

flow formation at the crossroads and the local model of transport flow formation before the crossroads. Another connection between the local model of transport flow formation at the crossroads and the local model of transport flow formation before the crossroads is proposed, to be realized by comparing the result of integration of the intensity of transport flow through the crossroad and the number of cars before the crossroad at the different moments of the period of traffic light cycle.

The originality lies in the use in the model of formation of transport flows of a set of simple local models to describe individual transport processes with the justification of the set of connections between them based on the theory of systems.

Practical implications. The results of investigations will be used for the creation of the model, that is described the processes of formation of transport flows in city with the aim of their analysis and investigation.

Keywords: *simulation, transport flows in the city, local computer model, theory of systems*

УДК 622.831

© А.М. Гайдін

ПРОВАЛИ

© А. Gaidin

COLLAPSES

Мета. Встановлення зв'язку між руйнуванням підземних порожнин і утворенням провалів земної поверхні з метою прогнозування їх величини і форми. Докладний огляд усіх стадій розвитку провалів, а також різних фізичних та геологічних умов, які цьому розвитку сприяють. Розробка комплексного підходу до вирішення задачі прогнозування деформацій земної поверхні над підземними порожнинами. На основі оцінки ситуації та її змін, застосувати розроблений нами підхід на практиці.

Методика дослідження полягає у спостереженні за деформаціями виробок аварійних соляних шахт, провалів земної поверхні поряд з їх фізичним моделюванням. Обстеження гірничих виробок і карстових провалів на земній поверхні, гідро-хімічні опробування шахтних вод. Спостереження за зміною рівня води в стволах шахти, що затоплюється.

Результати дослідження. Розглянуто деякі типові схеми, які виявляють зв'язок між руйнуванням підземних порожнин та провалами земної поверхні. В якості прикладу описаний провал над видобувними камерами Стебницького рудника на Львівщині. Встановлені усі необхідні умови, за яких можливі провали земної поверхні та надано наочний огляд стадій розвитку провалів. Розроблено комплексний підхід до вирішення задачі прогнозування деформацій земної поверхні.

Наукова новизна. Вперше виявляється зв'язок між розміром і формою провалів земної поверхні та об'ємом підземних порожнин. Встановлена причина того, чому утворення провалу не супроводжується суттєвим землетрусом. Запропоновані формули для визна-

чення розмірів провалів, залежно від об'єму підземних пустот, глибини їх залягання та властивостей порід.

Практичне значення. Результати досліджень можуть бути використані для прогнозування розташування та розміру руйнувань земної поверхні над гірничими виробками і карстовими порожнинами. Застосований нами підхід до вирішення задачі прогнозування деформацій земної поверхні над підземними порожнинами в подальшому може бути використаний для більш складних гірничих масивів із врахуванням додаткових діючих факторів.

Ключові слова: провали, тверді породи, ядро текучості, підземні порожнини, об'єм

Вступ. Здавна відомо, що природа не терпить пустоти. Над підземними порожнинами – гірничими виробками або карстами – земля осідає або провалюється. Провали створюють велику небезпеку для населення і майна. Наприклад збитки від провалу над калійною шахтою у Березниках (Росія) у 2007 році оцінені в \$ 90 млн.! [1]. Проблемами утворення і морфології провалів займаються карстознавці з метою охорони будівель і споруд, та гірники з метою забезпечення стійкості гірничих виробок [2]. Прикладом комплексного підходу можуть служити роботи, присвячені зрушенню гірничого масиву при проведенні гірничих робіт з обваленням покрівлі.

Метою даної статті є встановлення зв'язку між руйнуванням підземних порожнин і утворенням провалів земної поверхні. Зазначена мета досягається шляхом натурних спостережень на аварійних соляних рудниках поряд із фізичним моделюванням [3]. У статті розглянуті деякі типові схеми, які розкривають кількісний зв'язок між руйнуванням підземних порожнин і провалами земної поверхні.

