тортонський тріщинуватий водоносні горизонти). Для пунктів гідрогеологічних спостережень четвертинного безнапірного і тортонського трі-

щинуватого водоносних горизонтів розроблено проєкти спостережних свердловин на умовних ділянках з комбінованими літологічними розрізами (рис. 6). Характеристика умовної ділянки з комбінованим літологічним розрізом (пункти гідрогеологічних спостережень для четвертинного безнапірного водоносного горизонту) наведена в табл. 2.

II. Польові обстеження

Вивчення та оцінка поточного стану навколишнього середовища території; збір та аналіз даних щодо розвитку карсту (карстові лійки: геометричні розміри та частота виникнення, просідання ґрунту тощо) в межах ділянок об'єктів критичної інфраструктури та великих житлових комплексів (постійного проживання); на ділянках, що примикають до провалів (над шахтами) та гірничих споруд (водовідливних шахт, дренажно-штольневих систем та ін.; покинутого військового об'єкта зберігання паливно-мастильних матеріалів).

III. Дистанційні аерокосмічні методи знімання

Землі (супутниковий радіолокаційний моніторинг деформацій земної поверхні за допомогою DInSAR з кутовими відбивачами)

Оцінка зміщень і деформацій земної поверхні з використанням інтерферометричної обробки даних супутникового радіолокаційного моніторингу методами PS та SBAS.

IV. Геодезичне знімання

Верифікація даних дистанційних досліджень деформацій земної поверхні (інтерферометрична обробка даних супутникового радіолокаційного моніторингу).

Геопросторовий розвиток деформацій земної поверхні за межами зони гірничовидобувних робіт потребує організації систематичного геодезичного моніторингу ділянок об'єктів критичної інфраструктури; територій великих житлових комплексів (постійного проживання); на ділянках, що примикають до провалів (над шахтами) та гірничих споруд (водовідливних шахт, дренажно-штольневих систем та ін.); а також покинутого військового об'єкта зберігання паливно-мастильних матеріалів.

V. Геофізичні дослідження

Геофізичне знімання, що включає мікрогравітаційні, геоелектричні та сейсмічні дослідження в межах зони ризику (зони техногенного впливу соляних шахт та появу небезпечних екзогенних геологічних процесів). Оцінка стану (стабільності) геологічного середовища, а також

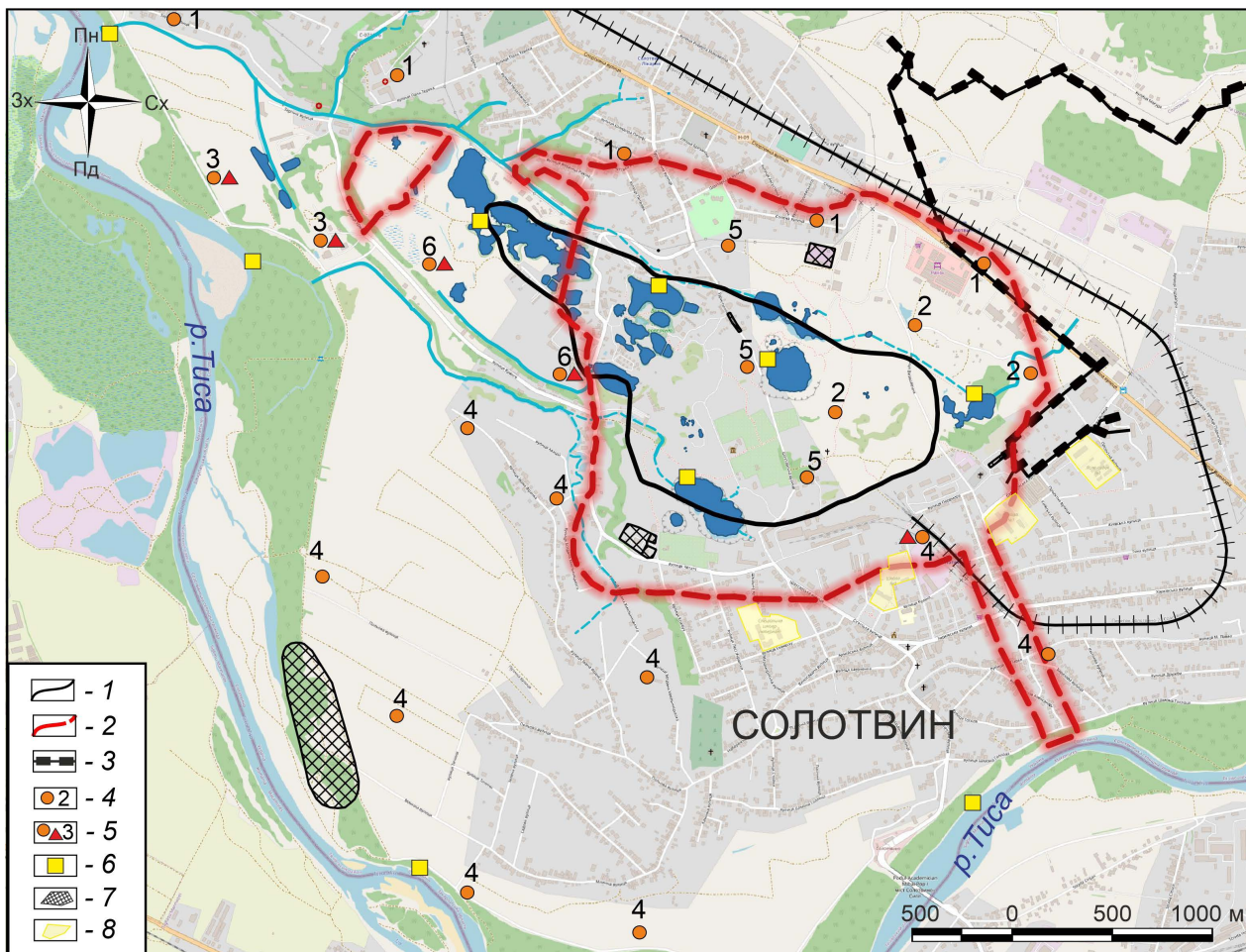


Рис. 5. Схема системи комплексного моніторингу Солотвинського родовища кам'яної солі та прилеглих територій: 1 – контур солянокупольної структури на поверхні алювіальних відкладів; 2 – зона техногенного впливу шахт з видобутку кам'яної солі та прояву небезпечних екзогенних геологічних процесів; 3 – газопровід; 4 – проєктний моніторинговий гідрогеологічний пункт спостереження (свердловина) та номер типу зведеного геологічного розрізу за літологічними даними; 5 – проєктний моніторинговий гідрогеологічний пункт спостереження (шахтний колодязь, який складається з двох свердловин – на четвертинний ґрунтовий та тортонський тріщинний водоносні горизонти) і номер типу зведеного геологічного розрізу за літологічними даними; 6 – проєктний моніторинговий гідрологічний пункт спостереження; 7 – об'єкти критичної інфраструктури; 8 – дошкільний та шкільні заклади освіти.

