

М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, О.В. Калініченко, І.О. Музика,  
М.Б. Федько, С.В. Письменний

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СКЛАДОВА ПРОЦЕСІВ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ МАСИВУ**

*У роботі наведено й обґрунтовано основні концепції застосування інформаційних технологій щодо моніторингу та можливості керування напружено-деформованим станом гірських порід при видобутку залізних руд підземним та відкритим способами, як критерій при виборі оптимальної концепції застосування інформаційних технологій щодо моніторингу та керування напружено-деформованим станом масиву гірських порід пропонується мінімум матеріальних затрат на реалізацію цього процесу.*

---

### **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА**

*В работе приведены и обоснованы основные концепции применения информационных технологий по мониторингу и возможности управления напряженно-деформированным состоянием горных пород при добыче железных руд подземным и открытым способом. В качестве критерия при выборе оптимальной концепции применения информационных технологий по мониторингу и управлению напряженно-деформированным состоянием массива горных пород предлагается минимум материальных затрат на реализацию данного процесса.*

---

### **INFORMATION TECHNOLOGIES AS A COMPONENT OF MONITORING AND CONTROL OF STRESS-DEFORMED STATE OF ROCK MASS**

*Basic concepts of information technology using for monitoring and control of the stress-deformed state of rocks when iron ore underground and open mining are given and grounded in the paper. As a criterion in choosing the optimal concepts of information technology use for monitoring and control of stress-deformed state of the rock mass, a minimum of material costs for the implementation of this process is offered.*

---

#### **ВСТУП**

Розвиток гірничих підприємств і збільшення обсягу видобутку корисних копалин в умовах зростання глибини розробки та погіршення гірничо-геологічних характе-

ристик родовищ потребують високого ступеня вивченості літосферного середовища, зокрема, виконання ефективного контролю властивостей породного масиву і діагностики його напружено-деформованого стану (НДС). Важливий елемент діагностики

стану масиву – контроль зсувів порід у зонах підробки земної поверхні, які є потенційними джерелами техногенних катастроф, а також у зонах взаємного впливу кар'єрів і гірничих виробок при сумісній розробці родовища відкритим і підземним способами.

Відомо, що НДС масиву суттєво залежить від ступеня його неоднорідності, зокрема, наявності структурних, тектонічних, тектоно-карстових та інших порушень, присутність яких негативно впливає і на технологічний процес гірничих робіт. Тому інформація про такі порушення є вкрай необхідною як на стадії проектування, так і в процесі розробки родовища [1 – 5]. Пріоритет розробки і впровадження методів гірничої геофізики належить вітчизняним вченим. Однак досвід використання методів гірничої геофізики показав, що достовірність моніторингу породного масиву може бути забезпечена використанням відомих методів тільки в комплексі з новими методами та технічними засобами на основі прогресивних інформаційних технологій.

На наш погляд, необхідна оперативна оцінка величин діючих напружень у масиві, прогнозування характеру і причин їх зміни під час всього періоду ведення очисного виймання, що дозволить оцінити існуючі умови й отримати вихідні дані для вдосконалення застосовуваних і розробки нових технологічних схем, здійснити вибір оптимальних параметрів ведення очисних робіт і визначити раціональну їх послідовність.

Метою роботи є встановлення закономірностей зміни НДС масиву при підземному та відкритому способах видобутку залізних руд та обґрунтування концепцій застосування інформаційних технологій щодо моніторингу та можливості керування НДС масиву гірських порід при видобутку залізних руд.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Числові методи моделювання, що враховують фізико-механічні властивості не-

однорідних гірських масивів, потребують значних потужностей для вирішення завдань високої обчислювальної складності. Цей факт обумовлює ефективність застосування сучасної комп'ютерної техніки для вирішення завдань дослідження, моніторингу та прогнозування НДС гірського масиву при видобутку залізної руди відкритим і підземним способами. Критерієм вибору оптимальної концепції застосування інформаційних технологій щодо моніторингу та керування НДС масиву має бути мінімум матеріальних витрат на моніторинг великих за площею територій.

З цією метою необхідно визначити рівень економічних ризиків, які забезпечать мінімальні витрати на моніторинг великих за площею територій з урахуванням імовірності виникнення негативних геомеханічних наслідків від можливих порушень денної поверхні в полях закритих і діючих гірничодобувних підприємств.

Методи та методики визначення економічних ризиків являють собою сукупність засобів і прийомів аналізу, розрахунку й оцінки економічної доцільності здійснення тих або інших запропонованих рішень.

Класична методика визначення економічних ризиків оснований на порівняльній оцінці витрат і результатів, встановленні ефективності використання отриманих прогнозованих результатів і запропонованих рішень.

Співставлення отриманих економічних показників з аналогічними проектними значеннями дозволить визначити економічну ефективність запропонованих рішень з урахуванням імовірності виникнення геомеханічних ризиків. Метод порівняльних оцінок може бути рекомендований до практичного використання в тих випадках, коли бракує часу та фінансових можливостей для проведення повноцінного техніко-економічного дослідження.

Однією з головних особливостей економічної оцінки геомеханічних ризиків і заходів з їх попередження, або мінімізації, як виду діяльності, є прийняття рішень. Широко відомою моделлю прийняття рі-

шень за умов невизначеності є статистична модель прийняття рішень.

Під ситуацією прийняття управлінського рішення будемо розуміти сукупність множин  $\{\lambda, \beta, F\}$ , де  $\lambda = \{\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3; \dots; \lambda_n\}$  множина стратегій економічної системи (ЕС) моніторингу проблемних територій, яка залежить від імовірності виникнення геомеханічних ризиків  $\beta_{z.p.}$  і ха-

рактеризує множину станів ЕС  $\beta = \{\beta_1; \beta_2; \beta_3; \dots; \beta_m\}$ ;  $F$  – вектор оцінювання, який відповідає рішенням  $\lambda_i$ .

У випадку, коли є дискретною множина стратегій економічної системи моніторингу, прийняття управлінського рішення може бути здійснено за допомогою розрахунку функції ризику, яка оцінюється матрицею ризику

$$P = \Pi \{f_{ij}; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\} = \lambda_i \begin{matrix} & \beta_1 & \beta_{\dots} & \beta_j & \beta_{\dots} & \beta_n \\ \lambda_1 & \left( \begin{matrix} f_{11} & f_{\dots} & f_{1j} & f_{\dots} & f_{1n} \\ f_{\dots} & f_{\dots} & f_{\dots} & f_{\dots} & f_{\dots} \\ f_{i1} & f_{i\dots} & f_{ij} & f_{i\dots} & f_{in} \\ f_{\dots} & f_{\dots} & f_{\dots} & f_{\dots} & f_{\dots} \\ f_{m1} & f_{m\dots} & f_{mj} & f_{m\dots} & f_{mn} \end{matrix} \right) \\ \lambda_{\dots} & \\ \lambda_{\dots} & \\ \lambda_m & \end{matrix}.$$

Прийняття оптимального рішення при економічній оцінці геомеханічних ризиків може бути здійснено на базі одного з критеріїв оптимальності.

У ситуації прийняття рішень  $\{\lambda, \beta, F\}$ , коли оціночний функціонал заданий у вигляді матриці, на наш погляд, найбільш доцільно використовувати критерій Байеса, який також називають критерієм середньозваженого прибутку, витрат тощо.

Для моніторингу проблемних територій та розробки запобіжних заходів задача прийняття управлінського рішення характеризується прийняттям оптимального рішення  $\lambda_{io}$ , для якого математичне очікування відповідного вектора оцінювання досягає найбільшого значення з урахуванням імовірності виникнення геомеханічних ризиків. Таким чином, оптимальне рішення  $\lambda_{io}$  для умов, коли  $F = F^+$ , пропонується визначати наступним чином

$$B^+(\lambda_{io}; \beta_{zp}) = \max_{\lambda_i \in \lambda} B^+(\lambda_i; \beta_{zp}),$$

де

$$B^+(\lambda_i; \beta_{zp}) = \sum_{\xi \in 1}^n \beta_{\xi} f_{i\xi}^+ = M(F_i^+).$$

Оптимальне рішення  $\lambda_{io}$  для умов, коли  $F = F^-$ , пропонується визначати наступним чином

$$B^-(\lambda_{io}; \beta_{zp}) = \max_{\lambda_i \in \lambda} B^-(\lambda_i; \beta_{zp}),$$

де

$$B^-(\lambda_i; \beta_{zp}) = \sum_{\xi \in 1}^n \beta_{\xi} f_{i\xi}^- = M(F_i^-).$$

На нашу думку, доцільність побудови системи оцінки економічних ризиків з урахуванням впливу геомеханічних порушень необхідно виконувати на основі статистичних числових характеристик ризику з урахуванням прогнозованого вагового коефіцієнта комплексної оцінки одержання максимального довгострокового прибутку для умов залізородних шахт Кривбасу.

Авторами проведено короткий аналіз можливості застосування спеціалізованого програмного забезпечення для рішення вищезазначених задач.

На сьогодні існує більше десятка інтегрованих геоінформаційних систем (ГІС) (табл. 1), які надають користувачу досить широкий набір функцій:

– проектування відкритих і підземних гірничих робіт;

– календарне планування розвитку родовища і контроль виконання плану;

– маркшейдерські розрахунки та побудова геологічних розрізів;

– керування й адміністрування баз даних, збір техніко-економічної інформації;

– геостатистична обробка інформації та її аналіз, 3D моделювання геологічних об'єктів і поверхонь, оцінка запасів корисних копалин.

Більшість інформаційних систем працює з різними операційними системами (Windows, Linux, FreeBSD, Mac OS) та на різних платформах, а також взаємодіє з

широкоформатними плотерами, сканерами тощо. Такі ГІС надають користувачу величезний набір інструментів, проте мають досить високу вартість (10 – 80 тис. дол. США).

Особливої уваги заслуговує ГІС вітчизняного виробництва K-MINE. Ця інформаційна система призначена для моделювання розподілених у просторі даних. Система забезпечує їх збір, збереження, обробку, візуалізацію та аналіз. ГІС K-MINE експлуатується на підприємствах гірничої промисловості (ІнГЗК, Полтавський ГЗК, ПівдГЗК) вже понад 10 років і отримала позитивні відгуки проектних організацій.

*НАЙБІЛЬШ ПОШИРЕНІ ГІС У ГАЛУЗІ ПРОЕКТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ РОДОВИЩ  
КОРИСНИХ КОПАЛИН*

*Таблиця 1*

Розробник	Програмний продукт	Офіційний web-сайт
Maptek Pty Ltd (Австралія)	Vulcan, MineSuite	www.maptek.com
Micromine Pty Ltd (Австралія)	Micromine	www.micromine.com
Mincom Pty Ltd (Австралія)	Minescape, Ellipse, MineStar	www.mincom.com
Gemcom Software International Inc. (Канада)	Surpac, GEMS, Minex	www.gemcomsoftware.com
Mintec, Inc. (США)	MineSight	www.minesight.com
Datamine Corporate Limited (Великобританія)	Datamine	www.datamine.co.uk
Гірничий інститут КНЦ РАН (Росія)	Mineframe GeoTech-3D	www.mineframe.ru
НВП «Кривбас-академінвест» (Україна)	K-Mine	www.kai.com.ua

ГІС російського виробництва MineFrame призначена для комплексного розв'язання широкого кола геологічних, маркшейдерських і технологічних задач, які зустрічаються в практиці роботи ГЗК, наукових і проектних організацій. Система містить великий набір інструментів, які дозволяють працювати з тривимірними моделями об'єктів гірничої технології. Серед них геологічні зразки, рудні тіла і пласти, маркшейдерські точки, гірничі виробки, конструктивні елементи і вузли систем кар'єрної розробки, проектування відвалів. При розробці системи MineFrame були застосовані сучасні засоби складної інформаційно-пошукової системи, які ґрунтуються на клієнт-серверних технологіях

взаємодії з локальними та віддаленими БД, математичних методах обробки геологічної інформації.

Зарубіжні розробки в сфері автоматизації гірничих робіт Datamine, Micromine, Vulcan, Gemcom вирізняються з-поміж інших досить високою вартістю та мають подібний набір функціональних можливостей.

Наприклад, ГІС Vulcan (Австралія) має інструменти для моделювання родовищ нафти та газу, геомеханічних розрахунків стійкості ботів кар'єрів і відвалів, моделювання екологічної ситуації тощо. Практично всі вищезазначені системи є досить ресурсоемними і потребують сучасних графічних прискорювачів, оскільки для візуалізації використовують технології DirectX

та OpenGL, накладання текстур, освітлення й інших візуальних ефектів. У цілому ГІС використовують добре формалізовані задачі з візуалізації, проектування та мають суттєві обмеження на відміну від інтелектуальних СКІП та ЕС (набуття нових знань, прогнозування та ін.).

Останні 4 – 5 років характеризуються особливо інтенсивним розвитком ГІС із відкритим програмним кодом. Серед них можна відзначити такі системи, як Geographic Resources Analysis Support System, Quantum GIS, User-friendly Desktop Internet GIS, System for Automated Geoscientific Analyses, MapWindow GIS. Ці системи користуються певною популярністю, вільні для розповсюдження. Крім того, ГІС з відкритим програмним кодом, як правило, досить вузькоспеціалізовані і потребують певного циклу планування та проектування робіт.

У даний час існує значна кількість прикладних програм, які дозволяють визначити НДС гірського масиву [6 – 13]. До таких програм можна віднести “SolidWorks”, “Ліра”, “Ansys”, “GTSNX”, “SCAD” та ряд інших. Дані програмні комплекси дозволяють досліджувати гірський масив як для безперервно-пружного, так і пружно-пластичного середовища. Слід зазначити, що кожен програмний комплекс має низку обмежень, а також переваг і недоліків [10 – 13]. Так програмний комплекс “Ansys” виконує розрахунки з обмеженою кількістю розрахункових елементів, “SolidWorks” вирішує тільки об’ємні задачі з обмеженою

кількістю розрахункових рівнянь (не більше 10 млн шт.), “Ліра” вимагає ручного вибору форми досліджуваного елемента “TSNX” і “SCAD” призначені для рішення будівельних завдань. Останніх два програмних комплекси можливо використовувати для рішення задач у гірничій справі. При цьому необхідно вводити додаткові значення, які можливо визначити тільки дослідно-промисловими або лабораторними дослідженнями.

Для рішення задач, пов’язаних з визначенням поля напружень, деформацій масиву навколо виробленого простору, можна виділити наступні програмні комплекси “SolidWorks”, “Ліра”, “Ansys”. Виконані розрахунки за розглянутими вище програмними комплексами показали хорошу збіжність отриманих результатів досліджень.

За допомогою вибраних програмних комплексів було виконано моделювання НДС і деформацій ділянки масиву у прив’язці до умов шахт «Комунар» та «Гігант-Глибока» ПАТ «ЦГЗК» колишнього рудника ім. Держинського від денної поверхні до глибини 580 м та за простяганням 290 м, де у поверсі 380 – 300 м взято 2 камери шириною по 30 м та міжкамерно-го цілика такої ж ширини.

Моделювання було виконане для двох випадків: у першому обидві камери були порожніми, а у другому їх було заповнено твердіючою закладкою. Фізико-механічні та пружні властивості гірських порід і матеріалу закладки, використані при моделюванні, наведено у табл. 2.

*ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ ТА МАТЕРІАЛУ ЗАКЛАДКИ*

*Таблиця 2*

Параметр	Модуль Юнга, МПа	Питома вага, кг/м <sup>3</sup>	Межа міцності та розтяг, МПа	Межа міцності та стиск, МПа	Коефіцієнт Пуассона
Порода	50000	3400	14	140	0,25
Закладка	500	2000	0,2	2	0,15

Розрахунок кожного з розглянутих випадків на комп’ютері Intel Core i3-3110M

(2,4 ГГц) з 4 ГБ оперативної пам’яті тривав близько 30 хв.

На рис. 1 наведено ізолінії поля напружень навколо порожніх відпрацьованих камер (а) та заповнених твердіною закладкою (б).

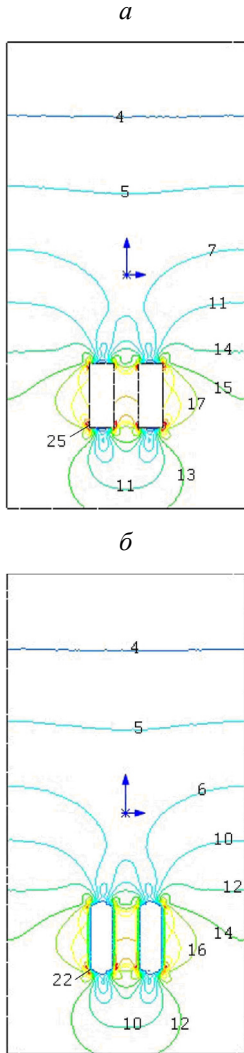


Рис. 1. Ізолінії напружень: а – порожні камери, б – камери із закладкою; 4, 5, 6 – максимальні стискні напруження, МПа

З рис. 1 видно, що загальна картина розподілу поля напружень є класичною: у кутових зонах камер спостерігається концентрація стискних напружень (у незакла-

дених камерах – у верхніх та нижніх кутах камер, у закладених – тільки в нижній їх частині), а зона понижених напружень приурочена до покрівлі та бічних стінок камер. При цьому абсолютні значення діючих напружень є значно більшими при незакладених камерах, але вони за своєю величиною є дуже далекими від критичних значень, які можуть спричинити руйнування масиву. Наприклад, максимальні стискні напруження у нижніх кутах незакладених камер становлять 22 – 25 МПа при межі порід на стиск у 140 МПа, тобто їх величина складає всього 16 – 18% від критичних значень. Стосовно деформацій гірського масиву в контрольних точках, то картина є дещо іншою: при незакладених камерах на рівні їх покрівлі деформації складають 78 мм, а на денній поверхні 133 мм.

У випадку заповнення камер твердіною закладкою ці деформації у вищевказаних контрольних точках є дещо меншими й становлять відповідно 66 та 103 мм.

Таку відносно невелику різницю у деформаціях можна пояснити тим, що в умовах, коли камери є стійкими й мають значний коефіцієнт запасу міцності, деформації відрізняються несуттєво, оскільки зміщення первісного контуру камери як порожньої, так і заповненої твердіною закладкою (але після деякого періоду їх існування без закладки) є незначним. Ця різниця була б значно більшою, якщо стійкість камер була б невеликою, що спричинило спочатку значно більші деформації масиву та денної поверхні над ними, що згодом могло би призвести й до їх руйнування.

## ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день існує чимало потужних програмних продуктів для забезпечення проектування гірничих робіт відкритої та підземної розробки. Детальний аналіз функціональних можливостей ГІС показав, що чимало задач аналізу напружено-деформованого стану гірського масиву можуть бути ефективно вирішені з застосу-

вання сучасних інформаційних технологій.

Вибрані методи чисельного моделювання та програми для дослідження складних геомеханічних процесів у гірських масивах дають можливість прогнозувати розвиток їх НДС, визначати можливі деформації у заданих точках, які найбільше цікавлять дослідників, тобто такі сучасні інформаційні технології можуть бути складо-

вою частиною моніторингу за розвитком процесу зрушень відпрацьованого гірського масиву.

Наступним кроком планується дослідження поля напружень вже не окремих елементів, а найбільш проблемних ділянок Кривбасу у більших масштабах для моніторингу та керування процесами взаємодії полів напружень при веденні гірничих робіт.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Stupnik N. Parameters of shear zone and methods of their conditions control at underground mining of steep-dipping iron ore deposits in Kryvyi Rig basin / N. Stupnik, V. Kalinichenko // *Geomechanical Processes During Underground Mining*. – The Netherland: CRC Press/Balkema, 2012. – P. 15 – 19.

2. Ступнік М.І. Економічна оцінка ризиків можливих геомеханічних порушень денної поверхні в полях шахт Кривбасу / М.І. Ступнік, О.В. Калініченко, В.О. Калініченко // *Науковий вісник НГУ*. – 2012. – № 6. – С. 126 – 130.

3. Ступнік Н.И. Проблемы мониторинга дневной поверхности в полях закрытых и действующих шахт Криворожского железорудного бассейна / Н.И. Ступнік, В.А. Калиниченко // *Збірник наукових праць Науководослідного гірничорудного ін-ту Криворізького національного ун-ту*. – 2013. – № 54. – С. 17 – 22.

4. Скіпочка С.І. Фізико-технічні основи механоелектричного методу контролю властивостей і діагностики напружено-деформованого стану масиву гірських порід: дис. ... доктора техн. наук: 05.15.11 / Скіпочка Сергій Іванович. – Д., 2000. – 307 с.

5. Калініченко О.В. Визначення сутності поняття комплексної системи економічної оцінки геомеханічних ризиків / О.В. Калініченко // *Науковий вісник НГУ*. – 2010. – № 3. – С. 100 – 102.

6. Buskov E. The calculation of stress intensity factors using the finite element method with cracked elements / E. Buskov //, *Int. J. Fract. Mech*, 6. – 1970. – P. 159 – 167.

7. Tracey D.M. Finite elements for determination of crack tip elastic stress, intensity factors / D.M. Tracey // *Eng. Fract. Mech*. – 1971. – Vol. 3. – P. 255 – 265.

8. Walsh P.F. The computation of stress intensity factors by a special finite element technique / P.F. Walsh // *Int. J. Solids and Struct*. – 1971. – Vol. 7. – P. 1333 – 1342.

9. Small scale yielding near a crack in plane strain. A finiteelement analysis / N. Levy, P. Marcal, W. Ostergren [etc.] // *Int. J. Fract. Mech*. – 1971. – Vol. 1. – P. 143 – 156.

10. <http://www.solidworks.com>

11. <http://www.ansys.com>

12. <http://www.migasgtsns.com>

13. <http://www.scadsoft.com/products/scad>

## ПРО АВТОРІВ

Ступнік Микола Іванович – в.о. ректора Криворізького національного університету, д.т.н., професор кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин.

Калініченко Всеволод Олександрович – д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин Криворізького національного університету.

Калініченко Олена Всеволодівна – к.е.н., доцент кафедри менеджменту і адміністрування Криворізького національного університету.

Музика Іван Олегович – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету.

Федько Михайло Борисович – к.т.н., доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин Криворізького національного університету.

Письменний Сергій Васильович – к.т.н., доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин Криворізького національного університету.