



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.1.188>

УДК 528.88:504:622.841:622.847

Прогноз підтоплення територій ліквідованих вугільних шахт України за даними ДЗЗ

О. А. Улицький, К. Є. Бойко *

ДЗ “Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління”, вул. Василя Липківського 35/2, Київ 03035, Україна

У статті висвітлені аспекти застосування даних ДЗЗ у процесі створення випереджуючих гідрогеологічних прогнозів і оцінки розвитку підтоплення денної поверхні територій поширення вугільних шахт, які затоплюються. На основі попередньо створеної чисельної моделі геофільтрації, що дозволяє врахувати фільтраційні особливості масиву гірських порід, порушеного виймальними роботами, та виявити особливості впливу режиму затоплення на формування загальної гідродинамічної обстановки навколо шахт, які затоплюються, отримана картографічна схема прогнозного положення рівня підземних вод на кінцевому етапі затоплення. Для врахування впливу фактору осідань денної поверхні над гірничими виробками шахт на формування зон підтоплення, розраховані величини максимальних можливих вертикальних зміщень земної поверхні над контурами гірничих виробок на основі геолого-маркшейдерських даних. Математична модель рельєфу з урахуванням очікуваних вертикальних деформацій отримана шляхом застосування апарату ГІС та вихідної ЦМР території. Результат обробки знімків радіолокаційних супутників — картографічна модель інтенсивності висхідних рухів земної поверхні. Були визначені ділянки поширення великоамплітудних рухів (10–20 мм/рік). В результаті, отримана уточнена схема прогнозованого поширення зон підтоплення.

Ключові слова: затоплення вугільних шахт, геоінформаційні системи, чисельне моделювання геофільтрації, підтоплення, вертикальні деформації, ДЗЗ

© О. А. Улицький, К. Є. Бойко. 2021

1. Вступ

Аналіз досвіду закриття вугільних шахт в Україні, яке відбувається переважно шляхом повного неконтрольованого затоплення гірничих виробок, показує, що зміни гідрогеологічної обстановки спричиняють прояв широкого спектру інженерно-геологічних, геомеханічних, геохімічних та інших, екологічних наслідків цього процесу, який іноді носить регіональний комплексний характер і поширюється за межі існуючих гірничих відводів шахт (Улицький та ін., 2014; Яковлєв, 2010; Ulytsky et al, 2018). В результаті затоплення шахт відбувається низка змін у породному масиві, що призводить до зниження його інженерно-сейсмогеологічної стійкості, особливо, в основах будівель і споруд. До факторів, що призводять до втрати стійкості породного масиву, слід віднести підтоплення і заболочування, додаткові зрушення масивів гірських порід і просідання денної поверхні (Верховцев, 2005; Улицький та ін., 2014). Внаслідок тривалого процесу підтоплення територій збільшується актуальність вивчення несприятливих геоморфологічних процесів, у тому числі, просідання ґрунту поблизу й у межах населених пунктів та в районах розміщення об’єктів критичної інфраструктури.

Виявлення та кількісний аналіз таких явищ за умов відсут-

ності належного моніторингу режиму підземних вод у зоні впливу шахт, що затоплюються, своєчасного моніторингу процесу деформацій денної поверхні, і відсутності методології прогнозу змін гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов, потребує використання сучасних методів обробки даних і прогнозу, що ґрунтується на комплексному врахуванні змін складових геологічного середовища.

2. Постановка задачі

На сьогодні, дієвим інструментом отримання оперативних даних у межах ліквідованих шахтних підприємств, який широко використовується закордонними (Gee et al, 2020; Gee et al 2017; Vervoot et al, 2017; Vervoot et al, 2018) та не так давно вітчизняними (Ляска та ін., 2017) дослідниками, в умовах відсутності постійних моніторингових спостережень у межах впливу гідродинамічних змін навколо шахт, що затоплюються, є дистанційне зондування Землі. Сучасна стадія освоєння даних дистанційного зондування у вирішенні питань екологічного спрямування навколо шахтних підприємств в Україні характеризується використанням переважно ортотрансформованих космоснімків (Луньова, Буглак, 2019) та їх обробки з метою виділення об’єктового змісту цифрових зображень. Слід відмітити, однак, що така інтерпретація даних є недостатньо дієвою для цілей прогнозної гідрогеологічної оцінки, принаймні на етапі, коли затоплення деяких шахт ще не досягло критичних відміток

* E-mail: boyko_ekateruna@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-5269-3919>

і прояви підтоплення, пов'язані із одночасною взаємодією процесу відновлення рівнів підземних вод та повторних деформацій денної поверхні, не фіксуються і не можуть бути візуалізовані.

Натомість, інтерпретована відповідним чином аерокосмічна інформація, наприклад, у вигляді цифрової моделі рельєфу (ЦМР) або інтерферограми результатів радарної зйомки (Нощенко, Пережогин, 2017), як показує досвід найкращої європейської практики (Vervoot et al, 2017; Vervoot et al, 2018), може бути використана з метою кількісної оцінки зазначених негативних процесів.