Fig. 5. Complex Monitoring System Plan of the Sotk salt mine area and its surroundings: 1 – contour of the salt dome structure on the surface of alluvial sediments; 2 – the zone of technogenic impact of salt mines and development of the hazardous exogenous geological processes; 3 – gas pipeline; 4 – project monitoring hydrogeological observation point (well) and the number of the consolidated geological section type according to lithological data; 5 – project monitoring hydrogeological observation point (mine well, which consists of two wells: for the Quaternary unconfined and Tortonian fractured aquifers) and type number of the consolidated geological section according to lithological data; 6 – project monitoring hydrological observation point; 7 – critical infrastructure objects; 8 – preschool and school educational institutions.

геофізичних аномалій. Отримання нових даних стосовно зміни структури поверхні соляного штоку та перекривних порід (мікрогравіка).

VI. Моделювання

Удосконалення гідродинамічної моделі, актуалізація за даними гідрологічного та гідрогеологічного моніторингу.

Таблиця 1. План комплексної системи моніторингу

Table 1. Complex Monitoring System Plan

№	Методи геомоніторингу	Мета (отримані дані)	Деталі	Частота
I	Гідрологічний та гідрогеологічний моніторинг	Кількісні параметри (рівні та витрата потоку для точок гідрологічних спостережень (річки, джерела) Якісні параметри (температура, рН, електропровідність, TDS (мінералізація), лужність, кислотність, твердість, макрокомпоненти – натрій, хлор, сульфати; мікрокомпоненти – бром, йод та ін.)	Містить: 9 гідрологічних пунктів спостережень (4 – р. Тиса; 3 – озера, 2 – затоплені провалля над шахтами № 7, 8); 24 гідрогеологічні пункти спостережень/свердловини (з них 5 комбінованих пунктів, які складаються з двох свердловин: на четвертинний безнапірний та тортонський тріщинуватий водоносні горизонти)	Щомісяця (кількісні параметри) Щомісяця (якісні параметри – автоматично вимірювані) Щоквартально (відбір проб для лабораторних аналізів)
II	Польові обстеження (візуальні моніторингові спостереження) розвитку небезпечних геологічних процесів	Вивчення та оцінка поточного стану навколишнього середовища території; збір та аналіз даних щодо розвитку карсту (карстові лійки: геометричні розміри та частота виникнення, просідання ґрунту тощо)	Візуальні моніторингові спостереження розвитку небезпечних геологічних процесів у межах ділянок об'єктів критичної інфраструктури та великих житлових комплексів (постійного проживання); на ділянках, що примикають до провалів (над шахтами) та гірничих споруд (водовідливних шахт, дренажно-штовальних систем та ін.; а також покинутого військового об'єкту зберігання паливно-мастильних матеріалів).	Двічі на рік
III	Дистанційні аерокосмічні методи знімання Землі (супутниковий радіолокаційний моніторинг деформацій земної поверхні за допомогою DInSAR з кутовими відбивачами)	Оцінка зміщень та деформацій земної поверхні з використанням інтерферометричної обробки даних супутникового радіолокаційного моніторингу	Із застосуванням з кутових відбивачів на досліджуваній території DInSAR (PS і SBAS методи)	Двічі на рік (квітень і листопад)

Закінчення таблиці 1

№	Методи геомоніторингу	Мета (отримані дані)	Деталі	Частота
IV	Геодезичне знімання	Верифікація даних дистанційних досліджень деформацій земної поверхні (інтерферометрична обробка даних супутникового радіолокаційного моніторингу)	За межами зони гірничовидобувних робіт потребує організації систематичного геодезичного моніторингу ділянок об'єктів критичної інфраструктури; територій великих житлових комплексів (постійного проживання); на ділянках, що примикають до провалів (над шахтами) та гірничих споруд (водовідливних шахт, дренажно-штовельних систем та ін.), а також покинутого військового об'єкта зберігання паливно-мастильних матеріалів.	Щорічно (в період низького рівня ґрунтових вод)
V	Геофізичні дослідження в межах зони ризику (зони техногенного впливу соляних шахт та прояву небезпечних екзогенних геологічних процесів)	Оцінка стану (стабільності) геологічного середовища; геофізичних аномалій. Отримання нових даних щодо зміни структури поверхні соляного штоку та перекривних порід (мікрогравітаційні методи)	Включає мікрогравітаційні, геоелектричні та сейсмічні дослідження	Щорічно (в період низького рівня ґрунтових вод)
VI	Моделювання	Удосконалення гідродинамічної моделі	Актуалізація за даними гідрологічного та гідрогеологічного моніторингу	Актуалізація відповідно до надходження даних гідрологічного та гідро-геологічного моніторингу
VII	Оцінка ризиків	Аналіз розвитку небезпечних геологічних процесів	Актуалізація контурів зони підвищеного ризику техногенного впливу соляних шахт і розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів	Щорічно

Таблиця 2. Характеристика умовної ділянки з комбінованим літологічним розрізом (точки спостереження)**Table 2.** Characterization of the conditional area with a combined lithological section (observation point)