Протікання геомеханічних процесів в породних масивах залежить від характеру зв'язків між мінеральними частинками, що складають породу. За цією ознакою розрізняють породи тверді, зліплені і сипучі, хоча між ними є безперервні переходи. В гірничій практиці найбільш розповсюджені геологічні розрізи, в яких над твердими породами залягають зліплені та сипучі. Останні нерідко іменують *наносами*. Для спрощення будемо використовувати цей термін.

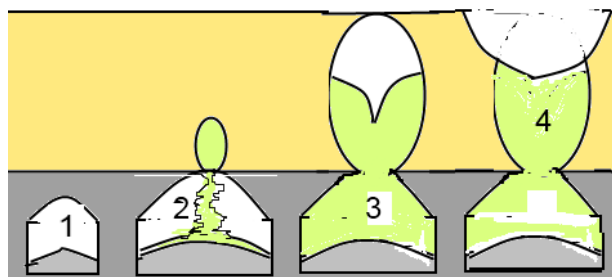


Рис. 1. Стадії розвитку провалу

Карстові порожнини утворюються, а гірничі виробки проходять у твердих породах. В таких двошарових масивах утворення провалів здійснюється за наступними стадіями (рис.1):

- 1) втрата стійкості порожниною і утворення над нею склепіння рівноваги;
- 2) досягнення склепінням контакту з наносами і руйнування верхівки,
- 3) утворення ядра текучості в наносах і їх течія у порожнину, заповнення останньої продуктами руйнування,
- 4) утворення провалу земної поверхні та схилів деформації. Розглянемо кожну із стадій.

Склепіння рівноваги. В твердих породах при досягненні виробкою деякої критичної ширини її плоска покрівля обвалюється, утворюючи склепіння рівноваги. В першому наближенні висоту склепіння H оцінюють за формулою М.М. Протодьяконова

$$H = 2*a/f, \quad (1)$$

а для затоплених порожнин за формулою В.Д. Слесарева

$$H = (\gamma - \gamma_p)*a^2/6*\sigma_p, \quad (2)$$

де a – напівширина стелини виробки, f – коефіцієнт міцності, γ , γ_p – відповідно питома вага гірничих порід і рідини, що заповнює виробку, σ_p – міцність породи на розрив.

Ці формули при всій їх простоті дуже наочно відображають залежність висоти склепіння від міцності порід. У сипучій породі, де $f \rightarrow 0$, висота склепіння прагне до нескінченості, а в дійсності досягає земної поверхні.

Відомі численні роботи, в яких виведені формули для визначення критичної ширини і форми склепіння з врахуванням глибини залягання, форми виробки та інших чинників. Так, в роботі [2] прийнята умова, що поверхня склепіння має форму параболічного циліндру і в такому разі висота склепіння дорівнює половині ширини виробки.



Рис.2. Склепіння над обваленими ціликами (шахта №7 в Солотвині)

За нашими натурними спостереженнями в умовах соляних родовищ склепіння утворюється при досягненні критичної ширини стелини 40-50 м. Висота склепіння над довгими камерами становить одну третину від ширини (рис.2). Над камерами круглої форми висота склепіння удвічі менша і становить 0,1-0,15 діаметра стелини камери.

Очевидно, що провали земної поверхні можливі тільки за умови, що ширина стелини більша за критичну, а верхівка склепіння рівноваги досягає підшови «наносів».

Ядро текучості. В міру збільшення ширини порожнини висота склепіння зростає.

Коли у двохшаровому породному масиві, де над твердою породою залягають «наноси», верхівка склепіння наближається до контакту між вказаними ша-

рами, вона ламається і в утворений отвір сунеться покриваюча порода. Це явище широко відоме із практики випуску подріблених і замагазинованих порід у відкатні штреки. При тому, як показано Г.М. Малаховим і його послідовниками [4,5], над порожниною порода розрихлюється, утворюючи фігуру випуску. Ми пропонуємо називати її **ядром текучості** [3]. В однорідному середовищі ядро текучості має форму еліпсоїда з заданим співвідношенням вертикальної a і горизонтальної b осей [5]:

$$a/b = \lambda, \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт бокового розпору.