Метою дослідження є прогнозування гідрогеологічної обстановки навколо вугільних шахт, які затоплюються, із подальшим залученням ЦМР для здійснення оцінки очікуваних максимальних деформацій денної поверхні і оцінки формування можливих зон підтоплення. А також здійснення аналізу відповідності режиму затоплення та результатів прогнозу на основі використання даних радіолокаційних супутників.

3. Характеристика об'єкту досліджень

Об'єкт досліджень — Торецько-Єнакієвська гірничо-промислова агломерація (далі — ГПА). На території Торецько-Єнакієвської ГПА (що географічно прив'язана до Центрального вуглевидобувного району Донбасу) до початку реструктуризації вугільної галузі України функціонувало 28 шахт, більшість з яких було закладено ще на початку XIX століття. На сьогодні, на території ГПА за шість років було ліквідовано і затоплюється понад 80% шахт.

У геологічній будові території беруть участь дислоковані кам'яновугільні відклади середнього і верхнього карбону: світи $C_2^2-C_7^2$, C_1^3 які перекриті тонким чохлам незначних покривів (до 10 м) четвертинних суглинків і глин, що розвинені, головним чином, на височинах вододілів та схилах балок. Породи кам'яновугільного віку представлені пісковиками, алевритовими і глинистими сланцями, вапняками, вулліям. Їхня потужність сягає 2 200 м.

Простягання вуглевміщуючих порід північно-західне ($320-330^\circ$), падіння пластів порід південно-західне під кутом $40-65^\circ$. Шахти відпрацьовують численні вугільні пласти (до 25) кам'яньської, алмазної, горлівської та інших світ.

У обводненні шахт досліджуваної території беруть участь всі водоносні горизонти продуктивних світ карбону, які перетинаються в межах шахтного поля численними проміжними квершлагами. Водоносні горизонти приурочені до трищипуватих пісковиків та вапняків. Води напірні та пластовотріщинні.

Широкий розвиток очисних робіт як за площею, так і в розрізі, у сукупності зі складними гірничо-геологічними умовами, істотно змінили гідрогеологічну ситуацію у межах досліджуваної території: збільшилась проникність гірського масиву, порушеного виймальними роботами та наявними гірничими виробками, прискорились темпи водообміну майже до глибини 700–1 000 м, сформувались лінійно витягнуті у просторі зони осушення кам'яновугільного комплексу. Тому, серед низки проблем масового закриття шахт, яке відбулося у Торецько-Єнакієвській ГПА, найбільш критичною є гідрогеологічна. Негативні гідрогеологічні наслідки затоплення шахт прогноуються, враховуючи що ліквідація шахт у цьому регіоні внаслідок низького рівня фінансування сектору реструктуризації, а також впливу військово-політичного фактору, відбувається переважно шляхом повного неконтрольованого затоплення гірничих виробок без подальшого управління гідродинамічним режимом навколо шахтних полів і, в цілому, далека від класичного розуміння терміну

“мокра консервація”. Негативні гідрогеологічних наслідки затоплення шахт проявлятимуться, насамперед, у підтопленні денної поверхні територій над гірничими виробками, що зазнали геодинамічних деформацій протягом тривалого ведення виймальних робіт. А в межах територій ГПА слід очікувати значних економічних втрат — руйнування будівель і споруд внаслідок зниження міцності верхньої зони порід в процесі їх замочування та додаткових зрушень і просідань денної поверхні, у т. ч. — у зонах поширення раніше не виявлених гірничих виробок та зонах формування техногенного підтоплення, спричиненого порушеннями водообміну витрілої зони карбону внаслідок затоплення шахт.

Вибуття шахт із експлуатації із подальшим їх затопленням відбувалось за такої схеми: у 1997 р. було відключено водовідлив на ш. “Кочегарка”; у 2014 р. було зупинено водовідлив на шахтах “ім. Гагаріна”, “Полтавська”, “Єнакієвська”; у 2015 р. — на шахтах “Комсомолец” та “ім. Леніна”; 2017 р. — відключення ВВК на шахтах “Гайового”, “ім. К. Маркса”, “Красний Профінтерн”; у 2018 р. припинено водовідлив на шахтах “Красний Октябрь” та “Юнком”.

Різна тривалість затоплення шахт, відмінні гірничо-технічні параметри (максимальна глибина робочого горизонту, об'єм виробленого простору, кількість вугільних пластів, що відпрацьовувались, тощо), а також наявність численних збійок (гірничих виробок, що перетинаються, накладаються, підпрацьовані та надпрацьовані гірничими виробками сусідніх шахт) між шахтами, відобразились на характері формування поверхні затоплення у загальному розрізі. Наприкінці 2019 р. рівень затоплення шахт Горлівсько-Єнакієвської групи досяг абсолютних позначок — 50–150 м, тобто знаходиться на глибині 250–300 м. Критичною глибиною затоплення при збереженій тенденції процесу вважається глибина 100–150 м.