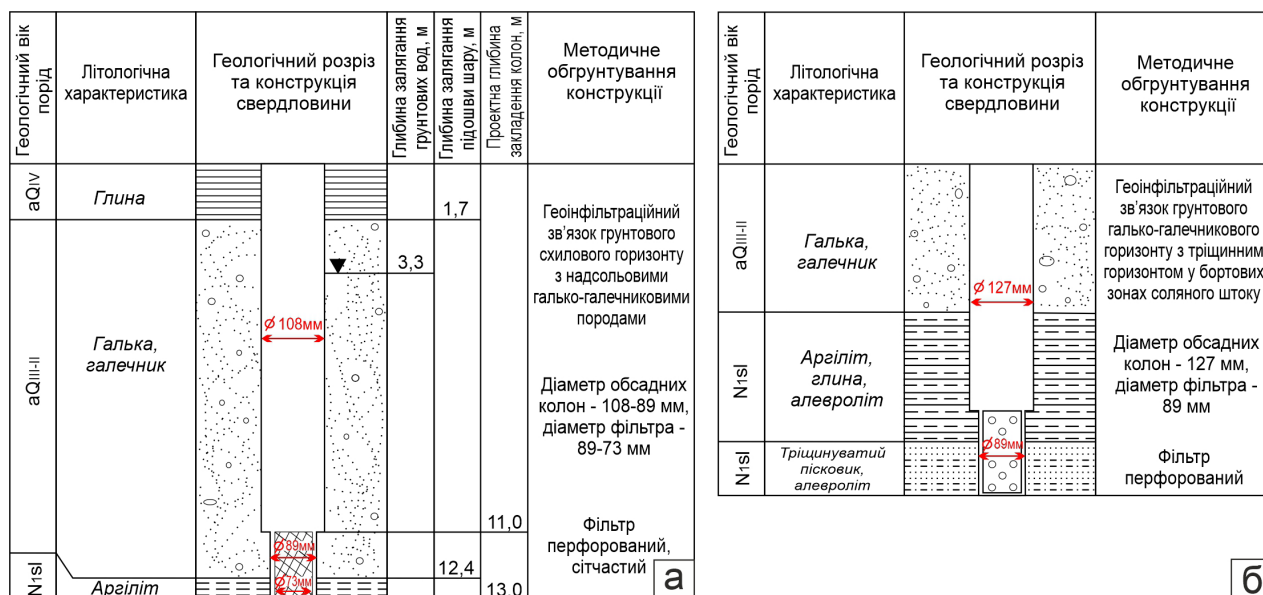
№ умовної ділянки зі зведеним літологічним розрізом (пункт спостереження)	№ свердловин, що входять до умовної ділянки	Покрівля, м	Підошва, м	Рівень води, м	Літологічна характеристика
1	MON-16, g-40/1957, g-17/1957	0,0 1,7 12,4	1,7 12,4 20,5	3,3	Глина Галька, галечник Аргіліт
2	MON-12, 14/1957, 15/1957	0,0 26,2 106,8 127,9	26,2 106,8 127,9 433,0	12,0	Галечник Перешарування алевроліту та аргіліту Аргіліт Кам'яна сіль
3	MON-8, MON-9, g-42/1957, g-48/1957	0,0 4,4	4,4 9,2	3,2	Галечник Аргіліт
4	MON-4, MON-5	0,0 8,1	7,2 12,0	5,4	Галечник Глина, аргіліт
5	MON-13, 25/1957, g-61/1957	0,0 13,7 46,1 70,7	13,7 46,1 70,2 184,5	10,2	Галечник Аргіліт, глина Перешарування пісковика та алевроліту Кам'яна сіль
6	MON-10, 60/1970	0,0 4,0 8,0 216,7	4,0 8,0 216,7 543,0	3,4	Галечник Глина Перешарування аргіліту та пісковика Кам'яна сіль (св. 60/1970)

VII. Оцінка ризиків

Аналіз розвитку небезпечних геологічних процесів; актуалізація контурів зони підвищеного ризику техногенного впливу соляних шахт та розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів (оновлювана / щорічна).

На підставі викладених вище результатів досліджень розроблено рекомендації, спрямовані на мінімізацію ризиків для населення та впливу на довкілля наслідків солевидобутку і забезпечення сталого економічного та соціального розвитку селища.

- З огляду на складну геоекологічну ситуацію створення та функціонування постійно діючої системи комплексного моніторингу Солотвина є першочерговим завданням.
- Еколого-техногенні і соціально-економічні параметри ревіталізації території Солотвина треба оцінити після випереджувального створення інформаційно-ефективної системи моніторингу з можливістю високо ймовірної просторово-часової оцінки довгострокового (десятьки років) переходу до рівноважного геодинамічного стану надр на цій території.



б

Рис. 6. Зведена конструкція свердловини моніторингового гідрогеологічного пункту спостереження: а — для четвертинного безнапірного водоносного горизонту (умовна ділянка № 1); б — конструкція свердловини пункту спостереження для тріщинного (тортонського) водоносного горизонту.

Fig. 6. Consolidated well design of monitoring hydrogeological observation point: a — for the Quaternary unconfined aquifer (conditional area No. 1); b — well design of observation point on the fractured (Tortonian) aquifer.

- Створити умови/систему для використання природних ресурсів, для оздоровчого туризму (лікувального, реабілітаційного, рекреаційного) в рамках, що не створюють додаткових ризиків для людського життя та не мають негативних наслідків для навколишнього середовища (насамперед поширення забруднення).
- Розглянути можливість легалізації використання розсолів у бальнеологічних цілях.
- Удосконалити порядок, облік і технологію використання ропи з карстових лійок як виду надрокористування з розв'язанням проблеми їх екологічно безпечного водовідводу та утилізації (можливо шляхом зворотного скиду у стовбури шахт або створення системи очищення за містом нижче за течією р. Тиса).
- Впровадження системи моніторингу з інтегрованою постійно діючою гідродинамічною моделлю має стати інструментом управління використанням природних ресурсів Солотвина — рапи та покладів кам'яної солі — як основного фактора сталого економічного та соціального розвитку селища.

ВИСНОВКИ

Функціонування системи моніторингу необхідно для сталого використання природних ресурсів (рапи та кам'яної солі) та забезпечення від транскордонного поширення забруднення поверхневих і підземних вод.

На підставі отриманих результатів досліджень (польових спостережень, аналізу даних супутникового радіолокаційного моніторингу, геологічного та гідродинамічного моделювання) та з урахуванням державних і міжнародних норм моніторингу навколишнього середовища, розроблено план комплексної системи моніторингу, яка вписується у більш широкую регіональну структуру для відстеження якісних і кількісних змін поверхневих й підземних вод та деформацій земної поверхні в районі Солотвина.

