

УДК 622.831.8

<https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.005>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОВАЛІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НАД СОЛЯНОЮ ШАХТОЮ

Л.М. Захарова^{1*}, О.В. Чеснокова¹, О.Ю. Підгурна², В.В. Назимко¹

¹Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

²Донецький національний технічний університет, м. Покровськ, Україна

*Відповідальний автор: e-mail: mila2017ma@gmail.com

INVESTIGATION OF CHIMNEY SUBSIDENCE OVER A SALT MINE

L.M. Zakharova^{1*}, O.V. Chesnokova¹, O.Y. Pidgurna², V.V. Nazimko¹,

¹Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

²Donetsk National Technical University, Pokrovs'k, Ukraine

*Corresponding author: e-mail: mila2017ma@gmail.com

ABSTRACT

Purpose. Investigation of ground movement around an abandoned salt mine during sewage dissemination underground. Identification of dissipative structures during chimney subsidence initiation.

Methods. We used FLAC3D program package to simulate stress-strain redistribution and irreversible ground movement during the ground subsidence activation.

Findings. Initiation of ground movement mobilization started not from the surface but at a certain depth where the irreversible ground movement emerges. Laying and hanging wings of a geological fault became to move relatively each other over an abandoned salt mine. Dissipative structures emerged in form of abrupt intensive variation of cluster mosaic in the field of movement that follows the ground mobilization. Concord displacement of the adjacent ground clusters changes to their conflicting movement and vice versa. Such a periodical sequential shifting induces destruction of pillars and surrounding rock mass, disintegration of the fractured bodies and their asynchronous movement relatively each other and, as result, chimney subsidence initiation at the surface.

Originality. It was the first time when periodic cluster structures were registered during chimney subsidence activation. Dissipative structures manifest as shifting of irreversible torrents and rotors, which replace each other promoting progress of the irreversible ground movement and facilitating development of the chimney. Computer simulation assisted to understand complex irreversible behavior of ground during its irreversible movement triggered by change of physical properties of the ground under dampening. We proposed innovative measures for preventing development of dissipative structures.

Practical implications. The results of simulation allowed proposing effective measures, which are founded on restrictions of degree of freedom and suppress the dissipative structures development.

Keywords: rock mass, irreversible ground movement, ground destruction, simulation, FLAC3D, dissipative structures.

1. ВСТУП

Проблема зрушень земної поверхні під впливом природних та техногенних факторів неухильно посилюється у зв'язку зі збільшенням навантаження техносфери на оточуюче довкілля [1], а також зміною клімату [2]. Особливо небезпечними наслідками супроводжуються зосереджені провали земної поверхні, які погано передбачувані й відбуваються з багатьох причин, головними з яких є карстові пустоти [3], покинуті гірничі виробки неглибокого закладення, погашені вертикальні стволи шахт та копальні [4]. Зокрема масштабні наслідки провалів земної поверхні супроводжують відпрацювання вугільних підземних родовищ [5], а також металевих рудників [6].

На сьогодні розроблено ряд методів дослідження проблеми раптових провалів земної поверхні. Вивчення подібних провалів здійснюється такими сучасними технологіями як радіолокація земної поверхні [7], інструментальні спостереження за осіданнями земної поверхні [1]. Останнім часом для прогнозування небезпечних для довкілля провалів залучають методи штучного інтелекту [8]. Паралельно досліджують механізм зародження й розвитку провалів, який на сьогодні вивчений недостатньо, що обумовлено відсутністю прямого доступу до підземної частини ґрунту, який приймає участь у розвитку провалу. Саме тому у даній статті приділяється увага дослідженню такого механізму.

2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Ще у 19 столітті в околиці містечка Солотвино почався розвиток соляних розробок. На рис. 1 показаний суміщений план гірничих виробок, на якому хрестиками вказані найперші шахти мілкового закладення і жовтим – камери сучасних сольових розробок. Так само вказані зони провалів, які відбулися в міру експлуатації сольового родовища. Видно, що сам поклад має складну форму, оскільки камери характеризуються просторовим розташуванням, різною довжиною і різною орієнтацією. Так само найголовніша особливість полягає в тому, що соляні розробки у даний час почали супроводжуватися провалами.

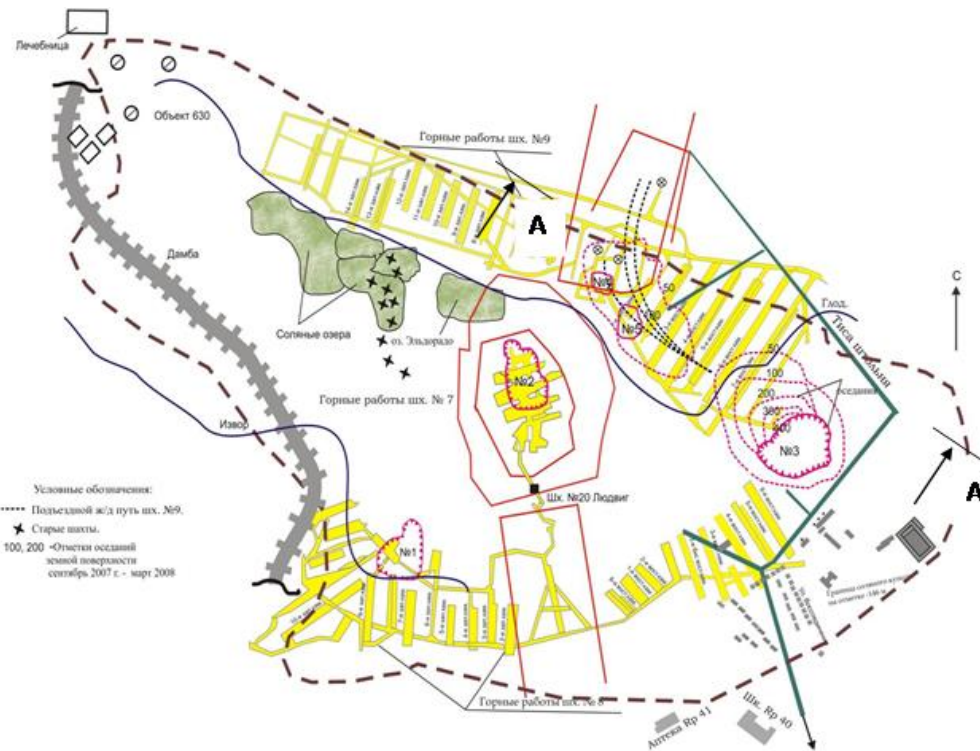


Рисунок 1. План гірничих виробок комплексу соляних шахт

Для дослідження механізму виникнення провалів проводилися комплексні методи, що включають вивчення та аналіз геологічної структури. На рис. 2 наведений геологічний вертикальний розріз шахти № 9 по перетину А–А, показаному на рис. 1. Також ведуться натурні вимірювання деформації земної поверхні за допомогою маркшейдерських інструментальних спостережень. Раніше досліджувалися фізико-механічні властивості гірських порід, що вміщують і проводився їх аналіз. Крім того досліджувалася геологічна структура підробленої і надробленої товщі і виконано математичне моделювання за допомогою чисельних методів напружено-деформованого стану порід, а також досліджена за допомогою цього методу еволюція розвитку незворотних зрушень і руйнування порід, включаючи земну поверхню.