4. Методи досліджень

З метою прогнозу гідрогеологічної ситуації території навколо шахт, які затоплюються, після досягнення рівня затоплення критичної глибини 100–150 м, виконане чисельне моделювання геофільтрації, суть якого полягає у дискретизації диференціальних рівнянь фільтрації на основі їх розкладання у ряди Тейлора за степеневими функціями. Точність розв'язку рівняння нестационарної фільтрації залежить від вихідної схематизації умов геофільтрації, яка задається у вигляді граничних умов різного роду по краях та всередині моделі, а також дозволяє врахувати закономірності формування властивостей масиву гірських порід, умови живлення підземних вод, процес формування фільтраційної зональності гірських порід у межах гірничо-промислових агломерацій. Стадія схематизації умов геофільтрації, а також визначення вихідних параметрів та характеристик об'єкту моделювання завершується математичним формулюванням задачі і побудовою вихідної гідродинамічної схеми. Принцип вибору граничних умов, вхідних геофільтраційних параметрів, а також побудови геометрії геофільтраційної схеми-моделі в умовах впливу шахт, які затоплюються, описані в роботі (Sadovenko et al, 2020).

Пониження рельєфу як прояв вертикальних деформацій земної поверхні, що відбуватиметься у зонах активного водообміну (заплави річок), де за природних умов можуть спостерігатися сезонні коливання рівня підземних вод з амплітудою 3–5 м, призведе до геофільтраційних змін процесу водообміну, формування підпору підземних вод і, як наслідок, підтоплення таких територій. Для того, щоб врахувати фактор впливу сумарної результуючої величини вертикальних деформацій і зрушень денної поверхні над гірничими виробками в результаті їх затоплення на розвиток зон підтоплен-

ня, виконане районування території за величиною максимально можливих очікуваних вертикальних зміщень земної поверхні. Дані величини отримані на основі обробки наступної геолого-маркшейдерської інформації:

- потужність та кількість відпрацьованих вугільних пластів;
- розмір та геометрія гірничих виробок;
- структурні особливості вуглевмісних порід.

Величина деформацій, яка приймається на основі врахування сумарної потужності відпрацьованих вугільних пластів, дозволяє опосередковано врахувати поширення зон максимальних вертикальних зміщень, навіть при проявах додаткових раптових провалів земної поверхні над очисними та підготовчими виробками при затопленні виробленого простору вище глибини 150 м від поверхні землі. Для визначення величини максимального просідання земної поверхні, використане емпіричне рівняння (Геомеханічні..., 2002):

$$\eta_m = 63 \cdot \frac{\sum m}{H} \cdot 10^3$$

де η_m — величина максимального осідання земної поверхні при розробці світи вугільних пластів, мм; $\sum m$ — сумарна потужність вугільних пластів світи, м; H — глибина відпрацювання, м.

Для отримання загальної картини, яка відображає поширення зон деформування денної поверхні над гірничими виробками шахт Торецько-Єнакієвської ГПА за весь період роботи шахт, було виконано розрахунок величини деформації. У якості вихідних даних використовувались середні значення потужності продуктивних світ середнього та верхнього карбону, до яких приурочена основна промислова вугленосність у межах території, що вивчається: C_2^3 (смоляннівська свита, яка містить щонайменше 7 пластів промислового значення), C_2^5 (кам'янська свита, що містить близько 16 пластів промислового значення), C_2^5 (горлівська свита — 16 пластів промислового значення) (Таблиця 1).

Результат розрахунку вертикальних зміщень земної поверхні над контурами гірничих виробок шахт за весь період роботи шахт на кінцеву глибину гірничих робіт відпрацювання з урахуванням погоризонтного поширення вугільних пластів, наведено в Таблиці 2.

З метою інтерполяції отриманих даних максимальних величин вертикальних зміщень та з метою збереження безперервності вхідних даних для картографічного відображення поверхні розподілу деформацій додатково використані дані по реперних замірах. Далі виконана інтерполяція отрима-

Таблиця 2.

Розрахункові величини вертикальних зміщень земної поверхні деяких шахт на території Торецько-Єнакієвської ГПА

Назва шахти	Глибина кінцевого робочого горизонту, м	Розрахункова максимальна величина просідання земної поверхні, η_m , м
Центральна (ім. Дзержинського)	1146	8.5
ім. Артема	1220	8.7
Південна	600	9.3
ім. Гагаріна	1190	3.2
Комсомолец	1180	6.5
ім. Леніна	1190	3.2
ім. Гайового	1095	5.6
ім. Карла Маркса	1000	6.2
Красний Октябрь	910	5.2
Юнком	936	6.0
Єнакієвська	550	2.89

них величини із представленням їх у вигляді ізоліній з метою подальшого отримання безперервної GRID-поверхні.

На завершальному етапі була побудована картографічна схема із відображенням очікуваних величин вертикальних деформацій денної поверхні, яка являє собою математичну модель рельєфу з урахуванням вертикальних деформацій, отриману за допомогою ГІС. З метою виявлення потенційних зон підтоплення виконане повторне моделювання рівневої поверхні підземних вод на основі відкаліброваних параметрів прогновної геофільтраційної моделі, але із врахуванням прогнозу топографії рельєфу.