Розроблена концептуальна схема комплексної системи моніторингу включає: — гідрологічний та гідрогеологічний моніторинг (кількість і якість вод першого та другого водоносних горизонтів); — польові обстеження розвитку небезпечних геологічних процесів; — моніторинг деформацій земної поверхні за допомогою DInSAR; — геодезичне знімання; — геофізичне знімання (мікрогравітаційні, геоелектричні та сейсмічні дослідження); — моде-

лювання (актуалізація гідрогеологічної моделі); – оцінку ризиків.

Упровадження системи моніторингу на основі концептуальної схеми з інтегрованою постійно діючою гідродинамічною моделлю має стати інструментом прогнозування розвитку небезпечних екзогенних геологічних і техногенних геологічних процесів та управління використанням природних ресурсів с-ща Солотвина – розсолів і кам'яної солі як основного чинника його сталого економічного і соціального розвитку.

REFERENCES

Water Code of Ukraine. 1995. No. 24, Article 189 (as amended). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>. (In Ukrainian).

Chapter 6 of the Water Code of Ukraine provides for state water accounting and the State Water Cadastre. 1995. No. 24, Article 189 (as amended). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#n336>. (In Ukrainian).

Gurskiy D. S., Yesypchuk K. Yu., Kalinin V. I. et al., 2006. Metallic and non-metallic minerals: in 2 Volumes. Edited by M. P. Shcherbak and S. V. Goshovsky. Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Geological Section of the Ukrainian State Geological Exploration Institute. Kyiv-Lviv: Center of Europe. (In Ukrainian).

Dovgyi S. O., Ivanchenko V. V., Korzhnev M. M. et al., 2014. Mineral resource complex and sustainable development of Ukraine. NAS of Ukraine, Institute of Telecommunications and Global Information Space. Kyiv: Logos. 232 p. (In Ukrainian).

Elizarov A. F., Elizarova N. N., 1955. Report. Solotvyno rock salt deposit (Geological exploration in 1948–1949). SRDE “GeoInform Ukraine”, inv. No. 14676, vol. 1. (In Russian).

Law of Ukraine “On Environmental Protection”. 1991, No. 41, p. 546 (as amended). No. 4017-IX of 10.10.2024. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>. (In Ukrainian).

The Law of Ukraine “On the State Geological Service of Ukraine”. 1999. No. 51, Article 456 (as amended). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1216-14#Text>. (In Ukrainian).

The Law of Ukraine “On Approval of the National Target Program for the Development of Water Management and Environmental Rehabilitation of the Dnipro River Basin for the Period up to 2021”. 2013. No. 17, Article 146. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4836-17#Text>. (In Ukrainian).

The Law of Ukraine “On Environmental Impact Assessment” of 23.05.2017 No. 2059-VIII. https://kodeksy.com.ua/pro_otsinku_vplivu_na_dovkillya.htm?utm_source=this&utm_medium=refs&utm_campaign=recommended. (In Ukrainian).

Principles of Environmental Policy Formation in the Mineral Resources Complex of Ukraine in the Current Conditions, 2022. S. O. Dovhyi, M. M. Korzhnev, O. M. Trofymchuk, M. M. Kurylo, E. O. Yakovlev, M. L. Mirontsov, E. S. Anpilova, I. V. Virshylo, S. K. Kosharna, O. M. Sukhina, Y. O. Malkova;

Дослідження виконано в рамках науково-дослідного проекту «Стратегічна мінеральна сировина для відновлення економіки України: аналіз ресурсів та запасів, розробка критеріїв пошуку для нарощування їх мінерально-сировинної бази» (2023–2024 рр., № державної реєстрації 0123U100855) державної бюджетної програми КПКВК 6541230.

Водний кодекс України. 1995, № 24, ст. 189. (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>.

Глава 6 Водного кодексу України передбачає ведення державного обліку вод та Державного водного кадастру. 1995, № 24, ст. 189 (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#n336>.

Гурський Д. С., Єсипчук К. Ю., Калінін В. І. та ін. Металічні і неметалічні корисні копалини: в 2 т. За ред. М. П. Щербака та С. В. Гошовського. Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України і Геологічна секція Українського державного геологорозвідувального ін-ту. Київ; Львів: Центр Європи, 2006.

Довгий С. О., Іванченко В. В., Коржнев М. М. та ін. Мінерально-сировинний комплекс та сталий розвиток України. НАН України, Інститут телекомунікацій і глобал. інформ. простору. Київ: Логос, 2014. 232 с.

Елизаров А. Ф. Солотвинское месторождение каменной соли (Результаты детальной разведки 1948–1949 гг.). Киев, 1955. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 14676. Кн. 1. 71 с.

Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». 1991. № 41, ст. 546 (зі змінами). № 4017-IX від 10.10.2024. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>.

Закон України «Про державну геологічну службу України». 1999. № 51, ст. 456 (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1216-14#Text>.

Закон України «Про затвердження Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року». 2013. № 17, ст. 146. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4836-17#Text>.

Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII. https://kodeksy.com.ua/pro_otsinku_vplivu_na_dovkillya.htm?utm_source=this&utm_medium=refs&utm_campaign=recommended.

Засади формування екологічної політики у мінерально-сировинному комплексі України в сучасних умовах. С. О. Довгий, М. М. Коржнев, О. М. Трофимчук, М. М. Курило, Є. О. Яковлев, М. Л. Миронцов, Є. С. Анпілова, І. В. Віршило, С. К. Кошарна, О. М. Сухіна, Я. О. Малькова; наук. ред.

