

18 Система автоматизованого захисту небезпечних зон виробництва та безпеки руху внутрішньо цехового транспорту. Патент України на корисну модель МПК G06F 17/00, G08B 23/00 [Текст] / Бочковський А.П., Сапожнікова Н.Ю. - № 116307; заявл. 19.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. 9 [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/317175918_Sistema_avtomatizirovanoj_zasity_opasnyh_zon_proizvodstva_i_bezopasnosti_dvizenia_vnutricehovogo_transporta_The_system_of_automated_protection_of_hazardous_production_zones_and_traffic_safety_of_in-v

© А. П. Бочковський,
Н. Ю. Сапожнікова

*Надійшла до редакції 25 вересня 2017 р.
Рекомендував до друку
докт. техн. наук Я. М. Семчук*

УДК 331.45:331.46-044.68

*А. М. Гайдін
Інститут «ГІРХІМПРОМ»*

ГЕОМЕХАНІКА СТЕБНИЦЬКОГО ПРОВАЛУ

Запропоновано математичний опис складових процесу провалу земної поверхні над виробленим простором рудника №2 в м. Стебнику Львівської області. Виділені наступні стадії процесу: підрізання ціликів внаслідок їх розчинення ненасиченим розсоллом, обвалення ціликів, вивал водозахисної стелени, течія покриваючих нестійких порід у порожнину, формування провальної лійки.

Ключові слова: соляна шахта, затоплення, розчинення, склепіння, ядро текучості, провал.

A mathematical description of the components of sinkhole formation process above the mine 2 worked – out space in the town of Stebnyk, Lviv Region, has been suggested. The following stages of the process have been singled out: undermining of support pillars by unsaturated salt solution, collapse of the support pillars, fall of the water-blocking roof, flow of unstable overburden rocks into the void, formation of a collapse sinkhole.

Key words: salt mine, flooding, dissolution, dome of equilibrium, flowing main body, sinkhole

Постановка проблеми. Багато соляних рудників були знищені внаслідок прориву прісної води в гірничі виробки. Така ситуація склалась із рудником №2 в Стебнику, де 30 вересня 2017 року над видобувними камерами пласта №10 утворився провал поверхні діаметром більше 200 м і глибиною біля 45 м.

Поклади кам'яної і калійної солей водотривкі, непроникливі. Зверху вони зазвичай перекрыті елювієм – слабо проникливими глинистими породами (кепроком), які захищають соляний масив від агресивних підземних і поверхневих вод. Однак, на контакті солей з покриваючими породами (соляному дзеркалі), залишається проникливий шар деструктурованої солі, що вміщує розсіл. На ділянках сучасного або древнього розмиву кепроку розсільний горизонт гідравлічно зв'язаний з водами зони активного водообміну. В природних умовах водообмін у розсільному горизонті дуже повільний. Але коли його розкривають гірничими виробками, починається рух розсолу. В зоні живлення до соляного дзеркала підтягується прісна вода. Вода розчиняє сіль, розвивається карстовий канал. Провідність розсільного горизонту зростає, приплив води в шахту збільшується. Течія агресивної води у гірничі виробки створює небезпеку їх руйнування, обвалу покриваючих порід, знищення рудника.

Підземну розробку соляних родовищ, як правило, здійснюють камерним способом. Для попередження зрушення земної поверхні між видобувними камерами залишають цілики, які сприймають на себе вагу покриваючих порід. Над виробленим простором залишають соляну водозахисну стеліну. Зокрема на руднику №2 в Стебнику водозахисна стеліна має товщину 50 м, її підпирають цілики шириною 12 м з запасом міцності 2,5–3,0. Пройдено 4 горизонти видобувних камер. Камери мають висоту 40–60 м, ширину 15 м. Між першим і другим горизонтами залишено міжповерхову стеліну товщиною 12 м.

Прорив води стався в 1978 році і з того часу невпинно збільшувався. В 2002 році осушення рудника припинено. До 2007 року затоплено два найглибших горизонти, де запас міцності ціликів дуже великий і вони не втратили стійкості. З 2007 року затоплювався другий горизонт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомій автору літературі [1, 2] зазвичай висвітлюється послідовність подій, які закінчуються катастрофічними провалами підпрацьованого масиву. Розрізняють дві причини провалів земної поверхні в зоні діяльності соляних рудників: 1) розвиток карстової порожнини в зоні живлення розсільного горизонту і 2) обвалення ціликів, підрізаних ненасиченими розсолами. Вербальний опис механізму карстових провалів наведений в роботах [3, 4] та ін. Намагання математичного опису окремих стадій процесу висвітлено в книзі [5]. У даній статті наведено першу спробу математичного опису всього ланцюга процесів, пов'язаних з підрізанням і обваленням ціликів, на прикладі провалу над рудником №2.

Виклад основного матеріалу. З цією метою виділені наступні стадії ланцюга подій, які закінчуються провалом: 1) підрізання ціликів ненасиченим розсолом (ННР); 2) втрата стійкості ціликів і їх обвал; 3) вивал водозахисної товщі з утворенням склепіння; 4) провал покрівлі склепіння і формування ядра текучості в надсолевій товщі з витіканням розрихлених порід у порожнину; 5) утворення субвертикального провалля, б) обвали і зсуви бортів провалля з формуванням лійки на земній поверхні. Розглянемо кожну із стадій.

Стадія 1 – підрізання ціликів. Приплив ненасиченого розсолу (ННР) у видобувну камеру призводить до утворення ніш розчинення у прилягаючих ціликах. Для калійної руди пласта №10 концентрація насиченого розсолу становить 388,5 г/дм³. Швидкість розчинення пропорційна дефіциту насичення – різниці концентрацій насиченого розсолу і ННР. Коефіцієнт пропорційності залежить від мінерального складу солі, вмісту нерозчинних домішок, від хімічного складу і температури ННР.

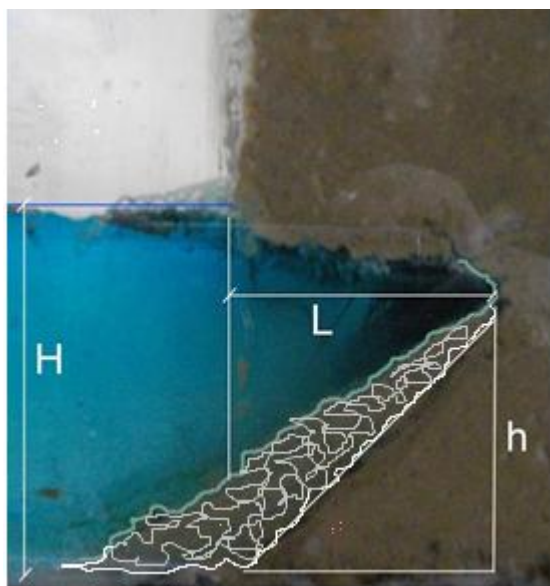


Рис.1. Ніша в цілику при затопленні камер агресивним розсолом (модель)

Агресивний розсіл ллється в камеру зверху, виходить через орти в штреки і розповсюджується виробленим простором. Дослідження на фізичних моделях [5] показало, що за наявності у складі солей нерозчинних домішок, ніші розчинення мають у вертикальній площині форму трикутника (рис. 1).

Розчиняється тільки покрівля ніші, тоді як нижня поверхня захищається від дії ННР нерозчинним осадом. Для розрахунку глибини ніші розчинення L на основі фізичного моделювання запропонована емпірична формула:

$$L = H_p \times \frac{V_p}{V_n + V_p \times \text{tg}\varphi}, \quad (1)$$

де H_p – глибина від поверхні ННР до основи цілика; m , V_p – швидкість розчинення, м/рік; V_n – швидкість підняття рівня розсолу, м/рік; $\text{tg}\varphi$ –

нахил поверхні призми нерозчинного осаду в низу ніші.

В розсолі кут відкосу осаду більший, ніж у прісній воді. На моделях вказаний кут становив біля 45° , тобто $tg\varphi=1$.

Для визначення швидкості розчинення ми опускали моноліти калійної руди безпосередньо в камеру, куди припливав ННР з мінералізацією $343,5 \text{ г/дм}^3$ і зважували зразки до і після перебування в розсолі. Швидкість розчинення становила приблизно $1,3 \text{ м/рік}$. Швидкість підняття рівня розсолів в камерах рудника в останні роки становила $3,6 \text{ м за рік}$.

Інший спосіб визначення глибини ніш полягає в розрахунку об'єму зруйнованої внаслідок розчинення руди. Для цього необхідно знати різницю D в мінералізації розсолу вверху і внизу затопленої частини камери і об'єм ННР W_v , що протік через камеру. Маса розчиненої солі M дорівнює:

$$M = D \times W_v, \text{ а об'єм } W_m = \frac{M}{\rho}, \quad (2)$$

де ρ – питома маса розчинних мінералів; D – дефіцит насичення.

Об'єм зруйнованої руди дорівнює об'єму легкорозчинних мінералів, поділений на вміст останніх n у частинах одиниці:

$$W_p = \frac{W_m}{n}. \quad (3)$$

Оскільки розчиняються обидва цілики, об'єм ніші в одному з них дорівнює $0,5 W_p$. Знаючи довжину цілика, знаходимо площу і глибину ніші. Цей спосіб потребує визначення об'єму ННР, що вливається в камеру і відбору проб води із затопленої камери. В реальних умовах це потребує праці в небезпечних умовах. Ми таким чином перевірили достовірність розрахунку по формулі (1).

Стадія 2. Втрата стійкості і обвал ціликів. Стійкість ціликів характеризують коефіцієнтом запасу міцності, який є відношенням опору цілика стисканню до навантаження [6]. При запасі міцності $n \geq 2,5$ цілики є жорсткими і зберігають довготривалу стійкість. При n від $2,5$ до $1,4$ цілики податливі, вони зберігають стійкість тимчасово, осідають і в кінцевому рахунку роздавлюються. При запасі міцності $n \leq 1$ цілик безумовно руйнується. Для стрічкових ціликів навантаження на цілик F дорівнює:

$$F = \rho \times H \times (a + b), \quad (4)$$

де ρ – питома вага покриваючих порід, H – глибина від поверхні до покрівлі камер, a – ширина камер, b – ширина ціликів.

Несучу властивість ціликів P визначають за формулою:

$$P = 1,15 \times \sigma \times b \left(\frac{b}{h} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

де σ – опір соляної породи на стискання; h – висота цілика.

Умовою руйнування цілика є:

$$\frac{P}{F} \leq 1. \quad (6)$$

Для другого горизонту Стебницького рудника №2 $\rho=2.2 \text{ т/м}^3$, $H=200 \text{ м}$, $a=15 \text{ м}$, $b=12 \text{ м}$, $\sigma=820 \text{ т/м}^2$, $h=40 \text{ м}$. Обчислюючи рівняння відносно b , одержимо умову руйнування: ширина цілика $b \leq 3,7 \text{ м}$, тобто глибина ніші розчинення L у цілику шириною 12 м $L \geq 8,3 \text{ м}$.

З формули (1) при $tg\varphi=1$ висота стовпа розсолу, при якій цілик втратить стійкість, становить:

$$H_p = L \times \frac{V_n + V_p}{V_p} = 31 \text{ м.}$$

Розрахунки повністю підтвердилися. Активне обвалювання ціликів виявлено по прискоренню підняття рівня розсолу (рис. 2). Як видно на графіку, при висоті стовпа розсолу в камерах другого горизонту $H_p = 33$ м, у вересні 2014 року швидкість підняття рівня розсолу різко збільшилася з 0,3 до 4 м/місяць. Для підтвердження причини було проведено візуальне обстеження стану ціликів і безпосередньо зафіксовано обвалення 5 ціликів, №№108-113 і утворення куполу в стеліні над ними.

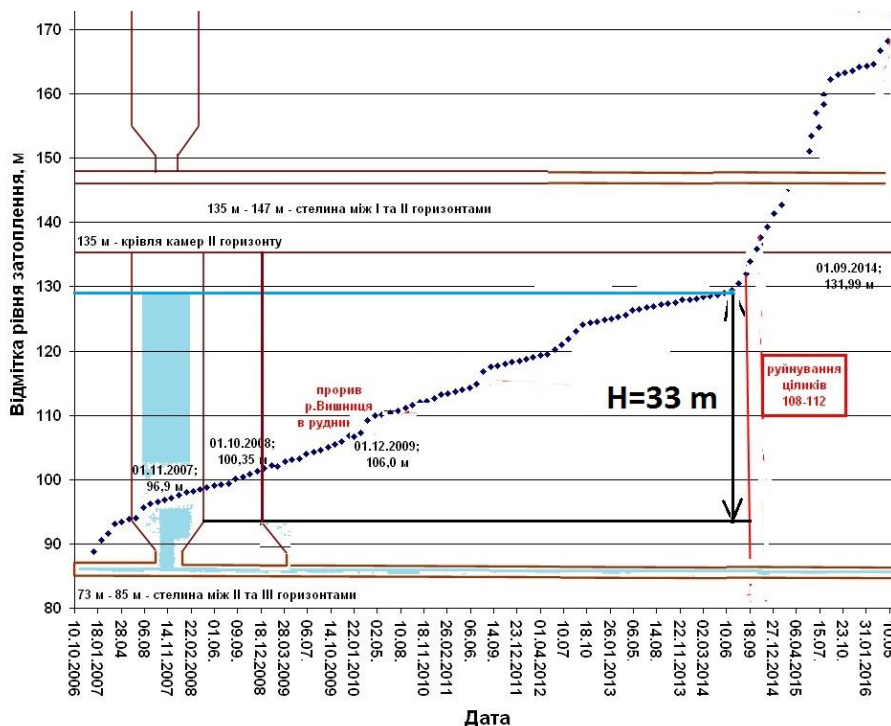


Рис.2. Графік підняття рівня розсолів в руднику №2 (склав В. О. Дяків)

Обвалення ціликів другого горизонту і міжповерхової стелі викликало зависання і обвал ціликів першого горизонту. Над обваленими ціликами у водозахисній стеліні утворилося склепіння.

Стадія 3. Утворення склепіння у водозахисній товщі. Водозахисна стеліна над зруйнованими ціликами залишається стійкою до деякої критичної ширини c , яка визначається за формулою [7]:

$$c = \left((0,45 \times \sigma \times Z^2) / (Z + H_1) \times \rho \right)^{0,5}, \quad (7)$$

де σ – опір породи стисканню, т/м^2 ; Z – потужність водозахисної товщі, м; H_1 – потужність покриваючих порід («наносів») над соляним покладом, м; ρ – питома маса порід, т/м^3 . Для умов Стебницького рудника $Z = 50$ м, $c = 53$ м.

Якщо ширина відслоненої покрівлі перебільшує вказану критичну ширину, у стеліні здійснюється вивал з утворенням склепіння рівноваги. Форма склепіння залежить від міцності порід. На рис. 3 показано склепіння над виробленим простором соляного рудника №7 в Солотвині. Відношення ширини склепіння B до його висоти дорівнює 3. Оскільки міцність калійної і кам'яної солей приблизно однакова, за аналогією приймаємо вказане відношення для подальших обчислень.

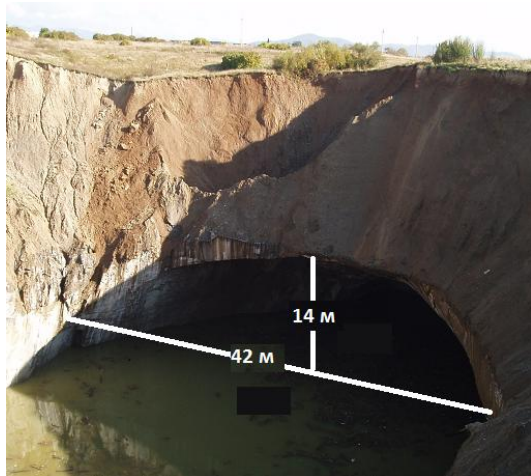


Рис.3. Склепіння над обваленими ціликами (шахта №7 в Солотвині)

Для рудника №2, де потужність водозахисної стелі Z становить 50 м, ширина склепіння B , при якій верхівка досягає соляного дзеркала, дорівнює:

$$B = 3 \times Z = 150 \text{ м.}$$

Оскільки сума ширини блока (цілика і камери) становить 27 м, число зруйнованих ціликів, при якому склепіння досягає соляного дзеркала, становить $150/27=5,5$.

Стадія 4. Формування ядра текучості в надсолевій товщі. Коли верхівка склепіння у водозахисній стелі досягає соляного дзеркала, утворюється діра в покрівлі склепіння. Внаслідок цього у надсолевій товщі спочатку також утворюється склепіння. Проте в слабо зцементованих породах склепіння перетворюється в ядро текучості (рис. 4). Цей процес аналогічний добре відомому випуску подрібнених руд з одиночного випускного отвору [8]. В однорідному середовищі ядро текучості має форму овалоїда з ексцентриситетом (відношенням розміру горизонтальної осі до вертикальної):

$$\frac{a}{b} = \lambda, \quad (9)$$

де λ – коефіцієнт бокового розпору.

Для масиву роздільно-зернистих порід, в якому зчеплення відсутнє:

$$\lambda = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (10)$$

де φ – кут внутрішнього тертя.

Наприклад, при $\varphi=30^\circ$, $\lambda=0,33$; $\varphi=25^\circ$, $\lambda=0,40$.

Склепіння над ядром текучості стрибкоподібно обвалюється.

Продукти обвалювання сповзають по параболоїдній нижній поверхні ядра до місця провалу водозахисної стелі, а склепіння зростає вгору. Об'єм ядра текучості W_0 в момент, коли його верхівка досягає земної поверхні, визначається за формулою [8]:

$$W_0 = 0,524 \times H_1^3 \times (1 - \lambda^2), \quad (11)$$

де H_1 – потужність покриваючих порід, м.

Ексцентриситет овалоїда залежить від фізико-механічних властивостей руди. Чим більший коефіцієнт внутрішнього тертя, тим менший ексцентриситет.

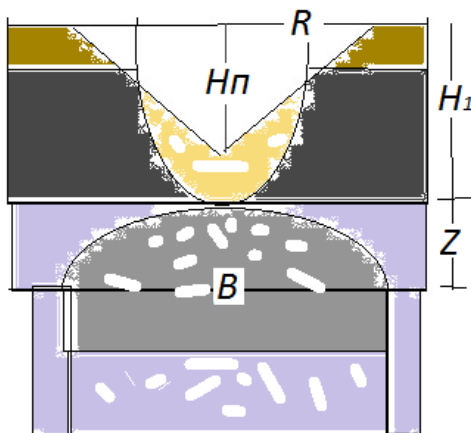


Рис.5. Схема провалу над виробленим простором. Умовні позначки такі, як на рис. 3.

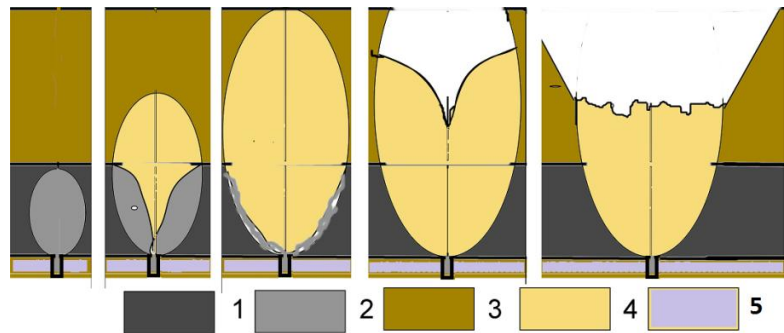


Рис. 4. Схема розвитку ядра текучості (1 – кепрок, 2 – він же розпушений, 3 – покриваючі рихлі породи, 4 – вони ж розпушені, 5 – сіль)

Стадія 5. Утворення провалля (рис. 5). В момент, коли верхівка ядра текучості досягає земної поверхні, об'єм розпушеної породи W_p дорівнює:

$$W_p = W_0 \times K_p, \quad (12)$$

де K_p – коефіцієнт розпушення, відношення об'єму розпушеної породи до об'єму тієї ж породи в природному заляганні. Табличне значення $K_p=1,3$. В цей момент у вироблений простір витікає об'єм надсолевих порід ΔW , рівний різниці:

$$\Delta W = W_p - W_0 = W_0 \times (K_p - 1) \quad (13)$$

Якщо об'єм порожнини в солях менший за ΔW , ядро текучості не досягає поверхні, провал землі не здійснюється, в надсолевій товщі утворюється зона розущільнення.

Якщо об'єм порожнини в солях більший за

ΔW , утворюється провалля з нависаючими стінками об'ємом, рівним різниці:

$$\Delta W_2 = \frac{W_1}{K_p}, \quad (14)$$

де W_1 - об'єм виробленого простору W_1 під склепінням над обваленими ціликами. Після того стінки обвалюються і утворюється лійка – провал набуває форми перевернутого конусу.

При умові $W_p \leq W_1$ дно лійки досягає покрівлі солей.

Стадія 6. Формування лійки на земній поверхні. Нависаючі стінки провалля обвалюються, поки не утвориться лійка з природним кутом схилів α , який зазвичай становить 25-30°.

На основі наведених закономірностей оцінимо параметри провалля при обваленні 5 ціликів на руднику №2 в Стебнику. Об'єм виробленого простору W_1 очевидно дорівнює об'єму 5 камер на двох горизонтах. Зауважимо, що вивал породи із стелини при утворенні склепіння не змінює об'єму порожнини.

Довжина камер $L_k=105$ м, ширина $a=15$ м, сумарна висота камер на двох горизонтах $H_k=100$ м. Об'єм виробленого простору W_1 під склепінням над 5-тма камерами становить:

$$W_1 = 5 \times L_k \times a \times H_k = 945 \text{ тис.м}^3. \quad (15)$$

Об'єм конусу $W_2=945/1,3 = 726$ тис. м³. Приймаючи форму лійки за конус з кутом нахилу бортів 30° ($\text{tg}\alpha=0,58$), знаходимо радіус R і глибину провалу H_n ($H_n = R \times \text{tg}\alpha$).

$$W_2 = \pi \times R^3 \times \frac{\text{tg}\alpha}{3}. \quad (16)$$

Звідки $R=101$ м, $H_n = 58$ м. Дно провалу не досягає соляного дзеркала, над ним залишається шар розпушної породи товщиною $H_1-H_n=80-58=22$ м.

Фактично над рудником №2 в Стебнику утворився провал радіусом 107 м глибиною 40 м (рис. 6). Верхня частина лійки являє собою обрив висотою біля 10 м. Кут нахилу бортів від 28 до 30°. Фактичний об'єм провалу 720 тис. м³, що відповідає результатам розрахунку.



Рис. 6. Провал над рудником № 2 в Стебнику

Висновки.

1 Запропонований математичний опис процесів, які призводять до утворення провалу земної поверхні внаслідок підрізання ціликів соляних шахт.

2 Виділені наступні стадії розвитку провалу: розчинення ціликів ненасиченим розсолем, обвалення ціликів, утворення склепіння у водозахисній стелині, течія покриваючих нестійких порід у вироблений простір, формування провальної лійки.

3 Результати розрахунків співставлені з фактичними спостереженнями на руднику №2 в м. Стебнику і дали задовільну достовірність.

4 Запропонована методика може бути використана для прогнозування провалів, викликаних підрізанням ціликів при проривах води в соляні шахти.

Література

- 1 Андреечев А.Н. Разработка калийных месторождений. – М.: Недра, 1996. - 250 с.
- 2 Шокин Ю.П. Анализ причин затопления калийных рудников ГДР и ФРГ подземными водами и рассолами. – Тр. ВНИИГ, вып.51. 1969. С.22-40.

3 Осипов В.И., Барях А.А., Санфиров И. А. Гидрогеомеханические условия формирования карстовых провалов на территории калийных рудников в г. Березники Пермского края. //Геоэкология. - 2016. - №2. – С. 142-149.

4 Короткевич Г.В. Соляной карст. –Л.: Недра, 1967. -180 с.

5 Гайдін А.М., Рудько Г.І. Техногенний карст. – Київ – Чернівці: Букрек, 2016. – 200 с.

6 Пермяков Р.С., Романов В.С., Бельди М.П. Технология добычи солей. - М.:Недра, 1981. - 272 с.

7 Шашенко А.Н., Майхерчик Т., Сдвижкова Е.А. Геомеханические процессы в породных массивах. –Днепропетровск: Изд-во Нац. горн. ун-та, 2005. – 349 с.

8 Бизов В.Ф., Корж В.А. Бібліотека гірничого інженера. Том XII. Підземні гірничі роботи.– Кривий Ріг: Мінерал. 2003. - 286 с.

© А. М. Гайдін

Надійшла до редакції 03 листопада 2017 р.

Рекомендував до друку

докт. геол.-мін. наук О. М. Адаменко