Основою створення ЦМР стали дані цифрової карти висот поверхні землі SRTM (розрізнявальна здатність 90 м), отримані під час Shuttle Radar Topographic Mission. Існують також цифрові карти більш високої розрізнявальної здатності, які зберігаються у загальному доступі на електронному ресурсі дистанційних досліджень Землі Геологічної служби США (USGS Earth Explorer — англ.), однак, цифрові поверхні рельєфу на основі SRTM вказаної розрізнявальної здатності були також використані у подальшому з метою компенсації висоти поверхні під час обробки знімків орбітальних апаратів (SAR).

Метод супутникової радарної інтерферометрії або інтерферометрії радаром із синтезованою апертурою (Synthetic Aperture Radar (InSAR) — англ.) є відносно новою технікою дистанційного зондування, що останнім часом використовується з метою вивчення рухів земної поверхні у достатньо

Таблиця 1.

Загальні дані по світах C_2^3 , C_2^5 та C_2^7 Центрального вугленосного району Донбасу

Геологічний індекс світи	Потужність покладів світи, м	Кількість вугільних пластів	Кількість робочих вугільних пластів потужністю > 0,45 м та більше	Сумарна потужність вугільних пластів світи, $\sum m$, м
C_2^7	600	25	16	3.76
C_2^5	550	30	16	5.2
C_2^3	500	14	7	2.6

тривалому інтервалі часу (Vervoot, Declercq, 2017). Ключовий момент в роботі радарів InSAR — використання різниці фаз, або фазового здвигу, що дає змогу визначити висоти об'єктів сканування, і, відтак, дослідити зміни висот у часі. Теорія, що пояснює зв'язок вертикальних висхідних рухів земної поверхні над експлуатаційними виробками шахт, зафіксованих радаром, із затопленням гірничих виробок вугільних шахт, вже досить тривалий час є об'єктом дослідження серед європейських дослідників (Vervoot, Declercq, 2018) і віднайшла своє підтвердження шляхом здійснення контрольних геодезичних вимірювань на місцевості. Вона ґрунтується на наступних положеннях. По мірі того, як матриця гірської породи повертається до природних умов, тобто насичується водою в процесі затоплення шахт, тиск порової води зростає, а сама гірська порода розширюється. Даний процес проявляється на поверхні у вигляді висхідних рухів, амплітуда яких подекуди може сягати 50 мм/рік. Слід відмітити, однак, що руйнування матриці гірських порід, порушеної веденням гірничих робіт, в умовах повторного її водонасичення, вочевидь призведе у подальшому до більш масштабних у просторі проявів просідань денної поверхні. В той же час, наведені дослідження (Gee et al, 2017; Vervoot, Declercq, 2017, Vervoot, Declercq, 2018) дозволяють стверджувати, що затоплення гірничих виробок в період перших років затоплення шахт, ідентифікуються у вигляді висхідних рухів поверхні.

Зазначені положення використовувались в ході обробки даних InSAR. Метод інтерпретації вимірювань деформації денної поверхні детально наведено у роботі (Gee et al, 2020). Результуюча картографічна схема інтенсивності висхідних рухів у межах шахт Торецько-Єнакієвської ГПА, які затоплюються, отримана в ході спільного дослідження українських науковців та експертів Ноттінгемського геопросторового інституту та дослідницької компанії Terra Motion (Велика Британія) (Рис. 1).

5. Результати

На етапі прогнозного гідрогеологічного моделювання отримана картографічна схема розподілу ізольованих рівнів затоплення (ізольовані напорів підземних вод), що відображає загальний характер поведінки “гірський масив-шахтні води-підземні води” після досягнення рівня затоплення критичної глибини 100–150 м. З метою виявлення потенційних зон підтоплення виконане повторне моделювання рівневої поверхні підземних вод на основі відкаліброваних параметрів прогновної геофільтраційної моделі, але із врахуванням прогновної топології рельєфу, отриманої шляхом інтерполяції розрахованих значень очікуваних вертикальних деформацій. Для більш детального відображення обрані результати гідрогеологічного моделювання у межах водозбірної площі р. Булавини, до якої входять шахтні поля гідралічно пов'язаних суміжних шахт “ім. К. Маркса”, “Красний Профінтерн”, “Красний Октябрь”, “Юнком” (м. Горлівка, м. Єнакієве, Донецька область). Кінцевим результатом гідрогеологічного прогнозу є карта-схема прогнозних глибин залягання рівнів підземних вод, що встановлюються в результаті подальшого розвитку затоплення шахт (Рис. 2).

Зони із поширенням підземних вод, які за прогноною оцінкою залягають на глибині 0–3 м, відповідно до норм будівельних стандартів та нормативів України, оцінюються нами як зони ймовірного підтоплення територій (Рис. 3).

Досі не існує загальноприйнятої методики порівняння (математичної функції) даних результатів обробки радарної інтерферометрії із результатами прогносної кількісної гідрогеологічної оцінки. Натомість, темпи затоплення шахт досить непогано апроксимуються із даними по інтенсивності висхідних рухів (див. Рис. 1). Очевидно, що, чим інтенсивніші висхідні рухи (до 20 мм над гірничими виробками шахт “Юнком” та “Красний Октябрь”), тим швидше відбувається насичення матриці гірських порід водою. Ослаблений внаслідок тривалого осушен-

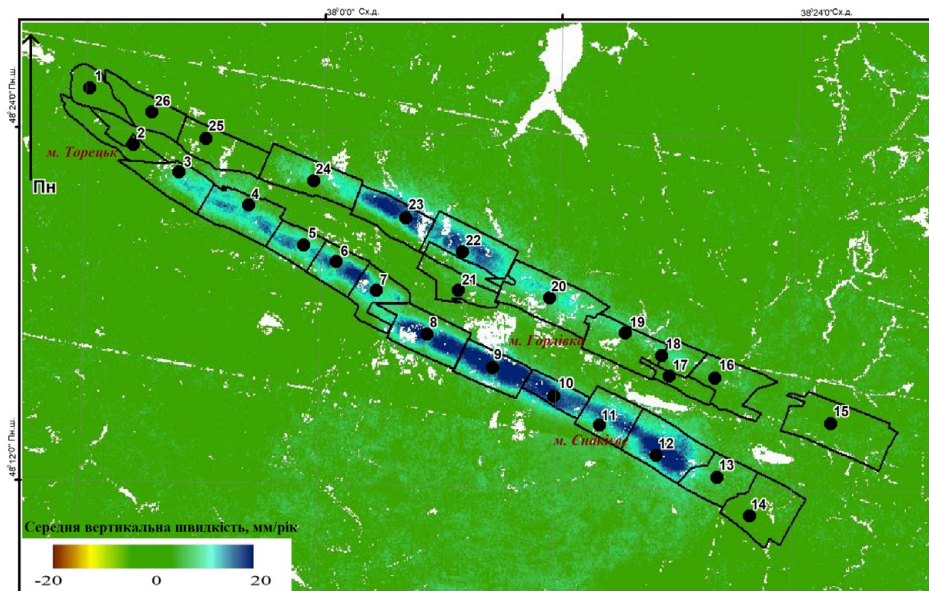


Рис. 1. Схема висхідних вертикальних рухів, зафіксованих у межах шахтних полів Торецько-Єнакієвської ГПА на основі первинного InSAR аналізу космічних знімків (номер — назва шахти):

1 — “Ново-Дзержинська”; 2 — “Центральна”; 3 — “ім. Артема”; 4 — “ім. Гагаріна”; 5 — “Комсомолец”; 6 — “ім. Леніна”; 7 — “Кочегарка”; 8 — “ім. Гайового”; 9 — “ім. К. Маркса”; 10 — “Красний Профінтерн”; 11 — “Красний Октябрь”; 12 — “Юнком”; 13 — “Полтавська”; 14 — “Єнакієвська”; 15 — “Ольховатська”; 16 — “Булавинська”; 17, 18 — “Олександрівські 3, 4”; 19 — “Вуглегірська”; 20 — “Кондратівська”; 21 — “Олександр-Захід”; 22 — “ім. Калініна”; 23 — “ім. Рум’янцева”; 24 — “ім. Ізотова”; 25 — “Северная”; 26 — “Торецька”

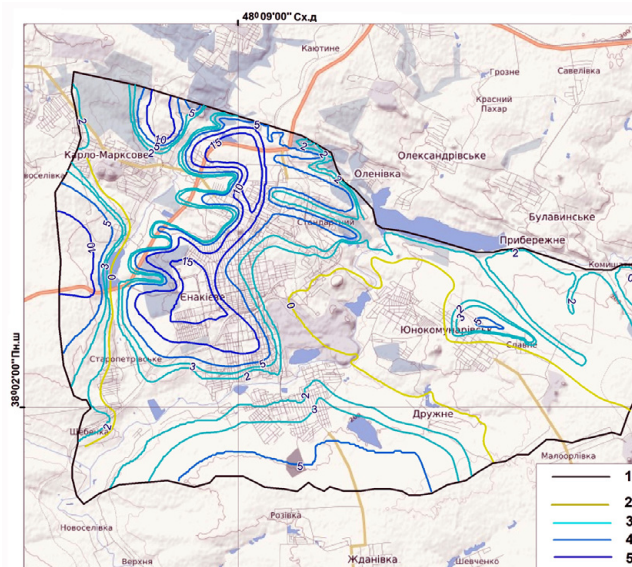


Рис. 2. Карта-схема прогнозних глибин залягання рівнів підземних вод, отримана на основі чисельного моделювання геофільтрації. 1 — водозбірна площа та площа геофільтраційної моделі; 2–5 — глибини залягання рівнів підземних вод, м: 2 — близько 0 м; 3 — 1–3 м; 4 — 5–10 м; 5 — більше 10 м

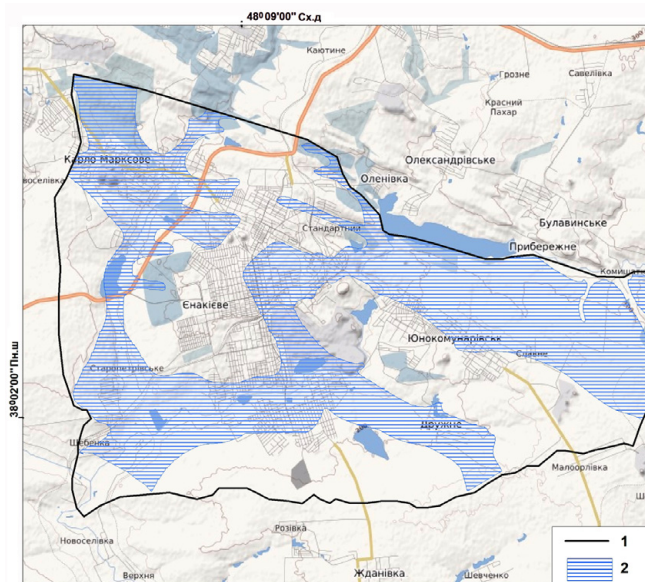


Рис. 3. Карта-схема потенційного розвитку підтоплення денної поверхні, що супроводжуватиме затоплення шахт, отримана на основі чисельного моделювання геофільтрації.

1 — водозбірна площа та площа геофільтраційної моделі; 2 — зони підтоплення із глибиною залягання підземних вод 0–3 м

ня та численних руйнувань внаслідок ведення виїмальних робіт скелет гірських порід при інтенсивному заповненні водою буде швидко руйнуватися. У подальшому це може призвести до формування повторного просідання денної поверхні і, як наслідок, розвитку затоплення. Для того, щоб врахувати зазначений фактор, на основі схеми зафіксованих вертикальних рухів (див. Рис. 1), були виділені ділянки із найбільш їх інтенсивним проявом за амплітудою рухів 10–20 мм/рік (Рис. 4).

Далі врахування ділянок поширення великоамплітудних рухів дозволило скорегувати контури поширення прогнозованої території підтоплення (Рис. 5). Поєднання здійснено із застосуванням спеціального математичного апарату ГІС із застосуванням інструменту “математика карт”.

Висновки

Наведені методи інтерпретації даних ДЗЗ та результати обробки аерокосмічної інформації, на нашу думку, є потужним інструментом випереджаючого прогнозування змін гідрогеологічної обстановки у межах територій поширення вугільних шахт, які затоплюються та ліквідовані. Спосіб інтегрування результатів оцінки висхідних рухів земної поверхні (на основі методу InSAR) у гідрогеологічну інформацію ще недостатньо вивчений в Україні. Тому у подальшому, з метою перевірки виправданості результатів обробки даних радарної інтерферометрії, мають бути отримані референтні значення показників загальних більш масштабних проявів рухів

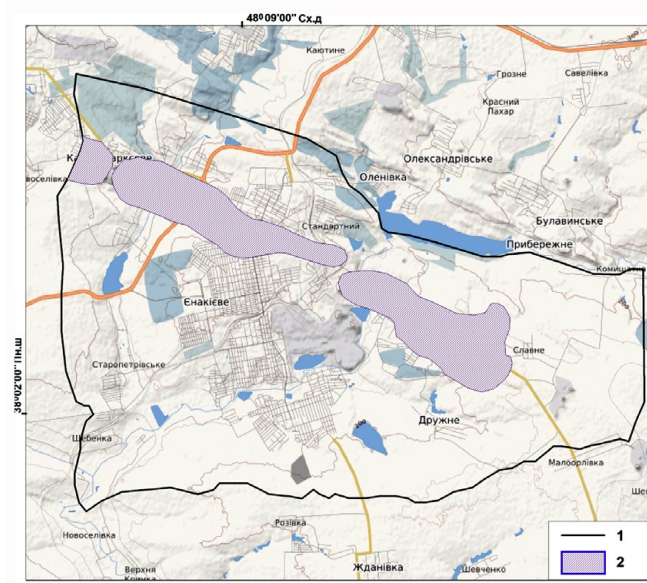


Рис. 4. Карта-схема виявлених ділянок із найбільшою амплітудою висхідних рухів (10–20 мм/рік), створена на основі результатів обробки знімків методом In SAR.

1 — водозбірна площа та площа геофільтраційної моделі; 2 — ділянки прояву великоамплітудних висхідних рухів

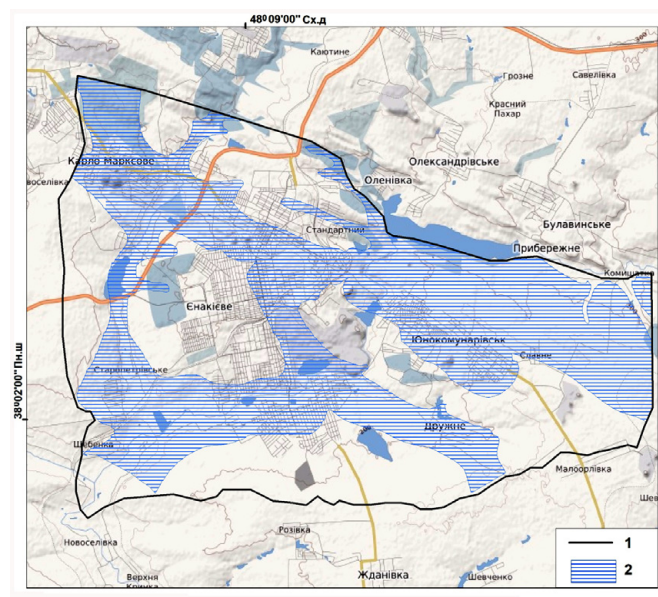


Рис. 5. Карта-схема потенційного розвитку підтоплення денної поверхні, що супроводжуватиме затоплення шахт із врахуванням зон поширення великоамплітудних висхідних рухів.

1 — водозбірна площа та площа геофільтраційної моделі; 2 — зони підтоплення із глибиною залягання підземних вод 0–3 м

земної поверхні — тектонічних рухів та вертикальних зміщень безпосередньо над гірничими виробками. Спільне використання методів чисельного гідрогеологічного моделювання, а також аерокосмічної інформації (таких як ЦМР, модель інтенсивності рухів земної поверхні) дає змогу більш комплексно і детально оцінити ризик розвитку підтоплення денної поверхні, що відбудеться за досягнення рівня затоплення критичних відміток, а також отримати загальну картину поширення зон підтоплення на конкретних територіях, що у подальшому може бути використано з метою моніторингу інженерно-технічного стану наземних об'єктів.

Література

Верховцев В. Г. Прикладные (поисковые и инженерно-геологические) аспекты изучения платформенных геоструктур Украины. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2005. № 3. С. 80–92.

Геомеханічні та технологічні проблеми закриття шахт Донбасу: Учбовий посібник / Під заг. ред. С. С. Гребьонкіна, В. М. Єрамкова. Донецьк: ДонНТУ. 2002. 266 с.

Луньова О. В., Буглак О. В. Методологічні засади застосування ортотрансформованих космічних знімків для оцінки стану навколишнього середовища та програмне забезпечення досліджень.

- Український журнал дистанційного зондування Землі. 2019. № 22. С. 27–34. doi: 10.36023/ujrs.2019.22.155
- Ляска І. І., Пакшин М. Ю., Стасюк В. М. Дослідження стану геодинамічних процесів в Україні методами та засобами радіолокаційної зйомки. *Аерокосмічні технології*. 2017. № 1 (1). С. 15–22.
- Нощенко Д. С., Пережогин А. С. О методе радарной интерферометрии для оценки деформации земной поверхности. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки*. 2010. Т. 1. № 1. С. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2010-1-1-54-61>.
- Улицкий О. А., Ермаков В. Н., Бузило В. И., Павличенко А. В. Гидрогеологические и техногенные последствия затопления угольных шахт: монография / под ред. В. И. Бузило. Днепропетровск: Литограф. 2014. 128 с.
- Яковлев С. О. Теоретичні основи оцінки часу затоплення шахт і кар'єрів. *Мінеральні ресурси України*. 2010. № 2. С. 35–39.
- Gee D., Bateson L., Grebby S., Novellino A., Sowter A., Wyatt L., Marsh S., Morgenstern R., Athab A. Modelling groundwater rebound in recently abandoned coalfields using DInSAR. *Remote Sensing of Environment*. 2020. No. 249. P. 1–18. doi: 10.1016/j.rse.2020.112021.
- Gee D.; Bateson L.; Sowter A.; Grebby S.; Novellino A.; Cigna F.; Marsh S.; Banton C.; Wyatt L. Ground Motion in Areas of Abandoned Mining: Application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. *Geosciences*. 2017. No. 7, Vol. (3). P. 85. doi:10.3390/geosciences7030085.
- Sadovenko I., Ulytsky O., Zahrytsenko A., Boiko K. Risk assessment of radionuclide contamination spreading while flooding coal mined-out rocks. *Mining of Mineral Deposits*. 2020. No. 14, Vol. 4. P. 130–136. doi: <https://doi.org/10.33271/mining14.04.130>.
- Ulytsky O., Yermakov V., Lunova O., Buglak O. Environmental risks and assessment of the hydrodynamic situation in the mines of Donetsk and Lugansk regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. No. 27, Vol. 2. P. 368–376. <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/111861>.
- Vervoort A., Declercq P. Surface movement above old coal longwalls after mine closure. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017. No. 27, Vol. 3. P. 481–490. doi: 10.1016/j.ijmst.2017.03.007.
- Vervoort A., Declercq P. Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of underground workings. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. No. 28, Vol. 1. P. 53–59. doi: 10.1016/j.ijmst.2017.11.008.
- groundwater rebound in recently abandoned coalfields using DInSAR. *Remote Sensing of Environment*, 249, 1–18. doi: 10.1016/j.rse.2020.112021.
- Gee, D., Bateson, L., Sowter, A., Grebby, S., Novellino, A., Cigna, F., Marsh, S., Banton, C., Wyatt, L. (2017). Ground Motion in Areas of Abandoned Mining: Application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. *Geosciences*, 7(3), 85. doi:10.3390/geosciences7030085.
- Hrebokin, S. S., Yermakov, V. M. (Eds.) (2002). Geomechanical and technological problems of Donbass mines closure: Textbook. Donetsk: DonNTU. (in Ukrainian).
- Liaska, I. I., Pakshyn, M. Yu., Stasiuk, V. M. (2017). The research of the state of geodynamic processes in Ukraine by methods and techniques of radar survey. *Aerokosmichni tekhnolohii*, 1 (1), 15–22. (in Ukrainian).
- Lunova, O., Buglak, O. (2019). Methodological basis of orthotransformed space images application for the environmental assessment and software of research, *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*, 2, 27–34. doi: 10.36023/ujrs.2019.22.155. (in Ukrainian).
- Noschenko, D. S., Perezhogin, A. S. (2010). About the method of radar interferometry for assessing the deformation of the earth surface. *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. Nauki*, 1 (1), 54–61. doi: <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2010-1-1-54-61>. (in Russian).
- Sadovenko, I., Ulytsky, O., Zahrytsenko, A., Boiko, K. (2020). Risk assessment of radionuclide contamination spreading while flooding coal mined-out rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 14 (4), 130–136. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.04.130>.
- Ulytsky, O. A., Yermakov, V. N., Buzlyo, V. Y., Pavlychenko, A. V. (Eds.) (2014). Hydrogeological and technogenic consequences of coal mine flooding. Dnepropetrovsk: Litograf. (in Russian).
- Ulytsky, O., Yermakov, V., Lunova, O., Buglak, O. (2018). Environmental risks and assessment of the hydrodynamic situation in the mines of Donetsk and Lugansk regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27 (2), 368–376. <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/111861>.
- Verkhovtsev, V. G. (2005). Applied (prospecting and engineering-geological) aspects of studying platform geostructures of Ukraine. *Ekologiya dovkillya ta bezpeka zhytyediyalnosti*, 3, 80–92. (in Russian).
- Vervoort, A., Declercq, P. (2017). Surface movement above old coal longwalls after mine closure. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27 (3), 481–490. doi: 10.1016/j.ijmst.2017.03.007.
- Vervoort, A., Declercq, P. (2018). Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of underground workings. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28 (1), 53–59. doi: 10.1016/j.ijmst.2017.11.008.
- Yakovlev, Ye. O. (2010). Theoretical basis for the assessment of the time of mines and career flooding. *Mineralni resursy Ukrainy*, 2, 35–39.

References

ПРОГНОЗ ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ЛИКВИДИРОВАННЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ УКРАИНЫ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

О. А. Улицкий, Е. Е. Бойко

ГУ “Государственная экологическая академия последипломного образования и управлени”, ул. В. Липковского 35/2, Киев 03035, Украина

В статье освещены аспекты использования данных ДЗЗ в процессе создания опережающих гидрогеологических прогнозов и оценки развития подтопления дневной поверхности территорий распространения угольных шахт, которые затопляются. На основе предварительно созданной числовой модели геофильтрации, которая позволяет учесть фильтрационные особенности массива горных пород, нарушенного выемочными работами, и выявить особенности влияния режима затопления на формирование общей гидродинамической обстановки вокруг шахт, которые затопляются, получена картографическая схема прогнозного положения уровня подземных вод на конечном этапе затопления. Для того, чтобы учесть фактор оседаний земной поверхности над горными выработками шахт на формирование зон подтопления, были рассчитаны величины максимальных возможных вертикальных смещений земной поверхности над контурами горных работ на основании геолого-маркшейдерских данных. Математическая модель рельефа с учётом ожидаемых вертикальных деформаций получена путём использования аппарата ГИС и исходной ЦМР территории.

Результат обработки снимков радиолокационных спутников — картографическая модель интенсивности восходящих движений земной поверхности. Были определены участки распространения высокоамплитудных движений (10–20 мм/год). В результате, получена уточнённая схема прогнозируемого распространения зон подтопления.

Ключевые слова: затопление угольных шахт, геoinформационные системы, числовое моделирование геофильтрации, подтопление, вертикальные деформации, ДЗЗ

RSE-BASED FLOODING PREDICTION WITHIN TERRITORIES OF CLOSED COAL MINES OF UKRAINE

O. Ulytsky, K. Boiko

SI “State ecological academy of postgraduate education and management”, str. Metropolitan Vasyl Lypkivskyi, 35, bldg. 2, Kyiv 03035, Ukraine

The article highlights the aspects of RSE technologies adaptation during the forward hydrogeological predictions development and for the purposes of the surface flooding zones spreading estimation within coal-mines fields, being flooded. Previously developed numerical geofiltration model allows to return filtration settings of the massif of rocks, that was broken due to coal extraction, and to identify the influence features of the mine workings flooding regime on the general hydrodynamic settings around the flooded mines. As a result of geofiltration modeling the forecast cartographic scheme of groundwater table level position at the final stage of mine workings flooding was obtained. To take into account the influence of surface subsidence over the mine workings on flooding zones distribution, the values of maximum possible vertical surface displacements over the mine workings contours were calculated, based on geological and surveying data. The relief mathematical model was developed with given expected vertical deformations using the GIS-techniques and the original DEM of the territory.

The result of the radar satellites images processing is a cartographic model that demonstrates the intensity of uplift movements of the earth surface. Areas of distribution of large-amplitude movements (10–20 mm/year) were determines. As a result, an updated scheme of the forecasted flooded zones was developed.

Keywords: coal mines flooding, geoinformation systems, numeric geofiltration modeling, surface flooding, vertical deformations, RSE

Рукопис статті отримано 22.01.2021