- scientific editor M. M. Korzhnev; NAS of Ukraine; Institute of Telecommunications and Global Information Space. Kyiv: NikaCenter. 200 p. (In Ukrainian).
- Ivanchenko A. I., Sabov Yu. V., 1967. Report. Geological exploration of the Sotolvyno rock salt deposit in 1966–1967 (follow-up exploration operational field mine No 8), Heoinform Ukrainy, inv. No 28255, Vol. 1. 212 p. (In Russian).
- Yosypenko T. M., 2014. Report. Integrated geophysical measurements of the karst in the territory of Carpathian and Transcarpathian. SRDE «Geoinform Ukraine», inv. № 64133, vol. 1. (In Ukrainian).
- Kityk W. I., Bokun A. N., Panov G. M., Slivko E. P., Schaydietskaya W. C. 1983. Halogenic formations of Ukraine: Transcarpathian through. (In Russian).
- Kopach P. I., Gorobets N. V., Danko T. T., Bondarenko L. V., 2009. Basic provisions of the methodology for creating a system of environmental monitoring of mining regions. Ecology and Nature Management. Issue 12. Pp. 181–187. (In Ukrainian).
- Korostashovets Y. P., 1957. Report. Hydrogeological conditions of the Sotolvyno rock salt deposit. SRDE «Geoinform Ukraine», inv. No. 18253/2, vol. 1. (In Russian).
- Pitalenko E. I., 2008. Report. Hydrogeological and geotechnical research performance in order to establish site of water entry into the Sotolvyno salt mine and geomechanical processes implementation studies in the development of Sotolvyno salt deposit and the impact of salt mines on the environment. UkrNDMI Archive, inv. No. 2302. (In Ukrainian).
- Regulation on the State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1174 of 30.12.2015. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1174-2015-%D0%BF#Text>. (In Ukrainian).
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of September 19, 2018, No. 758 “On Approval of the Procedure for State Water Monitoring”. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Text>. (In Ukrainian).
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 30.03.1998 No. 391 “On Approval of the Regulation on the State Environmental Monitoring System” (as amended). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF/conv>. (In Ukrainian).
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 13.06.2024 No. 684 ‘Some issues of functioning of the state environmental monitoring system and its subsystems’. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-%D0%BF#n13>. (In Ukrainian).
- Privalov V. A., Panova E. A., 2008. Geodynamic and hydrogeological regime features of the Sotolvyno rock salt deposit (Transcarpathian internal trough). Scientific works of DonNTU, Series mining geology. 7 (135). Pp. 155–162. (In Russian).
- Prymushko S. M., 2021. Mineral resources of Ukraine. Kyiv, State Research and Production Enterprise «State Information Geological Fund of Ukraine». 270 p. (In Ukrainian).
- Rusyniak R. P., 2015. Report. Results of the prospecting drilling in Sotolvyno area, Heoinform Ukrainy, inv. № 64855. Vol. 1. 294 p. (In Ukrainian).
- М. М. Коржнев; НАН України; Ін-т телекомунікацій і глобального інформаційного простору. Київ: НікаЦентр, 2022. 200 с.
- Иванченко А. И. Сабов Ю. В.. Отчет о геологоразведочных работах на Солотвинском месторождении каменной соли, проведенных в 1966–1967 гг. (доразведка эксплуатационного поля шахты № 8). Киев, 1967. Геоинформ України, інв. № 28255. Кн. 1. 212 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.
- Копач П. И., Горобець Н. В., Данько Т. Т., Бондаренко Л. В. Основні положення методології створення системи моніторингу навколишнього середовища гірничодобувних регіонів. *Екологія і природокористування*. 2009. Вип. 12. С. 181–187.
- Коросташовец И. П. Гидрогеологические условия Солотвинского месторождения каменной соли в Закарпатской области УССР. Киев, 1957. ДНВП «Геоинформ України», інв. № 18253/2. Кн. 1. 251 с.
- Піталенко 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 УкрНДМІ, інв. № 2302. 59 с.
- Положення про Державну службу геології та надр України, затверджене Постановою Кабінету Міністрів України № 1174 від 30.12.2015. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1174-2015-%D0%BF#Text>.
- Постанова Кабінету Міністрів України від 19 вересня 2018 р. № 758 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Text>.
- Постанова Кабінету Міністрів України від 30.03.1998 № 391 «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу доквілля» (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF/conv>.
- Постанова Кабінету Міністрів України від 13.06.2024 № 684 «Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-%D0%BF#n13>
- 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.
- Примушко С. М. Мінеральні ресурси України. Київ: ДНВП «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2021. 270 с.
- Русиняк Р. П. Звіт за результатами пошукового буріння на Солотвинській площі. Харків, 2015. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 64855. Кн. 1. 294 с.