Для масиву породи, в якій щеплення відсутнє,

$$\lambda = \text{tg}^2(45 - \varphi/2), \quad (4)$$

де φ – кут внутрішнього тертя. Наприклад, при $\varphi = 30^\circ$, $\lambda = 0,33$.

У верхівці ядра текучості утворюється побіжна тріщина відриву, порода над склепінням стрибкоподібно обвалюється. Продукти обвалювання сповзають по параболоїдній нижній поверхні ядра до місця випуску, а ядро росте вгору.

Об'єм ядра текучості W_0 визначається за формулою [4]:

$$W_0 = 0,524 * h^3 * (1 - \zeta^2), \quad (5)$$

де h – висота ядра, м; ζ – ексцентриситет еліпсоїда – відношення довжини горизонтальної осі до вертикальної.

Ексцентриситет еліпсоїду залежить від фізико-механічних властивостей руди. Чим більший коефіцієнт внутрішнього тертя, тим менший ексцентриситет. У проведених нами експериментах на фізичних моделях, де використовували чистий мілкозернистий пісок, ексцентриситет еліпсоїда становив 0,45-0,55.

В ядрі текучості порода розрихлена. Об'єм твердого скелету еліпсоїду W_T у природному заляганні дорівнює

$$W_T = W_0 * (1 - n_1), \quad (6)$$

де W_0 – об'єм овалоїда, n_1 – пористість «наносів» в природному заляганні.

В розпушеному стані об'єм твердого скелету W_2 становить

$$W_2 = W_0 * (1 - n_2), \quad (7)$$

де n_2 – пористість руди в розпушеному стані.

Різниця між об'ємами ΔW – це кількість породи, яка витікає в деякий момент розвитку ядра.

$$\Delta W = W_0 * (n_2 - n_1). \quad (8)$$

Розвиток ядра текучості. Розпушені «наноси» з ядра текучості спливають у порожнину, утворюючи в ній деякий закладочний масив. Для простоти будемо вважати, що порожнина повністю заповнюється розрихленими «наносами». Залежно від об'єму порожнини, в яку витікають «наноси», можливі наступні варіанти розвитку процесу.

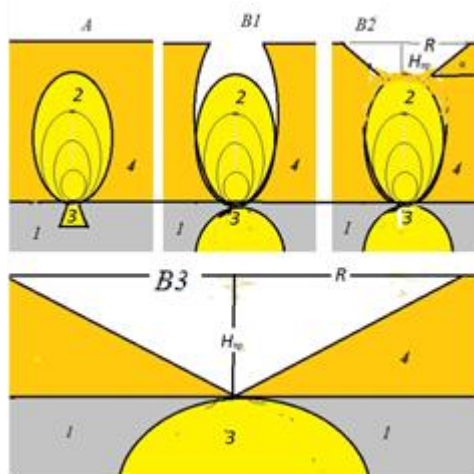


Рис. 3. Розвиток ядра текучості при різному співвідношенні об'ємів порожнини та ядра текучості. 1-тверда порода, 2-ядро текучості, 3-склепіння, 4- «наноси»

1) Об'єм порожнини $W_{\text{п}}$ рівний або менший за ΔW . Над порожниною утворюється зона розуцільнення (рис. 3А). Земна поверхня не деформується. Висота зони розуцільнення може бути обчислена із формули (5):

$$h^3 = W_{\text{п}} / 0,524 * (1 - \xi^2). \quad (9)$$

З цієї формули видно, що можливість провалу залежить як від об'єму порожнини, так і від потужності «наносів». Якщо h менше, ніж товщина «наносів», провал на поверхні не утворюється. Проте з часом, коли наноси в ядрі текучості знову ущільнюються (злежуються), на поверхні утворюється блюдцеподібне пониження.

2) У разі, якщо об'єм порожнини $W_{\text{п}}$ більший за ΔW , верхівка ядра текучості виходить на поверхню (рис. 3В1, В2). У результаті витікання «наносів» з ядра утворюється понор із нависаючими стінками. Очевидно, що максимальний об'єм понору $W_{\text{пр}}$ дорівнює об'єму порожнини з врахуванням коефіцієнту розрихлення $K_{\text{р}}$:

$$W_{\text{пр}} = W_{\text{п}} * K_{\text{р}} \quad (10)$$

Нависаючі стінки вирви обвалюються і утворюється лійка з кутом нахилу бортів, відповідним куту природного укосу. При тому глибина лійки менша за товщину «наносів».

Приймаючи форму лійки за конус з радіусом R , і кутом нахилу бортів α , одержимо

$$W_{\text{пр}} = \pi * R^2 * H_{\text{пр}} / 3 = \pi * R^3 * \text{tg } \alpha / 3, \quad (11)$$

де $H_{\text{пр}}$ - глибина лійки.

Звідси знаходяться радіус і глибина лійки:

$$R = (3 * W_{\text{пр}} / \text{tg } \alpha * \pi)^{0,33}; \quad H_{\text{пр}} = R * \text{tg } \alpha. \quad (12)$$

Таким чином, отримані залежності дозволяють спрогнозувати величину і форму провалу, якщо відомий об'єм підземної порожнини.

3) Якщо об'єм порожнини більший за об'єм ядра текучості ($W_p \geq W_0$), течія «наносів» продовжується доки, поки над порожниною не утвориться конусовидна лійка глибиною від поверхні до покрівлі твердої породи. На дні лійки відслонюються тверді породи з проваллям. У такому разі провал має найбільші розміри. Його глибина H дорівнює товщині шару «наносів», а радіус R визначається за формулою

$$R=H*ctg \alpha. \quad (13)$$

Практичний приклад. Наведені закономірності використані нами для прогнозу місця і розмірів провалу над виробками рудника №2 в Стебнику (Львівська область). На руднику №2, де стався провал, проходить некероване затоплення виробок природними водами. Видобувні камери мають тут висоту 40м, ширину 15м. Водозахисну стелину товщиною 50м підпирають цілики шириною 12м із запасом міцності 2,5-3. Між першим і другим горизонтами залишено міжповерхову стелину товщиною 16м. Над соляним покладом залягає гіпсово-глиняна шапка («наноси») товщиною 80 м. Причиною втрати стійкості виробок було підрізання міжкамерних ціликів агресивними розсолами [3].

У розвитку провалу спостерігалися наступні стадії: 1) підрізання ціликів ненасиченим розсолем; втрата стійкості ціликів і їх обвал; 2) вивал водозахисної товщі з утворенням склепіння; 3) провал покрівлі склепіння і формування ядра текучості в надсолевій товщі з витіканням розрихлених порід у порожнину; 4) утворення субвертикального провалля, обвали і зсуви бортів провалу з формуванням лійки на земній поверхні.

Із припущення, що висота склепіння H становить одну третину від ширини порожнини, знайшли ширину склепіння B , при якій верхівка досягає соляного дзеркала:

$$B=3*H=150\text{м} \quad (14)$$

Оскільки сума ширини блока (цілика і камери) становить 27м, число зруйнованих ціликів, при якому склепіння досягає соляного дзеркала, становить $150/27=5,5$. Зауважимо, що вивал породи із стелини при утворенні склепіння не змінює об'єму порожнини.

Розрахунковий об'єм виробленого простору («порожнини») W_1 під склепінням над шістьма камерами становив 945 тис. м³. Прогнозний об'єм провалу при коефіцієнті розрихлення $K=1,3$ становить 661000м³

Вважаючи форму лійки за конус з радіусом R і кутом схилів 28° , з формули 12 знайшли радіус лійки: $R = 98$ м, і глибину $H_p = 52$ м. Дно провалу не досягає соляного дзеркала, над ним залишився шар розрихленої породи товщиною $H_1 - H_p = 80 - 52 = 28$ м.

У відповідності з нашими прогнозами ділянка майбутнього провалу була помічена на місцевості і обгороджена. Початок обвалення ціликів виявлено по різкому підвищенню рівня розсолу у вересні 2015 року і підтверджено прямими візуальними спостереженнями. Провал поверхні утворився 30 вересня 2017 року. Радіус провалу 107м, глибина 40 м (рис.4). Кут нахилу бортів

від 28 до 30°. Фактичний об'єм провалу 720 тис.м³, більший від розрахованого на 8%. Різниця пояснюється тим, що коефіцієнт розрихлення обрешеної породи прийнятий без потрібного обґрунтування. Отже, результати прогнозних розрахунків дають задовільні результати.

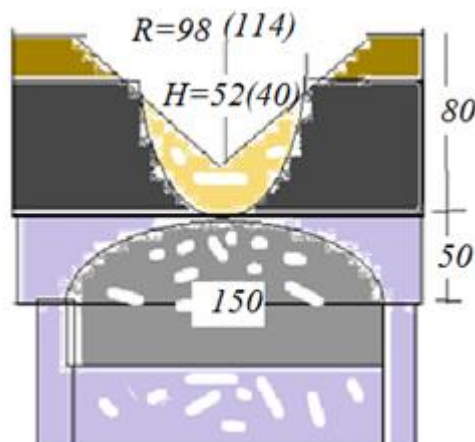


Рис.4. Схема провалу над виробленим простором рудника №2 в Стебнику. Цифрами показані прогнозні розміри, у дужках фактичні

Надзвичайно важливим є той факт, що від моменту обвалу ціликів з утворенням склепіння до провалу поверхні пройшло два роки. Це вказує на повільний розвиток ядра текучості. Якби провал утворився раптово, це супроводжувалося би землетрусом. Але завдяки повільній течії «наносів» в ядрі текучості землетрусу практично не сталося.

Встановлені закономірності стосуються тільки декількох окремих спрощених схем гірничих масивів. Завдання наступних досліджень полягають у врахуванні впливу на провалоутворення підземних вод, особливостей геологічного розрізу, визначення швидкості течії породи в ядрі текучості, у вирішенні поставлених задач у двовірному і тривірному просторах.

Висновки.

1. Новизна роботи полягає у встановленні кількісного зв'язку між руйнуванням підземних порожнин і утворенням провалів земної поверхні. Морфологія провалу земної поверхні залежить від об'єму підземної порожнини, глибини її залягання, від потужності «наносів» і їх фізико-механічних властивостей. Пропонується декілька розрахункових схем для двошарового гірничого масиву

2. Теоретичне значення роботи полягає у застосуванні гіпотези «ядра текучості» з використанням закономірностей, встановлених практикою випуску замагазінованих руд. Практична можливість прогнозування провалів підтверджена на прикладі провалу над рудником у Стебнику. Встановлена причина того, чому утворення провалу не супроводжується суттєвим землетрусом.

3. Застосований підхід до вирішення задачі прогнозування деформацій земної поверхні над підземними порожнинами в подальшому може бути використаний для більш складних гірничих масивів із врахуванням додаткових діючих факторів.

Перелік посилань

1. Боржаковский, Б., Гринберг, А., Толмачев, Б. (2011). Опыт ликвидации провала на земной поверхности над затопленным калийным рудником. *Горный журнал*. 2011 №2. 43-50.
2. Шашенко, А., Майхерчик, Т., Сдвижкова, Е. (2005). Геомеханические процессы в породных массивах. Днепропетровск: Изд-во Нац. горн. ун-та.
3. Гайдін, А.М. (2017) Геомеханіка Стебницького провалу. «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування». 2017 № 2, 112-119.
4. Малахов, Г. (1952). *Выпуск руды из обрушенных блоков*. Москва: Металургиздат.
5. Бізов, В., Корж, В. (2003). *Підземні гірничі роботи*. Том XII. Кривий Ріг: Мінерал.

АННОТАЦІЯ

Цель. Установление связи между деформациями подземных пустот и образованием провалов земной поверхности с целью прогнозирования их величины и формы. Подробный обзор всех стадий развития провалов, а также различных физических и геологических условий, которые этому развитию способствуют. Разработка комплексного подхода к решению задачи прогнозирования деформаций земной поверхности над подземными полостями. На основе оценки ситуации и ее изменений, применить разработанный нами подход на практике.

Методика исследований заключается в наблюдениях за деформациями выработок аварийных соляных шахт и провалами земной поверхности, а также в их физическом моделировании. Обследование горных выработок и карстовых обвалов земной поверхности, гидро-химические апробирования шахтных вод. Наблюдение за изменением уровня воды в стволах затапливаемой шахты.

Результаты исследования. Рассмотрены некоторые типичные схемы, которые описывают связь между разрушением подземных полостей и провалами земной поверхности. В качестве примера описан провал на Стебницком руднике в Львовской области. Установлены все необходимые условия, при которых возможны провалы земной поверхности и предоставлено наглядный обзор стадий развития провалов. Разработан комплексный подход к решению задачи прогнозирования деформаций земной поверхности

Научная новизна. Впервые показана связь между размером и формой провалов земной поверхности и объемом подземных полостей. Установлена причина того, почему образование провала не сопровождается существенным землетрясением. Предложены формулы для определения размеров провалов в зависимости от объема подземных пустот, глубины их залегания и свойств пород.

Практическое значение. Результаты исследований могут быть использованы для прогнозирования расположения и размера деформаций земной поверхности над горными выработками и карстовыми пустотами. Примененный нами подход к решению задачи прогнозирования деформаций земной поверхности над подземными полостями в дальнейшем может быть использован для более сложных горных массивов с учетом дополнительных действующих факторов.

Ключевые слова: провалы, твердые породы, ядро текучести, подземные пустоты, объём

ABSTRACT

Purpose. Establishing a connection between the destruction of underground cavities and the formation of the earth's surface collapses in order to predict their magnitude and form. A detailed overview of all stages of collapses, as well as the various physical and geological conditions that contribute to it. Development of an integrated approach to solving the problem of prediction of deformations of the earth's surface over underground cavities. Based on the assessment of the situation and its changes, our approach could be applied in practice.

The methodology of research consists on observations of accident salt mines along with physical modeling. Inspection of mining and karst failures on the earth's surface, hydro-chemical testing of mine waters. Observation of changes in water level in the trenches of a flooded mine.

Findings. Are considered some typical schemes, which reveal the connection between the destruction of underground cavities and the collapses of the earth's surface. As an example, the failure in the Stebnitsky mine is described. A visual review of all the stages of collapses was provided. An integrated approach to solving the problem of prediction of deformations of the earth's surface is developed.

The originality for the first time the connection between the size and the form of the collapses of the earth's surface and the volume of underground cavities is revealed. The reason why the formation of a failure isn't accompanied by a significant earthquake is established. Also are proposed formulas for determining the size of failures, depending on the volume of underground cavities, the depth of their occurrence and the properties of rocks.

Practical implications. The research results can be used to predict the location and size of the earth's surface collapses. Also the approach applied by us to the solution of the problem of prediction of the earth's surface deformation over underground caverns can be used later for more complex mountain ranges, taking into account additional operating factors.

Keywords: *collapses, solid rock, core of fluidity, underground cavities, volume*

УДК 622.831.2:539.422.3

© Л.М. Захарова

ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЮ БЛИЗЬКОЇ Й ДАЛЕКОЇ ВЗАЄМОДІЙ У ПРОЦЕСІ ЕВОЛЮЦІОНУВАННЯ ДИСИПАТИВНИХ СТРУКТУР У ГІРСЬКОМУ МАСИВІ

© L. Zakharova

SUBSTANTIATION OF A SHORT AND DISTANT INTERACTION CRITERION DURING EVOLUTION OF THE DISSIPATIVE STRUCTURES IN THE ROCK MASS

Метою даного дослідження є обґрунтування критерію, який може бути використаний для класифікації близької взаємодії фрагментів породи та далекої взаємодії кластерів порід,