На розрізі рис. 2 показано сольове родовище в районі відпрацювання шахти № 9. Геологічне формування родовища було досить складним і багатоетапним. Протягом пермського періоду відбувалося відкладення соляних покладів і перекриття їх вищерозташованими породами. Вони представлені шаруватими алевролітами. Процес відкладення був багатоетапним, тому саме рудне тіло, що складається з декількох шарів, перемежується досить великими шарами алевролітів (рис. 2), потужність яких досягає 20–50 м і більше. Після формування покладів відбувався багатоетапний тектогенез, у процесі якого родовище піддавалося активним тектонічним силам і масштабним переміщенням, у результаті чого горизонтальне залягання перетворилося в похиле і навіть круте.

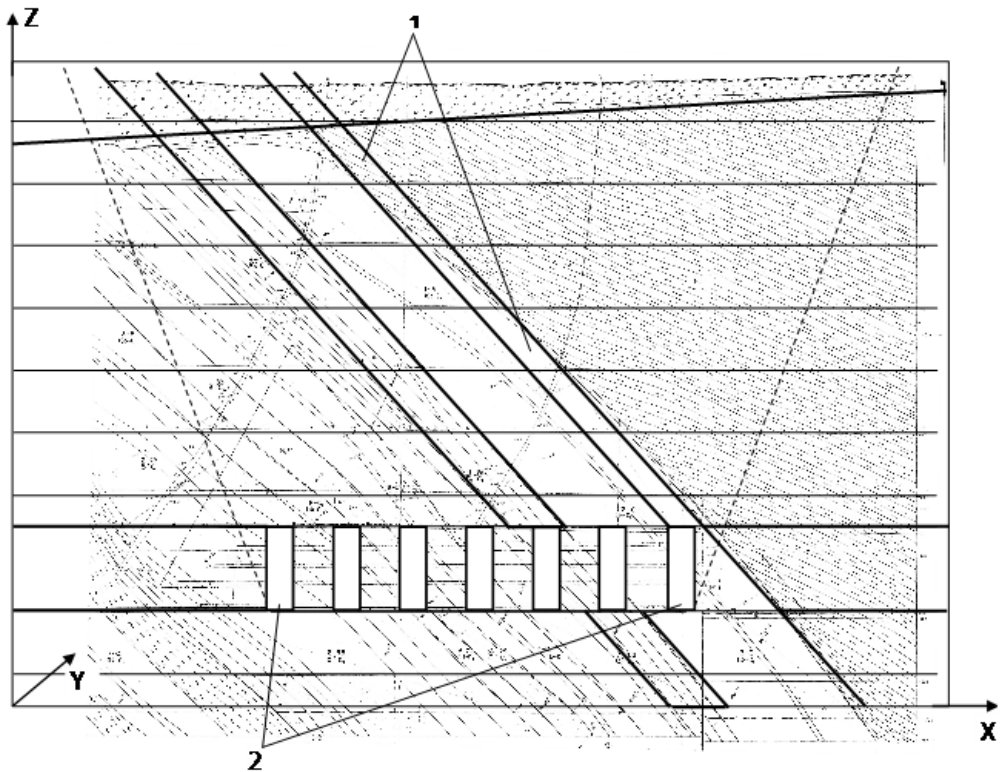


Рисунок 2. Вертикальний геологічний розріз товщі шахти № 9

На даний момент можна констатувати той факт, що сольове родовище перетворилася в соляний купол, верхня частина якого розмита, вивітрена і покрита наносами, причому кут залягання самих сольових пластів досягає 35–40 градусів. Розташування шарів солі і вищерозміщених алевролітів не зовсім узгоджене. Кут між шаруватістю алевролітів і сольових шарів досягає 30 градусів. Все це істотно ускладнює саму геологічну структуру родовища і механізм деформування масиву під дією гірничих розробок. На рис. 3 показано просторовий вид рудника, на якому видно камери. Вони з'єднані виробками вентиляційного та відкатного горизонтів, при цьому довжина камер і їх висота змінюється у кілька разів, що свідчить про складну будову самого родовища. Деформаційні властивості солі характеризуються модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона, модулем зсуву, причому ці показники збігаються з типовими показниками деформаційних властивостей для сольових покладів.

Межа міцності солі на одновісний стиск змінюється в межах 50–60 МПа, деформаційні показники верхніх алевролітів близькі до таких показників для солі, а межа міцності на одновісний стиск дещо змінюється від 40 до 55 МПа. Корінні породи, що складаються з сольового купола і алевролітів, перекриті наносами, потужність яких змінюється в межах від 20 до 60 м.

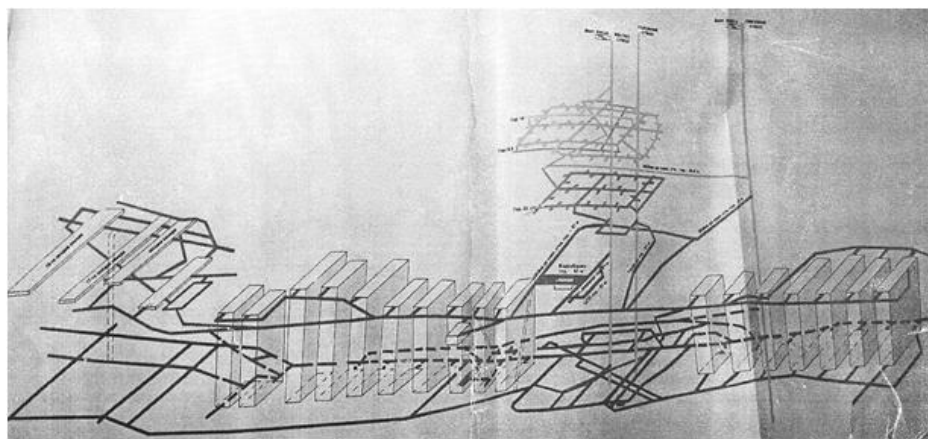


Рисунок 3. Тривимірний вид шахт № 8 і № 9

Відклади представлені піщаними суглинками, які не мають яскраво вираженої шаруватості, за властивостями ближче до ґрунтів, а їх межу міцності на одновісний стиск досить низький та не перевищує 15–20 МПа. Характерно, що коефіцієнти фільтрації в наносах істотно вище ніж у корінних породах, а також спостерігається значне підвищення коефіцієнта фільтрації уздовж контакту сольового купола і верхніх алевролітів. Ці контакти є потенційними провідниками вологи, що може негативно позначитися на стійкість всього підробленого масиву, що і буде досліджуватися в даній роботі. На рис. 4 показаний один з типових провалів земної поверхні над виробленим простором. Діаметр воронки змінюється від 50 до 150 м, а глибина 30–40 м. При цьому процес обвалення знаходиться в активній стадії і вже зачіпає житлові масиви.



Рисунок 4. Загальний вигляд одного з типових провалів земної поверхні над виробленим простором

Провали заповнені насиченим розчином солі. Ці об'єкти становлять велику екологічну небезпеку і самим негативним є те, що процес розвитку цих провалів знаходяться в активній стадії. Для складання розрахункової схеми,

яка використовувалася для дослідження процесу зрушення підробленої товщі і процесу розвитку провалів земної поверхні, на геологічному розрізі (рис. 2) були побудовані кути зрушень від крайніх камер.

Кути зрушення зображені на рисунку пунктирними лініями. В точках перетину лінії зрушення з земною поверхнею від цих точок були відкладені берми на всі боки шириною 50–100 м. Таким чином, був визначений у плані розмір розрахункової області. Він склав по осі X і Y 673 м, а по вертикалі, тобто по осі Z приймалася 509 м. Такі розміри дозволили розмістити камери шахти № 9 на досить великій відстані від бічних граней розрахункової моделі і її днища, що гарантувало достовірність і точність розрахунків напружено-деформованого стану.

На рис. 5 представлений загальний вигляд розрахункової схеми (а) і фрагмент циклів з розташованими в них камерами (б). Камери показано позицією 3 (найменша камера), позицією 1 вказано контакт соляного купола з вищерозташованими аргилітами. Так само вказаний розріз А–А, у межах якого в основному розглядалися всі розподіли напружень і деформацій, силових і деформаційних характеристик розрахункової області.

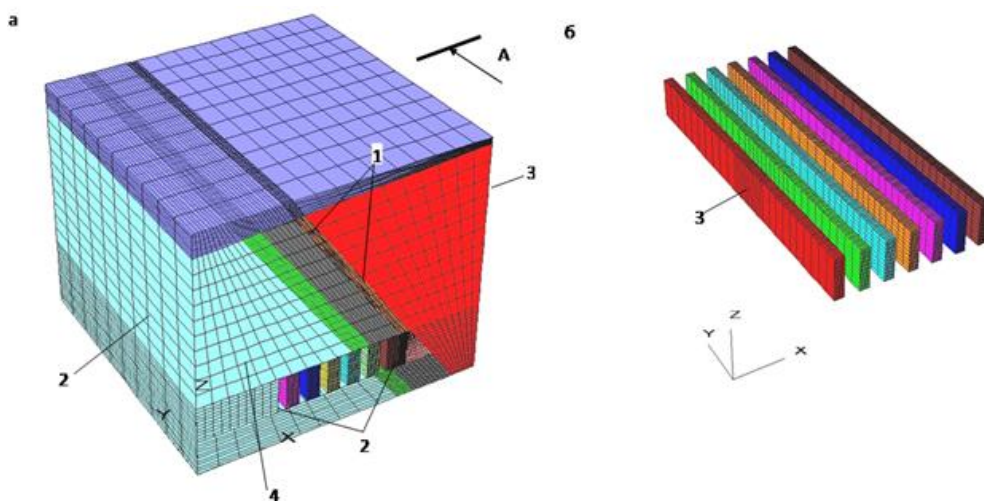


Рисунок 5. Розрахункова схема (а) та фрагмент циклів з розташованими у них камерами (б)

Граничні умови дотримувалися таким чином, при яких бічні межі моделі 2 і 4 вдовж осі X встановлювалися так, щоб унеможливити зсув уздовж осі X . Бічні границі, які були перпендикулярні осі Y , також обмежувалися з таким розрахунком, щоб заборонити зміщення уздовж осі Y . Переміщення днища моделі заборонялись у всіх напрямках. Массив навантажувався власною вагою порід, що вміщують. Крайні камери показано позицією 2 на рис. 5. На рис. 6 показані всі камери, які були відпрацьовані починаючи з 1968 року по теперішній час, при цьому налічується 7 камер ширина яких складає 20 м, а довжина змінюється від 109 до 335 м.

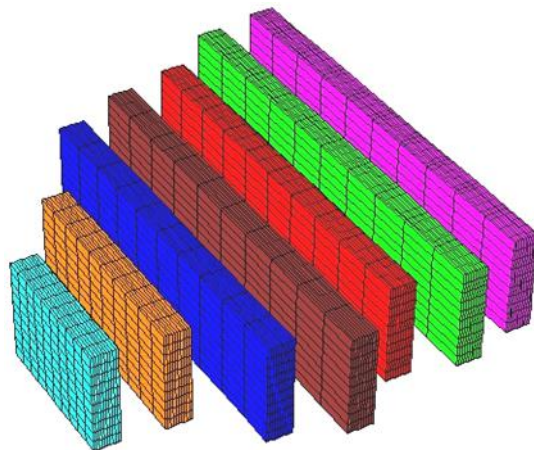


Рисунок 6. Фрагмент відпрацьованих камер на шахті № 9

3. МЕТОДИКА АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДРОБЛЕНОЇ ТОВЩИ

Метод моделювання вибирався з урахуванням наступних важливих обставин. По-перше, необхідно було вибрати такий метод, який зміг би врахувати складну геологічну будову родовища. Складність полягає не тільки в тому, що товща шарувата, але і в тому, що форма шарів вигнута, куполоподібна, похила, а залягання шарів неузгоджене. Так, шаруватість алевроліту, що накриває купол, відрізняється на 30 градусів від шаруватості сольових відкладень. Наявність наносів має важливу роль, оскільки провали на земній поверхні реалізуються, перш за все, в наносах.

Необхідно було також врахувати не тільки пружний розподіл напружень і деформацій, а й позамежне деформування порід, починаючи від пластичних і закінчуючи необоротними деформаціями, тобто їх руйнуванням. Крім того, потрібно було врахувати ослаблення масиву на контактах сольового купола і прилеглих порід через розмокання, яке відбувалося протягом останніх років через витіки і проривів каналізації в м. Солотвино і дренавання цих вод у покинуті або експлуатовані гірничі виробки шахти № 9.

Для того щоб врахувати всі ці процеси, необхідно було вибрати таку модель, яка приймала б до уваги не тільки позамежне деформування вміщувачих порід, їх анізотропію, різні кути нахилу, але і враховувала час розвитку процесу, який почався у минулому столітті і продовжує розвиватися на поточний момент. Таким чином, важливо було врахувати, що розрахункова область не знаходиться в стані статичної рівноваги, а перебуває у стані активних зрушень. Для рішення такої задачі традиційні широко використовувані методи граничних кінцевих елементів не підходять.

Закон Ньютона є найбільш прийнятною теоретичною моделлю на основі якої можна вирішити задачу дослідження нерівноважного процесу зародження провалу земної поверхні. На цьому законі засновані сучасні методи механіки суцільного середовища, які розвиваються за кордоном та отримують останнім часом застосування в Україні [9]. Цей метод вперше запропоновано П. Кундалом, що дозволило розширити можливості чисельних мето-

дів і уникнути проблем збіжності рішення до стану статичної рівноваги. Це має принципово важливе значення, оскільки процес незворотних зрушень масиву гірських порід підпорядковується кінетичній теорії міцності і протікає у часі. При відпрацюванні родовищ у складних гірничо-геологічних умовах у переважній більшості випадків процес зрушень порід не закінчується навіть після погашення шахти або рудника, у зв'язку з чим рішення задач статичної рівноваги взагалі втрачає практичний сенс.

На підставі такого підходу групою проф. Кундала запропоновано новий алгоритм розв'язання задач механіки руйнування гірських порід, заснований на послідовному рішенні диференціальних рівнянь руху і рівняння зв'язку напружень і деформацій гірських порід, які залежать від вибраної теорії міцності.

Диференціальні рівняння руху масиву гірських порід мають вигляд

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt},$$

де σ_{ij} – нормальні i дотичні напруження, що діють в масиві гірських порід, Па; x_i – координати декартової системи, м; ρ – щільність гірських порід, кг/м³, b_i – питомі сили, що розвиваються в масиві гірських порід, і приводяться до одиниці його маси, Н/кг, v_i – швидкість руху елементарних об'єктів масиву гірських порід, м/с, t – час, с.

Якщо права частина дорівнює нулю (з точністю до похибки чисельних обчислень), настає статична рівновага масиву гірських порід. Інакше породи знаходяться в стані активних зрушень.

Система диференціальних рівнянь вирішується чисельним методом кінцевих різниць в середовищі пакету FLAC3D. При вирішенні диференціальних рівнянь використовується сучасна модель міцності гірських порід, заснована на теорії Кулона-Мора. При цьому враховується процес дилатансії порід після руйнування і залежність величини разущільнення від середнього рівня стиснення. Таким чином, обрана схема дозволяє врахувати всі основні параметри моделі, яка досліджується, а також головні риси поведінки масиву, включаючи й його позамежне деформування. Це дозволить отримати досить точні результати і на підставі їх зробити достовірні висновки про причини провалів і механізми їх розвитку. Це є основою для здійснення прогнозу розвитку провалів земної поверхні.

4. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НЕОБОРОТНИХ ЗРУШЕНЬ ТОВЩИ НАВКОЛО ШАХТИ № 9

Процес зрушення моделювався у кілька етапів. На першому етапі здійснювався розрахунок напружено-деформованого стану незайманого масиву без наявності виробок, зокрема камер. Для цього масив навантажувалася власною вагою, прикладалися граничні умови і розрахунок згідно з описаним вище алгоритмом проводився у вигляді циклічного перерахунку напружень і деформацій з урахуванням другого закону Ньютона. Розрахунок закінчував-

ся тоді, коли максимальна нев'язка сил у сусідніх розрахункових зонах не перевищувала допустимий рівень. В даному випадку відносна нев'язка повинні була бути менше 1/100000. Після досягнення такої нев'язки масив знаходився практично в стані статичної рівноваги, і тільки після цього здійснювалася виїмка камер. Процес руйнування моделювався шляхом поступового зменшення зчеплення і кута внутрішнього тертя на контактні соляного купола з вищерозташованими алевролітами під дією фільтрації води з земної поверхні вглиб масиву. Висота камер становила 73 м, відстань між камерами (ширина міжкамерних ціликів) становив 35 м, ширина самих камер становила 20 м.

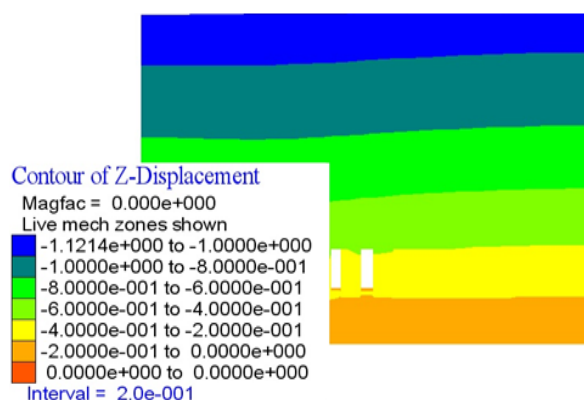


Рисунок 7. Розподіл вертикальних реліктових осідань масиву під дією власної ваги

На рис. 7 наведено розподіл вертикальних зрушень всієї розрахункової схеми. Розподіл зрушень характеризується приблизно паралельними ізолініями, на дніщі моделі зрушення відсутні, а всі зрушення мають негативний знак, тобто відбуваються проти осі Z, оскільки вони викликані дією гравітації. Реліктові осідання поверхні, які відбулися за весь термін формування родовища, складають 1,12 м.

Таким чином видно, що досягнуто рівновагу і початковий напружено-деформований стан відповідає загальноновизнаним уявленням про вихідний стан масиву до ведення гірничих робіт.

Оскільки розрахункова область була тривимірною, для аналізу доцільно було виділити якийсь типовий розтин. Цей перетин виділявся через середину вздовж камер перерізу А–А. Тому надалі весь аналіз здійснювався на прикладі розподілу напружень і деформацій на цьому перерізі.

На рис. 8 показано розподіл вертикальних зрушень у масиві гірських порід (а), а також зон розуцільнення і стиску (б). По фрагменту (б) рисунок 8 можна зробити однозначний висновок про те, що процес руйнування починається не з земної поверхні, а відбувається на глибині 250 м. Процес руйнування супроводжується природним розуцільненням порід на контактні соляного купола і верхніх алевролітів. При цьому зона руйнування має витягнуту форму розмірами 150–200 м і витягнута вздовж контакту соляного купола з алевролітами.

В результаті цього руйнування висяче крило (позиція 1) здійснює осідання, а лежаче крило (позиція 2) навпаки, рухається вгору, що видно на фрагменті (а) рис. 8.

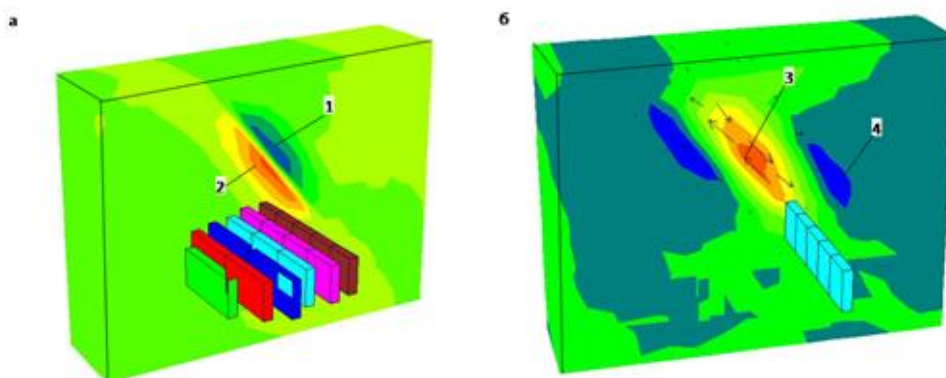


Рисунок 8. Розподіл вертикальних зрушень (а) і об'ємних деформацій (б) на початковій стадії руйнування масиву гірських порід

На фрагменті (б) це підтверджується векторами швидкості зрушень. По стрілках видно, що висяче крило рухається вниз і вправо, а лежаче крило переміщається вгору і вліво. Позицією 3 вказана зона максимального розуцільнення, а позицією 4 виділені зони стиснення. Вони відстоять від межі контакту соляного купола з алевролітами на відстані 100 м, причому зона максимального стиснення у висячому крилі розташована нижче ніж зона руйнування і розуцільнення на контакті, а зона стиснення в лежачому крилі розташована трохи вище.

На рис. 9 видно, що у міру розвитку й активізації процесу зрушень зона максимуму осідань поступово переміщається вгору і виходить на земну поверхню (позиція 1 рис. 8, а). При цьому поступово на земній поверхні починає формуватися мульда осідань. Зона 2 осідань розширюється в основному вниз в сторону відпрацьованих камер. На цьому фрагменті сама права камера показана на суміщеному розрізі. Важливо, що процес розвитку руйнувань, який показаний на рис. 8, б супроводжується збільшенням розуцільнення на контакті соляного купола з алевролітами (позиція 3). Весь масив поділяється на кластери або, іншими словами, зони в яких породи рухаються в якомусь переважному напрямку. Зокрема наноси формуються в кластер (позиція 4) та тенденція їх зміщення виражається в осіданнях. Кластер (позиція 3) об'єднує породи висячого крила і породи, що примикають до контакту соляного купола з алевролітами і рух цього кластера спрямовано вниз. Породи кластера (позиція 5) утворюють основний масив висячого крила. Ці породи зміщуються вниз і в бік від контакту соляного купола з алевролітами. Кластер (позиція 6) об'єднує породи лежачого боку, які мають тенденцію рухатися в бік від контакту по нормалі площини цього контакту. Кластер (позиція 7) об'єднує породи на контакті поточин камер з вищерозміщеним масивом. Ці породи відчувають незначне, але стійке підняття. Точно так піднімаються породи ґрунту на контакті підшов камер з підстилаючим

масивом. Вони утворюють кластер 8.

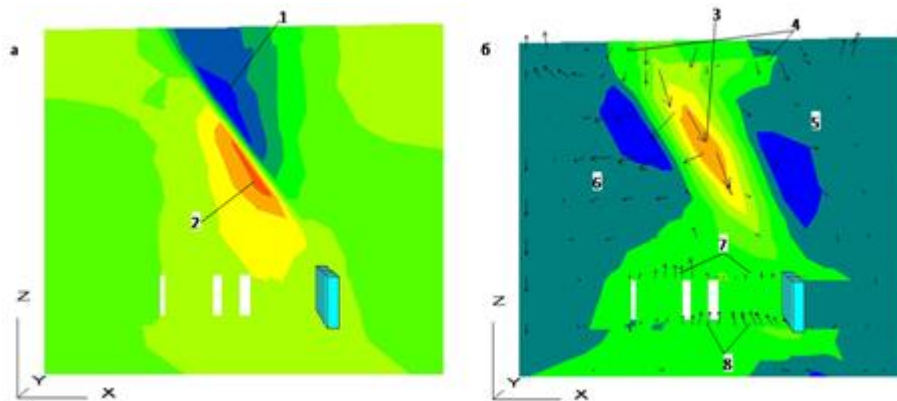


Рисунок 9. Розвиток процесу осідань (а) і руйнування масиву (б) по мірі обводнення контакту між сольовим куполом і покриваючими породами

Таким чином, товща поділяється на цілу групу кластерів, які мають різні напрямки переважного переміщення. Ця сукупність кластерів формує складну суперечливу дисипативну структуру у вигляді кластерної мозаїки активних зрушень масиву гірських порід. Ймовірно, що ця мозаїка є ключовим моментом, який може пояснити складний механізм зародження і розвитку провалів земної поверхні.

На рис. 10 показаний розподіл дотичних деформацій в околі міжкамерного цілика. Видно, що в покрівлі і ґрунті діють максимальні дотичні напруження, причому їх знаки протилежні. Так, покрівлі порід ґрунту зазнають деформації проти годинникової стрілки, а в ґрунті – за годинниковою стрілкою. Ці граничні дотичні деформації повинні зіграти негативну роль всієї системи камери-цілика в цілому.

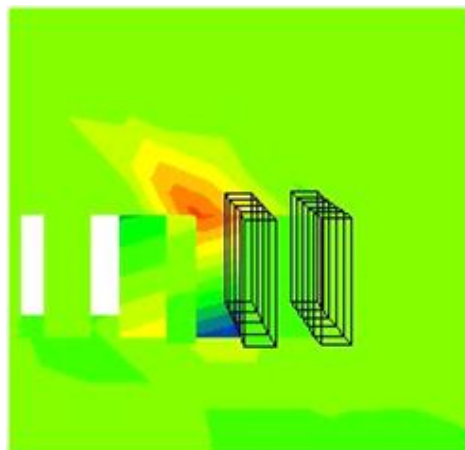


Рисунок 10. Розподіл дотичних деформацій

На рис. 11, а показана подальша еволюція процесу зрушення і руйнування, що характеризується, насамперед, тим, що величини осідань всього

крила неухильно зростають. На 3862 циклі розрахунку максимальні осідання досягають 17,6 мм. Слід підкреслити, що максимальні осідання здійснює висяче крило на контакті соляного купола з алевролітами. Ця область відзначена позицією 1. Область має підняття, розташована в лежачому крилі на контакті соляного купола, і незважаючи на те, що величина підняття становить не більше 8,7 мм саме підняття охоплює велику область і виражено закономірно. Аналіз фрагмента (б) на рис. 11 показує, що по мірі розвитку процесу зрушення на контакті соляного купола з алевролітами під дією обводнення цього контакту відбувається не тільки розширення області розушільнення (позиція 3) в околі контакту, але і відокремлення наносів від корінних порід. Контакт наносів з корінними породами позначений позицією 4 і незважаючи на те, що породи в області контакту зазнають в цілому осідання, абсолютно очевидний розрив розподілу зон розушільнення та об'ємного стиснення по лінії контакту. Очевидно, що цей поділ відбувається під дією дотичних напружень. Такий поділ наносів і корінних порід є подальшим передоднем утворення провалу на земній поверхні.

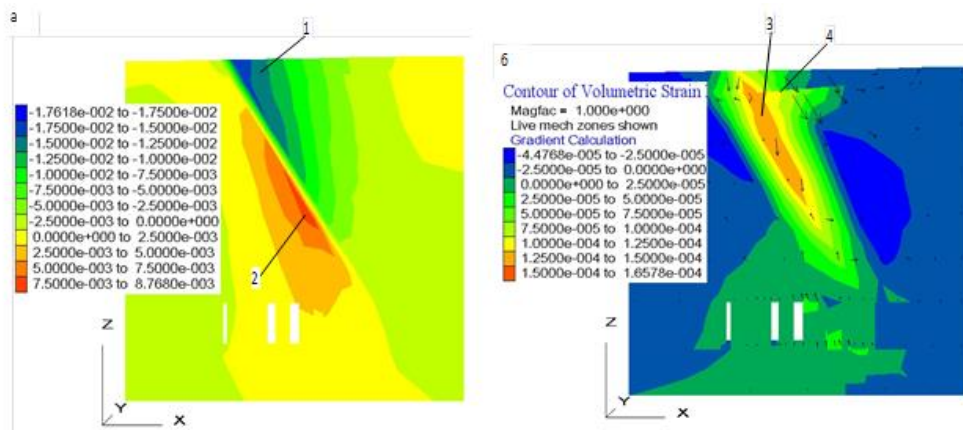


Рис. 11. Розвиток осідань товщі (а) та її об'ємних деформацій (б)

На рис. 12 аналізується подальший розвиток зони руйнування, розушільнення та стиснення і динаміка розподілу векторів швидкостей зрушення. Кластерна динаміка досить рухлива і мінлива. Так, наноси в області висячого крила на контакті з соляним куполом відчують в якійсь мірі підняття. Породи рухаються вгору і в бік контакту. Нижче наносів, корінні породи продовжують осідати вниз. У лежачому крилі контакту навпаки, корінні породи зазнають підняття і зрушення від контакту, а наноси здійснюють осідання, з тенденцією відходу від контакту. Про це можна судити по векторах швидкостей зрушень, і це підтверджує швидко мінливість самої кластерної мозаїки зрушень. В цілому намітилася загальна тенденція осідання висячого крила ковзанням вниз і вправо вздовж контакту сольового купола та алевролітів і деяке підняття лежачого крила вгору і в бік від контакту. Така тенденція зіграє негативну роль, оскільки на самому контакті спостерігається різноспрямований рух, що відрізняється на 180 градусів. Цей характер зрушень сильно послаблює сам контакт і сприяє подальшому збільшенню проникно-

сті порід уздовж цього контакту. У зв'язку з цим у процесі моделювання було задано поступове зменшення зчеплення і кута внутрішнього тертя порід на контакті купола з вищерозташованими алевролітами. Це зменшення сприяло подальшому розвитку процесу необоротних зрушень і руйнувань земної поверхні.

Аналіз подальшого розвитку процесу необоротних зрушень підкреслює динамічність мозаїки та її різку зміну в міру розвитку й активізації процесу зрушень. Так між циклами 4182 й 4320 знову відбувається зміна розподілу векторів кластерів, що примикають до контакту лежачого й висячого крил. При цьому більш віддалені породи від контакту практично не переміщуються.

На рис. 13 представлений новий етап зрушень, який полягає в тому що вперше спостерігається поділ зони руйнувань і максимального розуцільнення порід на контакті: одна зона розташована безпосередньо в наносах (позиція 1), а друга зона поширюється нижче (позиція 2). Крім цього виникає зона (позиція 3), яка утворює кластер, що рухається в лежачому боці від межі зони контакту соляного купола з алевролітами.

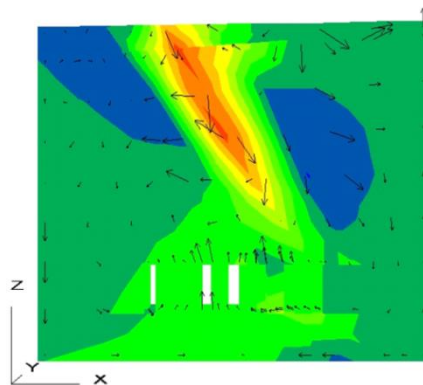


Рисунок 12. Розподіл зон розуцільнення й стиску суміщене з полем швидкостей зрушень

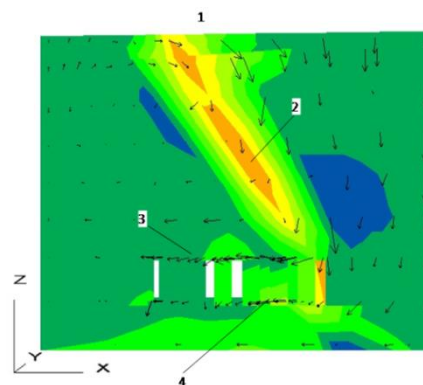


Рисунок 13. Момент виникнення глобального роторного кластеру на 4422 циклі

Усі вказані кластери мають тенденцію об'єднання у глобальний ротор, який тепер узгоджує східний рух усієї товщі на контакті лежачого й висячого крил. Навіть підшва камер (область 4) залучається до глобального роторного кластеру, тобто можна помітити, що відбуваються зміщення всього горизонту в цілому, в межах якого пройдені камери, від контакту соляного купола з вищерозташованими породами. Це зміщення також послаблює сам масив і буде сприяти руйнуванню міжкамерних ціликів. Це підтверджується тим, що видно руйнування, віджимання і розущільнення крайової стінки незайманого масиву який примикає до крайньої правої камери, що знаходиться під контактом соляного купола з вищерозташованими алевролітами.

Подальший розвиток осідання земної поверхні на 9,4 см відбувається на 4900 циклі. Відмічається подальше відшарування наносів й їх неузгоджений рух щодо корінних порід. Видно, що поряд з усталеними кластерними структурами, такими як відшарування покрівлі і ґрунту камер від основного масиву і ціликів, прилеглих до них, починає проглядатися вихровий рух усієї товщі. Причому, для утворення цього вихору порід висячого боку довелося поміняти напрям, який був орієнтований спочатку вниз і вправо, на напрям вниз і вліво, тобто у бік контакту. Точно також поміняли напрям породи лежачого крила, а саме породи прилегли до наносів землі і самі наноси стали зміщуватися вгору і вправо до контакту, в той час як вони в основному зміщувалися в сторону від контакту. У результаті цих радикальних змін утворюється глобальна вихрова кластерна структура. Ця структура характеризує подальшу еволюцію процесу необоротних зрушень і є підготовчою сходинкою для утворення провалів земної поверхні.

Одночасно з цим дотичні напруження на крайових ділянках міжкамерних ціликів досягають досить великих величин до 5,9–6,4 МПа. Концентрація напружень у міжкамерних ціликах зростає, а над камерами розширюється зона розвантаження.

На рис. 14 показано тривимірний розподіл осідань земної поверхні, за якими слідував провал.

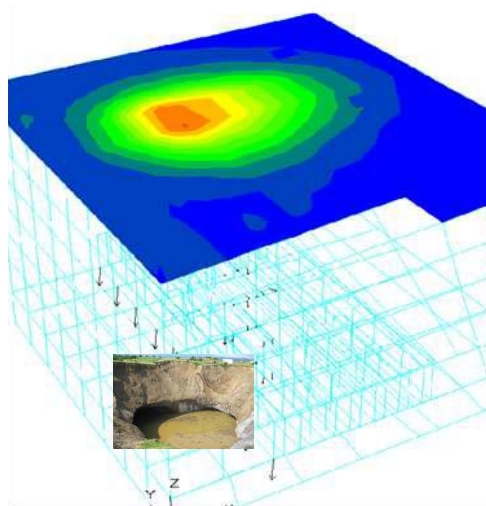


Рисунок 14. Зародження провалу земної поверхні

5. ОБГОВОРЕННЯ

Гірський масив, що оточує соляні шахти є відкритою термодинамічною системою, яка пропускає через себе потік енергії гірського тиску а також певні флюїди. Такий процес згідно [10] може породжувати дисипативні структури, що сприяють ефективному розсіянню енергії гірського тиску й перетворення її у роботу пластичних деформацій й необоротних зрушень гірського масиву. У даному випадку дисипативні структури мають вигляд (паттерн) кластерів або окремих областей масиву у межах яких напрямки швидкостей зрушень товщі узгоджений а рух синхронізований. Характерною особливістю є часта зміна паттернів дисипативних структур й їх взаємна перебудова. Еволюція дисипативних структур відбувається за рахунок накопичення ступенів вільності. В основному це накопичення здійснювалось розведенням лежачого й висячого крил геологічної структури. У процесі еволюції вказаних дисипативних структур накопичується пошкодженість масиву завдяки багатократному реверсу необоротних зрушень суміжних крил й втрати контакту між наносами й корінними породами.

Таким чином необхідно планувати експлуатацію родовища таким чином, щоб уникнути можливості накопичення ступенів вільності окремих кластерів, що складають масив гірських порід. Ефект такого обмеження можна досягти у масштабі всього рудника продуманим плануванням очисних робіт у часі і просторі. Зокрема видобувні камери доцільно було орієнтувати довгими осями перпендикулярно до лінії простягання контакту лежачого й висячого крил геологічної структури, а не паралельно, як було реалізовано у практиці розвитку підземних робіт.

Додатково недопустимо занедбання міської системи водопостачання, що сприяло зменшенню міцносних характеристик гірського масиву уздовж контакту. Місцева влада мала бути інформована про можливі наслідки і ризики, пов'язані з утічками стокових вод у зону контакту.

6. ВИСНОВКИ

1. Сольове родовище, яке відпрацьовується шахтою №9, характеризується складними геологічними і горнотехнічними умовами. Гірничо-геологічні умови ускладнюються наступними факторами: Шаруватість, круто-похиле падіння шарів, чергування шарів солі і порід, неузгоджена шаруватість у верхніх породах і соляному куполі, різні деформаційні і міцнісні характеристики, неузгоджене залягання корінних порід і наносів, складна конфігурація і різні розміри вироблених просторів і камер, тривимірне компонування гірничих робіт.

2. Для моделювання такої складної геомеханічної системи був обґрунтований і обраний метод кінцевих різниць, який заснований на розв'язанні диференціальних рівнянь, що описують другий закон Ньютона, де час процесу виражено прямо. Ця модель дозволяє врахувати всі основні особливості даної задачі, а саме: шаруватість, крутий нахил залягання, неузгодженість залягання сольових і вм'яючих порід, час процесу, тривимірність розподілу

напружень і коректний облік початкового стану системи по мірі розвитку гірничих робіт.

3. Руйнування масиву під дією обводнення і дренажу фільтрації вод по контакту соляного купола з покривними породами починається в глибині масиву 250 м від земної поверхні. Це руйнування проявляється у реверсному русі висячого крила порід і лежачого. При цьому породи висячого крила мають тенденцію зміщуватися вниз, а лежачого – вгору.

4. По мірі розвитку процесу активних зрушень зона максимальних осідань піднімається в бік земної поверхні і в підсумку утворює мульду осідань. Розвиток процесу зрушень підробленої товщі супроводжується поділом масиву на кластери, які являють собою цілі блоки масиву гірських порід, які рухаються в переважаючому напрямку, причому ці напрями руху різні. В околиці міжкамерних ціликів по мірі розвитку зрушень збільшується концентрація дотичних напружень.

5. Процес розвитку зрушень товщі супроводжується розшаруванням контакту наносів з корінними породами, причому це розшарування протікає під дією дотичних протилежних рухів. Одночасно уздовж контакту лежачого й висячого крил геологічної структури збільшується дренажування стічних вод, що зменшує зчеплення порід й сприяє подальшій активізації різнонаправленого зрушення крил.

6. Формування розвитку процесу зрушень набуває обрису, основна тенденція якого полягає у тому що висяче крило масиву вище контакту соляного купола з алевролітами рухається вниз і вправо (від контакту) а лежаче – вгору і вліво (від контакту). При збільшенні деформацій і руйнування порід навколо контакту відбувається його розуцільнення. По мірі розвитку процесу зрушень збільшуються розшарування порід на контактні поточини і підшов камер з навколишнім масивом. Це сприяє зниженню стійкості міжкамерних ціликів, а значить провокує подальший розвиток активізації зрушень, яке у підсумку прискорює процес провалу земної поверхні.

7. Найбільш динамічною структурою у процесі розвитку зрушень є кластерна структура векторів швидкості необоротних зрушень масиву гірських порід, яка змінюється не тільки по величині, але і по напрямку. Сама кластерна мозаїка змінюється досить часто. При цьому періодично виникають специфічні кластерні структури, зокрема вихрові, коли неузгоджений рух окремих кластерів організовується так, що їх рух утворює вихрову (роторну) узгоджену структуру. Така динаміка кластерних зрушень є процесом підготовки провалу земної поверхні.

8. Кластерна динаміка зрушень супроводжується періодичною фрагментацією зон максимальних деформацій. Так якщо на початковій стадії зрушень зона максимальних розуцільнень була зосереджена в одному місці, то після розвитку процесу зрушень вона розпадається на дві області, одна з них прилягає до наносів земної поверхні, а друга розташована у глибинній частині масиву.

9. Зміна величини й напрямку векторів швидкості зрушень товщі, а також перебудова границь кластерів відображає складну еволюцію дисипативних структур, які дозволяють інтенсивно розсіювати пружну енергію гірського тиску у пластичну роботу необоротних зрушень масиву навколо контакту

висячого й лежачого крил геологічної структури. Вказані дисипативні структури сприяють накопиченню пошкодженості масиву, й підготовці зосередженого провалу земної поверхні над виходом контакту лежачого й висячого крил геологічної структури.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Karfakis, M. G. (1986). Chimney Subsidence – A Case Study. (University of Wyoming) Document IDARMA-86-0275The 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 23-25 June, Tuscaloosa, Alabama.
2. Linares, R., Roqué, C., Gutiérrez, F., Zarroca, M., Fabregat, I. (2017). The impact of droughts and climate change on sinkhole occurrence. A case study from the evaporite karst of the Fluvia Valley, NE Spain. *Science of The Total Environment*, 579, 345–358.
3. Gutiérrez, F., Fabregat, I., Roqué, C., Carbonel, D. & Sevil, J. (2019). Sinkholes in hypogene versus epigene karst systems, illustrated with the hypogene gypsum karst of the Sant Miquel de Campmajor Valley, NE Spain. *Geomorphology*, 328, 57–78.
4. Sahu, P., Lokhande, R.D. (2015). An Investigation of Sinkhole Subsidence and its Preventive Measures in Underground Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 63–75.
5. Salmi, E.F., Karakus, M., Nazem, M. (2019). Assessing the effects of rock mass gradual deterioration on the long-term stability of abandoned mine workings and the mechanisms of post-mining subsidence – A case study of Castle Fields mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 169–185.
6. Xia, K., Chen, C., Zheng, Y., Zhang, H., Yang, K. (2019). Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China. *Engineering Geology*, 249, 129–147.
7. Kim, J.-W., Lu, Z., & Kaufmann, J. (2019). Evolution of sinkholes over Wink, Texas, observed by high-resolution optical and SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 222, 119–132
8. Galve, J.P., Remondo, J. & Gutiérrez, F. (2011). Improving sinkhole hazard models incorporating magnitude–frequency relationships and nearest neighbor analysis. *Geomorphology*, 134(1–2), 157–170.
9. FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, (2015). *Itasca*. 213p.
10. Kondepudi, D., & Prigogin, I. (2015). Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. *Second edition. John Wiley & Sons*, XXVI, 524.

REFERENCES

1. Karfakis, M. G. (1986). Chimney Subsidence – A Case Study. (University of Wyoming) Document IDARMA-86-0275The 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 23-25 June, Tuscaloosa, Alabama.
2. Linares, R., Roqué, C., Gutiérrez, F., Zarroca, M., Fabregat, I. (2017). The impact of droughts and climate change on sinkhole occurrence. A case study from the evaporite karst of the Fluvia Valley, NE Spain. *Science of The Total Environment*, 579, 345–358.
3. Gutiérrez, F., Fabregat, I., Roqué, C., Carbonel, D. & Sevil, J. (2019). Sinkholes in hypogene versus epigene karst systems, illustrated with the hypogene gypsum karst of the Sant Miquel de Campmajor Valley, NE Spain. *Geomorphology*, 328, 57–78.
4. Sahu, P., Lokhande, R.D. (2015). An Investigation of Sinkhole Subsidence and its Preventive Measures in Underground Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 63–75.

5. Salmi, E.F., Karakus, M., Nazem, M. (2019). Assessing the effects of rock mass gradual deterioration on the long-term stability of abandoned mine workings and the mechanisms of post-mining subsidence – A case study of Castle Fields mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 169–185.

6. Xia, K., Chen, C., Zheng, Y., Zhang, H., Yang, K. (2019). Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China. *Engineering Geology*, 249, 129–147.

7. Kim, J.-W., Lu, Z., & Kaufmann, J. (2019). Evolution of sinkholes over Wink, Texas, observed by high-resolution optical and SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 222, 119–132

8. Galve, J.P., Remondo, J. & Gutiérrez, F. (2011). Improving sinkhole hazard models incorporating magnitude–frequency relationships and nearest neighbor analysis. *Geomorphology*, 134(1–2), 157–170.

9. FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, (2015). *Itasca*. 213p.

10. Kondepudi, D., & Prigogin, I. (2015). Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. *Second edition. John Wiley & Sons*, XXVI, 524.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Дослідження зрушень гірського масиву навколо покинутої солевидобувної шахти. Ідентифікація дисипативних структур під час провалів земної поверхні.

Методи. FLAC3D програмний пакет був застосований для моделювання перерозподілу напружень і деформацій під час необоротних зрушень масиву під час його активізації.

Результати. Виконані дослідження дозволили встановити суттєві особливості розвитку та активізації зрушень масиву навколо соляних шахт під дією обводнення контакту соляного купола з вищерозташованими породами. Головна особливість полягає в тому, що процес зародження руйнування протікає не від земної поверхні, а починається в глибині масиву, потім він виходить на земну поверхню. Сам процес активізації супроводжується різкою швидкою еволюцією, видозміною кластерної мозаїки, яка змінює свою поведінку від неузгодженого до узгодженого і навпаки. Тобто відбувається періодична зміна характеру кластерної мозаїки, при якому кластери поведуться як неузгоджено так і злагоджено. Саме цей механізм сприяє, по-перше руйнуванню, по-друге поділу масиву на окремі складові, по-третє протилежному руху цих складових стосовно один одного, і по-четверте зародження і розвитку провалів земної поверхні.

Новизна. Вперше були зафіксовані дисипативні структури під час зародження провалу земної поверхні над підземними виробками соляної шати. Паттерни дисипативних структур проявляються у вигляді потоків, вихорів й кластерів у межах яких спостерігається злагоджені зрушення гірського масиву.

Практичні результати. Для придушення дисипативних структур запропоновано обмежити степені вільності необоротним зрушенням масиву гірських порід. Зокрема поздовжні осі камер рекомендовано орієнтувати перпендикулярно простяганню площині послаблення масиву.

Ключові слова: гірський масив, необоротні зрушення, руйнування, моделювання, FLAC3D, дисипативні структури

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Исследование сдвигов горного массива вокруг заброшенной соледобывающей шахты. Идентификация диссипативных структур во время провалов земной поверхности.

Методы. Программный пакет FLAC3D был применен для моделирования перераспределения напряжений и деформаций при необратимых сдвигах массива во время его активизации.

Результаты. Выполненные исследования позволили установить существенные особенности развития и активизации сдвигов массива вокруг соляных шахт под действием обводнения контакта соляного купола с вышележащими породами. Главная особенность заключается в том, что процесс зарождения разрушения протекает не от земной поверхности, а начинается в глубине массива, затем он выходит на земную поверхность. Сам процесс активизации сопровождается резкой быстрой эволюцией, видоизменением кластерной мозаики, которая меняет свое поведение от несогласованного с согласованным и наоборот. То есть происходит периодическая смена характера кластерной мозаики, при котором кластеры ведут себя как несогласовано так и согласовано. Именно этот механизм способствует, во-первых, разрушению, во-вторых, разделению массива на отдельные составляющие, в-третьих, противоположному движению этих составляющих относительно друг друга, и в-четвертых, зарождению и развитию провалов земной поверхности.

Новизна. Впервые были зафиксированы диссипативные структуры в период зарождения провала земной поверхности над подземными выработками соляной шахты. Паттерны диссипативных структур проявляются в виде потоков, вихрей и кластеров в пределах которых наблюдается слаженные сдвиги горного массива.

Практические результаты. Для подавления диссипативных структур предложено ограничить степени свободы необратимыми сдвигами массива горных пород. В частности, продольные оси камер рекомендуется ориентировать перпендикулярно простиранию плоскости ослабления массива.

Ключевые слова: горный массив, необратимые сдвиги, разрушения, моделирование, FLAC3D, диссипативные структуры

ABOUT AUTHORS

Zakharova Ludmila, Doctor of Technical Science, Senior Researcher, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: mila2017ma@gmail.com

Chesnokova Oksana, Candidate of Technical Science, Researcher, Department of Physics of Coal and Rock, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: chesnokova0507@gmail.com

Nazimko Viktor, Doctor of Technical Science, Professor, Chief Research Fellow, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: victor.nazimko@gmail.com

Pidgurnaya Olga, Graduate student, Donetsk National Technical University, 2 Shibanova Square, Pokrovsk, Ukraine, 85300.