- Selyanchin M. I., 1995. Report. Additional exploration deep horizons of mine № 8 Sotolvyno rock salt deposit in 1992–1995, SRDE «Geoinform Ukraine», inv. No 55852. Vol. 1. 328 p. (In Ukrainian).
- Selyanchin M. I., 1986. Report. Exploration of the North site Sotolvyno rock salt deposit in 1977–1986, Heoinform Ukrainy, inv. № 49345. Vol. 1. 210 p. (In Russian).
- Article 22 of the Law of Ukraine “On Environmental Protection”. 1991, No. 41, Article 546 (as amended). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#n351>. (In Ukrainian).
- Tirkel M. G., Artemenko P. G., Pitalenko 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).
- Frolov M. V., 1973. Report. Preliminary exploration of natural brines Sotolvyno rock salt deposit in the 1971–1973, SRDE «Geoinform Ukraine», inv. № 35329. Vol. 1. 83 p. (In Russian).
- Frolov M. V. Report on exploration of the Sotolvyn water intake site for 1969–1971. Groundwater reserves estimation as of 1 April 1971. Beregovo, 1971. Western Geological Expedition. Kiev, 1971. SRDE «Geoinform Ukraine», Inv. No. 33225. Vol. 1. (In Russian).
- Shakin A. V., 2010. Report. Geological-economic appraisal Sotolvyno gas field, Heoinform Ukrainy, inv. № 64855, Vol. 1. 286 p. (In Ukrainian).
- Shestopalov V. M., Lyuta N. G., 2016. Status and ways of reforming of the state groundwater monitoring system taking into account international experience and requirements of the EU Water Framework Directive. Mineralni resursy Ukrainy. 2. Pp. 3–7. (In Ukrainian).
- Shekhunova S., 2020. Saliferous Formations: Patterns of Lithogenesis and Problems of Usage. Kyiv: Naukova Dumka. 336 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14887334> (In Ukrainian).
- Shekhunova, S. B., Aleksieienkova, M. V., Stadnichenko, S. M., 2019. Regularities of natural and antropogenic hazardous processes development for Sotolvyno (Transcarpathia, Ukraine). Collection of Scientific Works of the Institute of geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 12. Pp. 70–83. <http://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745>. (In Ukrainian).
- Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Stadnichenko S. M., Syumar N. P., 2015. The integrated geological model of Sotolvyno structure as a tool to assess geoecological sustainability of Sotolvyno rock-salt deposit. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 8. Pp. 233–250. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791>. (In Ukrainian).
- Shekhunova S. B., Negoda Y. O., Stadnichenko S. M., Shestopalov V. M., Rudenko Y. F., Siumar N. P., 2023. Hydrodynamic Model of Sotolvyn Rock Salt Deposit. Geologičnij žurnal. No 4 (385): 79–96. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.293147>. (In Ukrainian).
- Селянчин М. І., Іванченко А. І., 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. 326 с.
- Стаття 22 Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища». 1991. № 41, ст. 546 (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#n351>.
- Тиркель М. Г., Артеменко П. Г., Питаленко Е. І., Педченко С. В. Геомеханические исследования как метод изучения техногенного гидродинамического режима на территории Солотвинского солерудника. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2009. № 5, ч. 1. С. 124–130.
- Фролов М. В. Отчет о предварительной разведке естественных рассолов Солотвинского месторождения каменной соли за 1971–1973 гг. (Тячевский р-н, Закарпатской обл.). Киев, 1973. ДНВП «Геоінформ України», інв. № 35329. Кн. 1. 140 с.
- 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., Люта Н. Г. Стан і шляхи реформування державної системи моніторингу підземних вод з урахуванням міжнародного досвіду та вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу. *Мінеральні ресурси*. 2016. 2. с. 3–7.
- Шехунова С. Б. Соленосні формації: закономірності літогенезу та проблеми використання. Київ: Наукова думка, 2020. 336 с. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14887334>.
- Шехунова С. Б., Алексєєнкова М. В., Стадніченко С. М. Закономірності розвитку природних та природно-техногенних небезпечних процесів на території містечка Солотвино (Закарпаття, Україна). *Збірник наукових праць Інституту геологічних 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 геоєкологічного стану Солотвинського родовища кам'яної солі. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2015. Т. 8. С. 233–250. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146791>.
- Шехунова С. Б., Негода Ю. О., Стадніченко С. М., Шестопалов 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>.

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, Vol. 14 (2), Pp. 51–61. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245822>. (In Ukrainian).

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. Vol. 1, 120 p. (In Russian).

Alkhatib H., Paffenholz J.-A., 2019. Tagungsband GeoMonitoring 2019. Monitoring von (Infrastruktur) bauwerken. https://www.researchgate.net/publication/331951755_Tagungsband_GeoMonitoring_2019. (In German).

Analysis of the actual policies and directives related to the environmental problem targeted and identification of future priorities, 2018. Project DEMINE “Decreasing the Impact of Abandoned Mines”. Deliverable A.1: Delivery Date: 31/03/2018. https://mon.uvic.cat/life-demine/files/2018/07/D_A.1_Summary_Policy-and-Legislation-Assessment.pdf.

Andrusikiewicz W., 2017. Effect of salt mining on land surface. *Technical Transactions*, vol.114, no.4, 3917, Pp. 39–59. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.046.6357>.

Bravante, M. A., Holden, W. N., 2009. Going through the motions: the environmental impact assessment of nonferrous metals mining projects in the Philippines. *The Pacific Review*. 22(4). Pp. 523–547. <https://doi.org/10.1080/09512740903128034>.

Buffet A. The collapse of Compagnie des Salins SG4 and SG5 drilling: Proc. Solution Mining Research Institute Fall Meeting, Rome. 1998. p. 79–105.

Commission Directive 2009/90/EC of 31 July 2009 laying down, pursuant to Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, technical specifications for chemical analysis and monitoring of water status (Text with EEA relevance). <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/90/oj>.

Cooper A., 2002. Halite karst geohazards (natural and man-made) in the United Kingdom. *Environmental Geology*. 42(5). Pp. 505–512. doi: <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0512-9>.

Cooper A., 2020. Geological hazards from salt mining, brine extraction and natural salt dissolution in the UK. *Engineering Geology Special Publications*. Geological Society, London. 29. Pp. 369–387. <https://doi.org/10.1144/EGSP29.14>.

Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) (Text with EEA relevance). <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (Water Framework Directive). <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>.

Directive 2004/35/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage (2021/C 118/01). <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/35/oj>

Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater

Шехунова С. Б., Сюмар Н. П., Стадніченко С. М., Алексєєнкова М. В. Літологічна модель надсоляного комплексу Солотвинської солянокупольної структури. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2021. Т. 14, вип. 2. С. 119–128. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245822>.

Шупиков А. Р., Сабов Ю. В., Васильєв І. 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.

Alkhatib H., Paffenholz J.-A. Tagungsband GeoMonitoring 2019. Monitoring von (Infrastruktur) bauwerken. (2019). https://www.researchgate.net/publication/331951755_Tagungsband_GeoMonitoring_2019.

Analysis of the actual policies and directives related to the environmental problem targeted and identification of future priorities. Project DEMINE «Decreasing the Impact of Abandoned Mines». Deliverable A.1: Delivery Date: 31/03/2018. https://mon.uvic.cat/life-demine/files/2018/07/D_A.1_Summary_Policy-and-Legislation-Assessment.pdf.

Andrusikiewicz W. Effect of salt mining on land surface. *Technical Transactions*. 2017. Vol.114, no.4, 3917. P. 39–59. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.046.6357>.

Bravante M. A., Holden W. N. Going through the motions: the environmental impact assessment of nonferrous metals mining projects in the Philippines. *The Pacific Review*. 2009. 22 (4). P. 523–547. <https://doi.org/10.1080/09512740903128034>.

Buffet A. The collapse of Compagnie des Salins SG4 and SG5 drilling: Proc. Solution Mining Research Institute Fall Meeting, Rome. 1998. P. 79–105.

Commission Directive 2009/90/EC of 31 July 2009 laying down, pursuant to Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, technical specifications for chemical analysis and monitoring of water status (Text with EEA relevance). <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/90/oj>.

Cooper A. Halite karst geohazards (natural and man-made) in the United Kingdom. *Environmental Geology*. 2002. 42(5). P. 505–512. doi: <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0512-9>.

Cooper A. Geological hazards from salt mining, brine extraction and natural salt dissolution in the UK. *Engineering Geology Special Publications*. Geological Society, London. 2020. Vol. 29. P. 369–387. <https://doi.org/10.1144/EGSP29.14>

Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) (Text with EEA relevance). <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (Water Framework Directive). <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>.

Directive 2004/35/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage (2021/C 118/01). <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/35/oj>

Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater

against pollution and deterioration. <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/118/oj>.

Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC—Statement by the European Parliament, the Council and the Commission. <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/21/oj>.

Gowan S. W., Trader S. M., 1999. Mine failure associated with a pressurized brine horizon: Retsof Salt Mine, western New York. *Applications & Environmental & Engineer*. v. 6, p. 57–70.

Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., Jourde, H., 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138. Pp. 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>.

ISO 31000:2018. Risk Management – Principles and Guidelines on Implementation. International Organization for Standardization. 26 p. <https://www.iso.org/standard/65694.html>.

Johnson K., 2021. Overview of Evaporite Karst in the Greater Permian Evaporite Basin (GPEB) of Texas, New Mexico, Oklahoma, Kansas, and Colorado, USA. Publisher: Oklahoma Geological Survey, Ed.: K. S. Johnson, L. Land, D. D. Decker. 350 p. Circular 113.

Johnson K. Salt dissolution and subsidence or collapse caused by human activities. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*. Vol. XVI. 2005. Pp. 101–110. [https://doi.org/10.1130/2005.4016\(09\)](https://doi.org/10.1130/2005.4016(09)).

Kawiecka R., Krawczyk A., Lewin´ska P., Pargieła, K., Szombara S., Tama A., Adamek K., Lupa M., 2018. Mining Activity and its Remains – The Possibilities of Obtaining, Analysing and Disseminating of Various Data on the Example of Miedzianka, Lower Silesia, Poland. *Journal of Applied Engineering Sciences*. Vol. 8. Pp. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.2478/jaes-2018-0020>.

Kretschmann J., 2020. Post-Mining – a Holistic Approach. *Mining, Metallurgy & Exploration*. Vol. 37. Pp. 1401–1409. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00265-y>

Kretschmann J., Nguyen N., 2020. Research areas of post-mining areas – Experiences from German hard coal mining. *Mineral Engineering*. 1 (2). Pp. 255–262. <https://doi.org/10.29227/IM-2020-02-31>.

Martinez J. D., 1991. Salt domes: *American Scientist*. Vol. 79. Pp. 420–431.

Padmanaban R., Bhowmik A. K., Cabral P., 2017. A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area. *ISPRS international journal of geo-information*, 6(12), 401 p.

Pakshin, M., Shekhunova, S., Stadnichenko, S., Liaska, I., 2021. The satellite radar monitoring for anthropogenic and natural geological hazards mapping within the Solotvyno mining area (Transcarpathia, Ukraine). *European Geosciences Union «vEGU21»*. EGU21–8417. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8417>.

Paskaleva, I., Nikolova, S., Dimitrova, L. & Georgieva G., 2010. Monitoring networks – Way for improving risk assessment from natural and man-made hazards: Case study salt mine Provadia

against pollution and deterioration. <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/118/oj>.

Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC—Statement by the European Parliament, the Council and the Commission. <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/21/oj>.

Gowan S. W., Trader S. M. Mine failure associated with a pressurized brine horizon: Retsof Salt Mine, western New York. *Applications & Environmental & Engineer*. 1999. Vol. 6. P. 57–70.

Gutiérrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 2014. 138. P. 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>.

ISO 31000:2018. Risk Management – Principles and Guidelines on Implementation. International Organization for Standardization. 26 p. <https://www.iso.org/standard/65694.html>.

Johnson K. Overview of Evaporite Karst in the Greater Permian Evaporite Basin (GPEB) of Texas, New Mexico, Oklahoma, Kansas, and Colorado, USA. Publisher: Oklahoma Geological Survey, Ed.: K. S. Johnson, L. Land, D. D. Decker. 2021. 350 p. Circular 113.

Johnson K. Salt dissolution and subsidence or collapse caused by human activities. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*. Vol. XVI. 2005. P. 101–110. [https://doi.org/10.1130/2005.4016\(09\)](https://doi.org/10.1130/2005.4016(09)).

Kawiecka R., Krawczyk A., Lewin´ska P., Pargieła, K., Szombara S., Tama A., Adamek K., Lupa M. Mining Activity and its Remains – The Possibilities of Obtaining, Analysing and Disseminating of Various Data on the Example of Miedzianka, Lower Silesia, Poland. *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2018. V. 8. P. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.2478/jaes-2018-0020>

Kretschmann J. Post-Mining – a Holistic Approach. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020. 37. P. 1401–1409. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00265-y>

Kretschmann J., Nguyen N. Research areas of post-mining areas – Experiences from German hard coal mining. *Mineral Engineering*. 2020. 1 (2). 255–262. <https://doi.org/10.29227/IM-2020-02-31>.

Martinez J. D. Salt domes. *American Scientist*. 1991. Vol. 79. P. 420–431.

Padmanaban R., Bhowmik A. K., Cabral P. A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area. *ISPRS international journal of geo-information*. 2017. 6(12). 401 p.

Pakshin M., Shekhunova S., Stadnichenko S., Liaska I., The satellite radar monitoring for anthropogenic and natural geological hazards mapping within the Solotvyno mining area (Transcarpathia, Ukraine). *European Geosciences Union «vEGU21»*. 2021. EGU21–8417. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8417>.

Paskaleva I., Nikolova S., Dimitrova L., Georgieva G. Monitoring networks – Way for improving risk assessment from natural and man-made hazards: Case study salt mine Provadia

(NE Bulgaria). *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 45. Pp. 388–402. <https://doi.org/10.1556/AGeod.45.2010.3.11>.

Pawlik M., Gellendin M., Bernsdorf B., Rudolph T., Bendorf J., 2022. Digital-Twin — How to Observe Changes and Trends on the Post-Mining Areas? *International Journal of Earth & Environmental Sciences*. 7: 195. <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2022/195>.

Pawlik M., Rudolph T., 2024. Concept for long-term geo-monitoring of the post-mining environment using the example of the Prosper-Haniel mine. *E3S Web of Conferences*. 526. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601009>.

Payment K. A., 2000. Loss of the Retsof salt mine: legal analysis of liability issues, in R. M. Geertmann, ed. *Proc. 8th World Salt Symp., Salt 2000*. The Hague, V. 1: Amsterdam, Elsevier. Pp. 399–404.

Protocol on Strategic Environmental Assessment to the Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context (2008). United Nations, *Treaty Series*. Vol. 2685. P. 140; Doc. ECE/MP.EIA/2003/2.

Scheidler S., Huggenberger P., Dresmann H., Auckenthaler A., Epting J., 2021. Regional groundwater flow and karst evolution—theoretical approach and example from Switzerland. *Environmental Earth Sciences*. 80. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09471-3>.

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

Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Meijer S., Stadnichenko S. M., Yakovlev E. O., 2019. Monitoring of hazardous geological processes as a tool for risks minimization on post-mining areas in Solotvyno (Transcarpathia). *XIII ISC EAGE “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*. Vol. 2019. Pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903197>.

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). *XV ISC EAGE “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*. Vol. 2021. Mon-21-075. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2075>.

Shekhunova S. B., Stadnichenko S. M., Aleksieienkova M. V., Kril T. V., Siumar N. P., 2021b. Risk mapping of the slope mass movement processes for public awareness and community risk preparedness (on the example of Solotvyno). *Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*. Vol. 2021. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1028>.

Stadnichenko S. M., Shekhunova S. B., Siumar N. P., Yakovlev Ye. O., 2023. Environmental monitoring for the post-mining site in Solotvyno (Transcarpathia, Ukraine). *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Vol. 2023. p.1–5. Mon-23-245. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520245>.

(NE Bulgaria). *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2010. 45. P. 388–402. <https://doi.org/10.1556/AGeod.45.2010.3.11>

Pawlik M., Gellendin M., Bernsdorf B., Rudolph T., Bendorf J. Digital-Twin — How to Observe Changes and Trends on the Post-Mining Areas? *International Journal of Earth & Environmental Sciences*. 2022. 7:195. doi: <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2022/195>.

Pawlik M., Rudolph T. Concept for long-term geo-monitoring of the post-mining environment using the example of the Prosper-Haniel mine. *E3S Web of Conferences*. 2024. 526. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601009>.

Payment K. A. Loss of the Retsof salt mine: legal analysis of liability issues, in R. M. Geertmann, ed. *Proc. 8th World Salt Symp., Salt 2000*. The Hague, v. 1: Amsterdam, Elsevier. 2000. P. 399–404.

Protocol on Strategic Environmental Assessment to the Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context. United Nations, *Treaty Series*. 2008. Vol. 2685. P. 140; Doc. ECE/MP.EIA/2003/2.

Scheidler S., Huggenberger P., Dresmann H., Auckenthaler A., Epting J. Regional groundwater flow and karst evolution—theoretical approach and example from Switzerland. *Environmental Earth Sciences*. 2021. 80. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09471-3>.

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

Shekhunova S. B., Aleksieienkova M. V., Meijer S., Stadnichenko S. M., Yakovlev E. O. Monitoring of hazardous geological processes as a tool for risks minimization on post-mining areas in Solotvyno (Transcarpathia). *XIII ISC EAGE “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*. 2019. Vol. 2019. P. 1–5. <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). *XV ISC EAGE “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*. 2021a. Vol. 2021. Mon-21-075. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2075>.

Shekhunova S. B., Stadnichenko S. M., Aleksieienkova M. V., Kril T. V., Siumar N. P. Risk mapping of the slope mass movement processes for public awareness and community risk preparedness (on the example of Solotvyno). *Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*. 2021b. V. 2021. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1028>.

Stadnichenko S. M., Shekhunova S. B., Siumar N. P., Yakovlev Ye. O. 2023. Environmental monitoring for the post-mining site in Solotvyno (Transcarpathia, Ukraine). *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2023. V. 2023. P. 1–5. Mon-23-245. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520245>.

Szczerbowski Z., Gawałkiewicz R., 2023. A Multidisciplinary Investigation of an Abandoned Old Mining Area Which Has Been Affected by the Combined Influences of Salt Karst and Human Exploration Activity. *Applied Sciences*. 13(22). 12196. <https://doi.org/10.3390/app132212196>.

Vandenberg J., Salzsauler K., Donald S., 2016. Best Practices Checklist for Modelling Mine Waters. Proceedings IMWA, Freiberg, Germany, Drebenstedt, Carsten, Paul, Michael (eds.). *Mining Meets Water – Conflicts and Solutions*. Pp. 1161–1169.

Walters R. F., 1978. Land subsidence in central Kansas related to salt dissolution: *Kansas Geological Survey Bulletin*. Vol. 214. Pp. 1–82.

Warren J. K., 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*. Second Edition. Springer International Publishing Switzerland. 1822 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13512-0>.

Zhang Y., Wang Y. L., 2012. Influence Analysis of Salt Resource Exploitation on Geological Environment in Huai'An. In *Advanced Materials Research*, V. 594–597, 647–650. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.647>.

Szczerbowski Z., Gawałkiewicz R. A Multidisciplinary Investigation of an Abandoned Old Mining Area Which Has Been Affected by the Combined Influences of Salt Karst and Human Exploration Activity. *Applied Sciences*. 2023. 13(22). 12196. <https://doi.org/10.3390/app132212196>.

Vandenberg J., Salzsauler K., Donald S. Best Practices Checklist for Modelling Mine Waters. Proceedings IMWA, Freiberg, Germany, Drebenstedt, Carsten, Paul, Michael (eds.). *Mining Meets Water – Conflicts and Solutions*. 2016. P. 1161–1169.

Walters R. F. Land subsidence in central Kansas related to salt dissolution: *Kansas Geological Survey Bulletin*. 1978. 214. P. 1–82.

Warren J. K. *Evaporites: A Geological Compendium*. Second Edition. Springer International Publishing Switzerland. 2016. 1822. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13512-0>.

Zhang Y., Wang Y. L. Influence Analysis of Salt Resource Exploitation on Geological Environment in Huai'An. In *Advanced Materials Research*. 2012. V. 594–597, 647–650. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.647>

Manuscript received October 15, 2024;
revision accepted December 5, 2024.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна