



СТУПНІК

Микола Іванович —
член-кореспондент НАН
України, доктор технічних наук,
професор, ректор Криворізького
національного університету

ГЕОМЕХАНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РУДОВИДОБУТКУ У КРИВОРІЗЬКОМУ ЗАЛІЗОРУДНОМУ БАСЕЙНІ

За матеріалами доповіді на засіданні
Президії НАН України 10 вересня 2025 року

У доповіді наголошено на стратегічній важливості для України комплексу виробництв, пов'язаних із видобутком залізорудної сировини на унікальному Криворізькому родовищі залізних руд. Науково-дослідні, дослідно-конструкторські та проєктні роботи в галузі геомеханічного забезпечення підземних і відкритих гірничих робіт у цьому регіоні, а також розроблення інженерно-технічних заходів із мінімізації негативних наслідків видобутку є одними з пріоритетних напрямів діяльності наукових установ відповідного профілю.

Роль Криворізького басейну в економічному потенціалі країни. Промисловий видобуток залізних руд у Криворізькому залізорудному басейні розпочався з 1881 р. Максимальних обсягів видобутку залізорудної сировини було досягнуто в 1970-х — 1980-х роках — тоді щороку вилучали близько 120 млн т руди, що зробило Кривбас одним із найбільших у світі діючих залізорудних басейнів. Сучасне виробництво залізорудної сировини в Україні характеризується значними коливаннями, спричиненими як зовнішніми факторами, так і загальними тенденціями на глобальному ринку. Динаміку виробництва залізорудної сировини за останні десять років наведено на рис. 1.

Слід зазначити, що в загальному обсязі залізорудної сировини, яку видобувають гірничодобувні підприємства в Україні, частка Кривбасу становить близько 80 %, причому приблизно 30 % цієї сировини видобувають підземним способом.

В огляді глобального ринку мінеральної сировини за 2025 р.¹, представленому Геологічною службою США, наведено рейтинг

¹ U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. January 2025.
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>

країн світу за розвіданими запасами залізної руди, в якому Україна посідає 5-те місце (6,5 млрд т запасів), поступаючись лише Австралії (58 млрд т), РФ (35 млрд т), Бразилії (34 млрд т) і Китаю (29 млрд т). Водночас за обсягами видобутку залізорудної сировини Україна (42 млн т) перебуває на 10-му місці після Австралії (930 млн т), Бразилії (440 млн т), Китаю (270 млн т), Індії (270 млн т), Росії (91 млн т), Ірану (90 млн т), Південної Африки (66 млн т), Канади (54 млн т) і США (48 млн т).

У довоєнному 2021 р. експорт залізної руди забезпечував значну частку валютних надходжень в Україну (\$6,91 млрд)². У воєнному 2024 р. валютні надходження від експорту залізорудної сировини зменшилися майже в 2,5 раза і становили \$2,8 млрд³, однак це забезпечило близько 7 % ВВП України та 15 % загального валютного експорту.

Отже, незважаючи на всі труднощі воєнного часу, залізорудна сировина залишається одним з основних джерел надходжень валюти в Україну та надійним підґрунтям економіки.

Особливості геологічної і тектонічної будови Криворізького залізорудного басейну, елементів залягання руд і вміщуючих порід та їхніх фізико-механічних властивостей. Досить ретельне й глибоке вивчення геології Криворізького залізорудного басейну провів ще у першій половині ХХ ст. Едуард Карлович Фукс, але найбільший обсяг геологічних досліджень Кривбасу було виконано після Другої світової війни під керівництвом відомого українського геолога академіка НАН України Якова Миколайовича Белівцева.

На рис. 2 наведено схематичну геологічну карту Кривбасу.

Дослідження Криворізького залізорудного басейну [1, 2] дали змогу встановити диференційований характер сучасних тектонічних рухів. Вивчення змін рельєфу денної поверхні здійснювали на прикладі Інгульського і Саксаганського блоків, розділених зоною Криво-

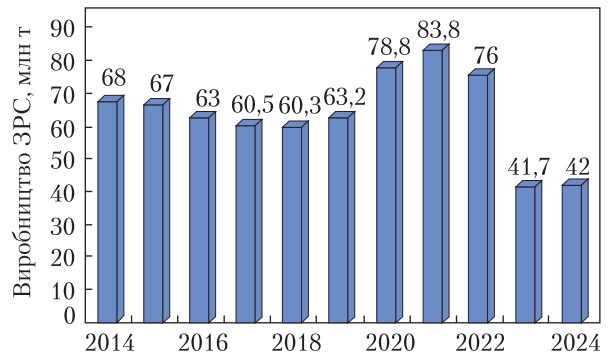


Рис. 1. Виробництво залізорудної сировини в Україні в 2014—2024 рр. (за даними Геологічної служби США)

різько-Кременчуцького глибинного розлому, в межах якого розташовані основні поклади залізних руд.

Згідно з результатами геолого-геодезичних досліджень, район Криворізького залізорудного басейну характеризується підвищеною тектонічною активністю [3, 4]. На карті швидкостей сучасних вертикальних рухів земної кори Східної Європи, опублікованій у 1958 р., швидкості підйому в цьому регіоні оцінювали в +10 мм/рік. Потім, після проведення додаткових досліджень, цю величину зменшили до +8,6 мм/рік. У 1968—1972 рр. з метою уточнення швидкостей підняття земної поверхні в районі Криворізько-Кременчуцького розлому було здійснено повторне нівелювання за двома профілями державного нівелювання II класу: Високопілля — Апостолове — Довгинцеве — П'ятихатки — Користівка і Довгинцеве — Долинська [5]. Для вузлових пунктів цих профілів отримано такі значення швидкостей (мм/рік): Користівка — +5,1±1,7; Долинська — +4,2±1,4; Апостолове — +4,5±1,5; Довгинцеве — +3,2±1,5.

Отже, вплив тектонічного фактора в Криворізькому залізорудному басейні досить слабкий, проте його варто враховувати в прогнозуванні загальної картини поведінки денної поверхні, незважаючи на досить незначні абсолютні коливання отриманих величин.

Втім, гірничі роботи істотно позначаються на деформації земної поверхні, осідання якої

² Державний інформаційно-аналітичний центр моніторингу зовнішніх товарних ринків. 17.01.2022. <https://surl.li/sywoxp>

³ Forbes Ukraine. 13.01.2025. <https://surl.li/hegtwx>

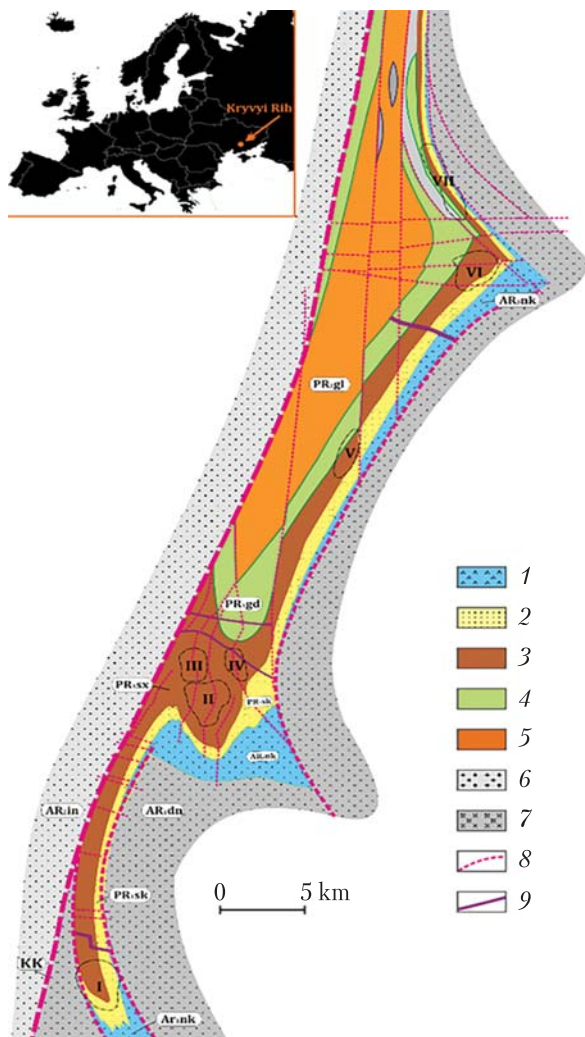


Рис. 2. Схематична геологічна карта Кривбасу:

1 — породи новокриворізької світи;
 2 — породи скелеватської світи, що включають пласт талькових сланців;
 3 — породи саксаганської світи;
 4 — породи гданцівської світи;
 5 — породи глеюватської світи;
 6 — саксаганські плагіограніти;
 7 — інгулецькі мігматити;
 8 — розривні порушення;
 9 — діабазові дайки;
 КК — Криворізько-Кременчуцький глибинний розлом.

Римськими цифрами позначено кар'єри з видобутку залізної руди:

I — кар'єр Інгулецького гірничозбагачувального комбінату;
 II — кар'єр Південного гірничозбагачувального комбінату;
 III і IV — кар'єри Гірничого департаменту «Арселор-Міттал Кривий Ріг»;
 V — кар'єр Центрального гірничозбагачувального комбінату;
 VI — Першотравневий кар'єр Північного гірничозбагачувального комбінату;
 VII — Ганнівський кар'єр Північного гірничозбагачувального комбінату

зафіксовано на відстані 4,5 км від місця розробки родовищ. Швидкість осідання земної поверхні з висячого боку родовища поширюється на периферію від місця проведення гірничих робіт за логарифмічною залежністю.

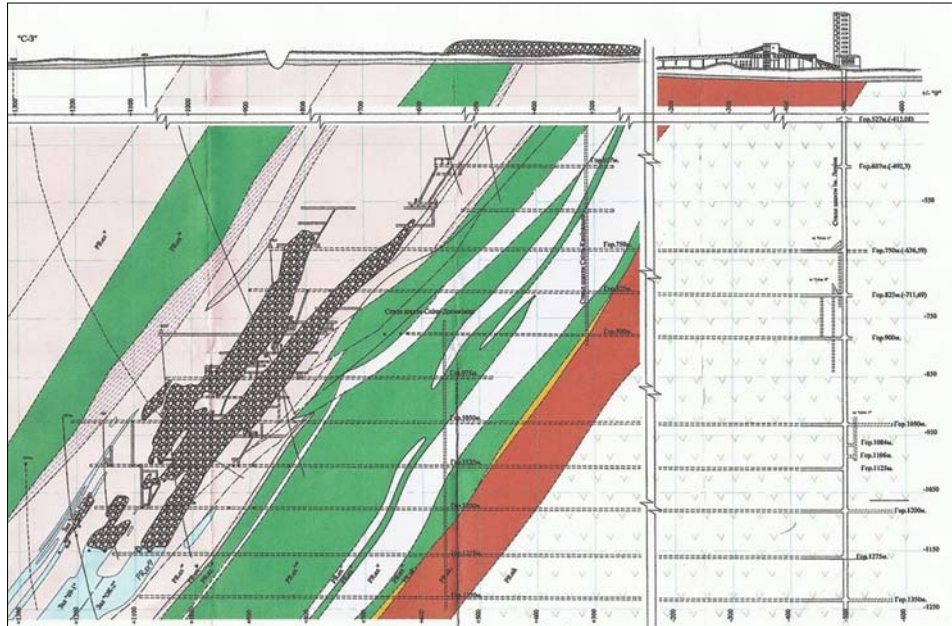
З огляду на досить значні обсяги підземного видобутку залізних руд з надр і перерозподіл напружено-деформованого стану масиву внаслідок підземного видобутку сумарний вплив тектонічного і технологічного факторів на характер порушень денної поверхні може бути досить відчутним.

Криворізькі багаті руди за своїми фізичними властивостями дуже різноманітні — від міцних кускових до порошкоподібних, пухких.

Їхня пористість перебуває в межах 18—25 %, об'ємна маса коливається від 3,3 до 3,8 т/м³, масова частка води становить 4,0—4,5 %. Поклади магнетитових і окиснених залізистих кварцитів мають потужність до 100—200 м, зрідка до 500 м, вміст оксидів заліза в руді — від 15 до 46 %, фосфору — від 0,03 до 0,16 %, сірки — від 0,02 до 0,24 %.

До якості залізорудної продукції, що експортується до Західної Європи, висувають досить високі вимоги, оскільки переважною тенденцією металургійного виробництва в цьому регіоні є пряме відновлення заліза в рудах, минаючи доменний процес. Через те, що 98,5 % залізорудної сировини використовують для

Рис. 3. Схема розкриття рудного родовища шахти «Тернівська»



потреб чорної металургії, вимоги до якості залізних руд визначаються вимогами до сталі, чавуну, а також технологічними особливостями сталеплавильного виробництва. Тому для експорту в європейські країни мінімальна масова частка заліза в руді залежно від призначення має становити від 69,5 до 72 %, фосфору — від 0,015 до 0,04 %, сірки — від 0,015 до 0,06 %.

Глибина розробки як основний фактор впливу на величину гірського тиску та зміну напружено-деформованого стану масиву. На сьогодні основною проблемою гірничодобувних підприємств України є погіршення гірничо-геологічних умов відпрацювання родовищ, що спричинено збільшенням глибини видобутку корисних копалин.

У разі відкритого способу розробки родовищ збільшення глибини видобутку корисних копалин приводить до збільшення глибини кар'єрів, що з геомеханічної точки зору пов'язано зі зниженням стійкості їхніх бортів. Підвищення безпеки гірничих робіт можна досягти зменшенням кута нахилу укосів бортів, але це збільшує геометричні розміри кар'єрів та відвалів, що погіршує екологічний стан природного середовища. В разі підземного способу видобутку збільшення глибини розробки

родовищ приводить до підвищення гірського тиску та змінення напружено-деформованого стану гірського масиву, що потребує постійного вдосконалення геомеханічного забезпечення ефективності технологічних процесів рудовидобутку, особливо на шахтах з глибинами видобутку понад 1500 м.

У Криворізькому басейні видобуток багатих залізних руд підземним способом здійснюють АТ «Криворізький залізорудний комбінат», шахтоуправління з підземного видобутку руди ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Суха Балка». Розробку магнетитових кварцитів підземним способом на шахті ім. Колячевського здійснює ПрАТ «Центральний ГЗК».

Родовище залізних руд Кривбасу простягається з півдня на північ більш ніж на 100 км. Значну частину запасів багатих залізних руд розвідано до глибини 2000—2500 м, а балансові запаси багатих залізних руд підземного видобутку залягають до глибини 1700—2300 м. Як приклад на рис. 3 наведено схему розкриття рудного родовища шахти «Тернівська» ПрАТ «Кривбасзалізрудком» до горизонту 1350 м та до прогнозованих горизонтів 1425 і 1500 м.

Криворізькі шахти є найглибшими в Україні. Більше того, Україна є єдиною країною у світі,

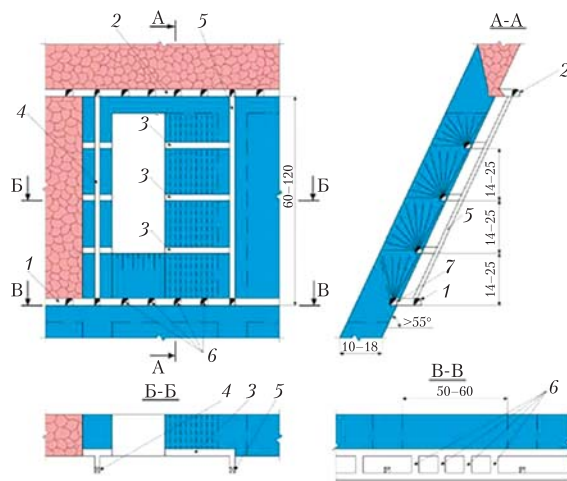


Рис. 4. Поверхово-камерна система розробки: 1 — відкотний штрек; 2 — вентиляційний штрек; 3 — бурові штреки; 4, 5 — блокові вентиляційно-ходові підняття штреки; 6 — навантажувальні заходки; 7 — траншейний штрек

яка здійснює видобуток залізорудної сировини середньої цінності на глибинах понад 1000 м, а тому проблеми, які виникають під час відпрацювання залізних руд на таких глибоких горизонтах, доводиться вирішувати вперше.

Слід зазначити, що вивченням надр Кривбасу та проблемами геомеханічного забезпечення ефективності гірничих робіт займалися різні вітчизняні наукові установи: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (акад. НАН України А.Ф. Булат [6], чл.-кор. НАН України К.В. Бабій, професор М.С. Четверик [7, 8]), Інститут геологічних наук НАН України (акад. НАН України Я.М. Белевцев), Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України (акад. НАН України О.М. Пономаренко), Криворізький національний університет (колишній Криворізький гірничорудний інститут) (акад. НАН України Г.М. Малахов [9]), Науково-дослідний гірничорудний інститут (д.т.н. В.В. Цариковський [6], д.т.н. І.Д. Рівкін), Академія гірничих наук України (професори В.Ф. Бизов і Ю.Г. Вілкул) та ін.

Геомеханічні дослідження в межах Криворізького залізорудного басейну дали змогу

встановити, що величина і характер зрушення гірських порід та земної поверхні в процесі розробки рудних родовищ залежать як від гірничо-геологічних, так і від технологічних факторів. До першої групи факторів належать глибина розробки, потужність рудних покладів, кут падіння, міцність і тріщинуватість гірських порід, до другої групи — застосовувана технологія, форма і розміри очисного простору, параметри буровибухових робіт, використання того чи іншого обладнання тощо.

Дослідження стійкості конструктивних елементів підземних рудників і залізорудних кар'єрів. З геомеханічної точки зору слід відрізнити підземне відпрацювання багатих залізних руд від підземного відпрацювання бідних залізних руд.

Багаті залізні руди в Кривбасі відпрацьовують на глибинах 1100—1300 м в умовах високого гірського тиску і досить низького впливу на денну поверхню. На рис. 4 наведено один із варіантів поверхово-камерної системи розробки для видобутку багатих залізних руд.

Бідні залізні руди, якими є магнетитові кварцити, навпаки, відпрацьовують на глибинах від 200—300 м в умовах помірного гірського тиску та істотного впливу на денну поверхню. Для оцінки впливу підземного видобутку магнетитових кварцитів на стан денної поверхні в Криворізькому басейні та з метою з'ясування можливостей комп'ютерного моделювання складних геомеханічних процесів у гірському масиві було проведено дослідження ділянки гірничого відводу шахти «Гігант-Глибока» колишнього рудоуправління ім. Дзержинського.

Наприкінці минулого століття шахта «Гігант-Глибока» почала відпрацювання магнетитових кварцитів у поверхнях 300—380 м, 460—540 м, 630—710 м. До ліквідації шахта встигла відпрацювати понад 40 очисних камер сумарним обсягом кілька мільйонів кубічних метрів. Відпрацювання магнетитових кварцитів здійснювали за технологією «камера-цілик». Очисний простір камер першої черги планували заповнювати твердіючою закладкою. Надалі передбачалося відпрацювання камер другої черги (ціликів) з подальшим їх закладанням

комбінованими закладними сумішами. Після ліквідації рудоуправління ім. Дзержинського і закриття шахти «Гігант-Глибока» відпрацьовані камери з відкритим очисним простором законсервували, і на сьогодні вони є досить проблемною геоструктурою.

Для визначення закономірностей трансформації напружено-деформованого стану масиву було проведено дослідження ділянки шахтного поля шахти «Гігант-Глибока» довжиною по простяганню понад 2,1 км і глибиною по падінню до 900 м. Розрахунки напружень та деформацій здійснювали методом скінченних елементів на базі програмного комплексу Ansys 16.0. Моделювання виконано для двох випадків: у першому всі відпрацьовані камери тривалого консервування є порожніми (це їхній актуальний стан), а в другому — всі камери заповнено твердіючою закладкою.

Для побудови епюр напружень і деформацій методом скінченних елементів 3D-модель було розбито на чотирикутники з розміром кожної зі сторін 3 м. На рис. 5а наведено результати розрахунків та епюри деформацій гірського масиву з відпрацьованими порожніми камерами першої черги, а на рис. 5б — результати розрахунку та епюри деформацій з камерами, заповненими твердіючою закладкою. Для коректного аналізу і узагальнення результатів досліджень на епюрах деформації комбінованого масиву визначено контрольні точки фіксування величини деформацій.

За результатами розрахунку та ізолініями головних напружень гірського масиву з відпрацьованими пустими камерами першої черги тривалого консервування встановлено основні закономірності розвитку напружено-деформованого стану масиву. Зі збільшенням глибини відпрацьовання величина максимальних напружень прогресивно зростає, досягаючи значень 27—29 МПа в кутах очисних камер у центрі відпрацьованої ділянки шахтного поля.

Оскільки природна міцність магнетитових кварцитів загалом досить висока, вибрані параметри камер і ціликів тривалого консервування мають забезпечити їх стійкість протягом

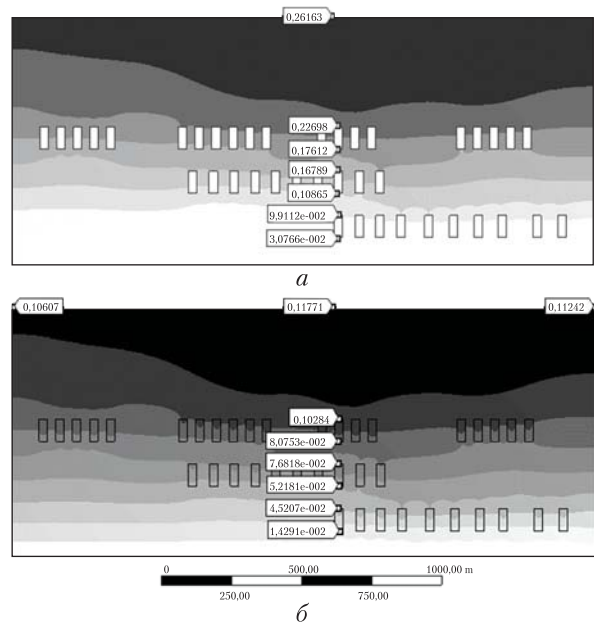


Рис. 5. Результати розрахунку та епюри деформацій з числовими значеннями вертикальних зміщень (м) у контрольних точках гірського масиву з відпрацьованими камерами першої черги тривалого консервування: а — пустими; б — заповненими твердіючою закладкою

тривалого часу. На сьогодні цей висновок підтверджується самим їх існуванням у консервованому вигляді впродовж багатьох років. Однак недостатня вивченість реологічних властивостей масиву гірських порід і досвід шахти ім. Колачевського ПрАТ «Центральний ГЗК», де 13 червня 2010 р. одразу після планових підричних робіт почалося інтенсивне обвалення денної поверхні, дає підстави з обережністю прогнозувати період стійкого існування такої складної підземної штучної структури.

Аналіз побудованих методом скінченних елементів епюр поля напружень гірського масиву з камерами, заповненими твердіючою закладкою, дав змогу встановити, що рівень напружень у ціликах і навколишньому масиві на 16—22 % менший за рівень напружень у навколишньому масиві з камерами з відкритим очисним простором.

Визначені величини напружень узгоджуються з відповідними деформаціями в дослі-

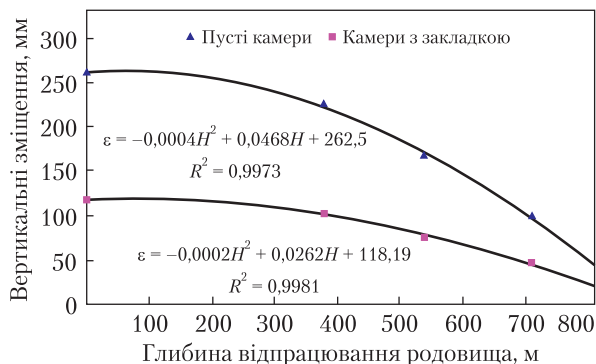


Рис. 6. Залежність величини деформацій денної поверхні і гірського масиву від глибини розробки родовища за різних станів очисних камер



Рис. 7. Обвалення денної поверхні в зоні гірничого відводу шахти ім. Колачевського



Рис. 8. Обвалення денної поверхні в селітебній зоні центру міста (гірничий відвід колишнього рудника ім. Ілліча)

джуваних комбінованих масивах. Як видно з рис. 5а, максимальний рівень вертикальних зміщень на денній поверхні при трансформації відпрацьованих камер з відкритим очисним простором становить близько 260 мм. Отримані значення «просідань» денної поверхні над місцями ведення підземних гірничих робіт узгоджуються з результатами інструментальних спостережень за вертикальними зміщеннями денної поверхні, виконаними в регіоні Кривбасу професором О.Є. Куліковською [5]. При цьому час є одним із ключових факторів, який зумовлює збільшення деформацій і призводить до подальшого опускання земної поверхні на цій ділянці.

Максимальний рівень вертикальних зміщень унаслідок трансформації відпрацьованих камер, заповнених твердіючою закладкою, спостерігається на денній поверхні в центрі відпрацьованого шахтного поля і досягає 118 мм, що в 2,2 раза менше, ніж деформації денної поверхні внаслідок впливу відпрацьованих камер із відкритим очисним простором.

На рис. 6 наведено графік залежності величини деформацій денної поверхні і гірського масиву від глибини розробки родовища за різних станів очисних камер.

Вплив колишніх підземних розробок на денну поверхню Кривбасу. Геомеханічні дослідження Криворізького залізничного басейну дозволили визначити одну з основних проблем — збереження денної поверхні в полях відпрацьованих, законсервованих і діючих шахт Криворізького басейну. Ця проблема стала фактично одночасно з початком підземної розробки залізних руд у Кривбасі.

Унаслідок тривалої та інтенсивної експлуатації залізничних родовищ підземним способом у земній корі утворилися великі порожнини, які негативно впливали на денну поверхню. Площі підроблених гірничими роботами територій постійно збільшувалися, спричиняючи обвали земної поверхні, локальні зсуви, появу вирв і провалів денної поверхні. Такі порушення земної поверхні зумовлені насамперед застосуванням під час підземних гірничих робіт різних варіантів камерних систем розробки, а

також технологій очисних робіт з масовим обваленням руди і вміщуючих порід.

У майбутньому значні проблеми можуть виникнути в зоні підземної розробки магнетитових кварцитів за технологією «камера-цілик» на вищих горизонтах шахт. Застосування цієї технології призвело до формування в надрах величезної кількості пустот, обсяг яких сягає мільйонів кубічних метрів. Через можливість їх обвалення ці порожнини становлять потенційну небезпеку. Розрахункові характеристики теоретично гарантують їхню стійкість, проте практика іноді спростовує теорію. Зокрема, як уже зазначалося вище, у 2010 р. на шахті ім. Колачевського після проведення планових підривних робіт відбулося раптове обвалення денної поверхні в зоні гірничого відводу шахти в маркшейдерських осях (–37)–(45). Загальна площа обвалу становила 16,5 га (рис. 7).

На жаль, такі явища не є винятком для Криворізького залізорудного басейну (рис. 8), що підтверджують статистичні дані за період від 1963 р. і дотепер щодо негативних явищ, які сталися на денній поверхні в зонах гірничого відводу шахт Кривбасу [10]:

- загальна кількість зсувів, обвалів на денній поверхні в зонах гірничого відводу — 29;
- площа зрушень гірських порід над відпрацьованим простором — 3,47 тис. га;
- питома площа змінень денної поверхні басейну (зсуви, провали) — 42 %;
- кількість провалів денної поверхні, внесених до регіонального кадастру, — 7.

Практика і накопичений досвід роботи гірничодобувних підприємств свідчать, що витрати сьогодні на реалізацію заходів із запобігання можливим надзвичайним ситуаціям значно нижчі, ніж витрати на їх ліквідацію в майбутньому.

Найбільш ефективним способом мінімізації можливості провалів і просідань денної поверхні в межах шахтних полів Кривбасу є впровадження на шахтах басейну систем розробки із закладкою виробленого простору, передусім із твердіючою закладкою. Зрозуміло, що застосування таких технологій приводить до певного підвищення собівартості видобутку,

але в довгостроковій перспективі забезпечить економію коштів завдяки збереженню денної поверхні і підвищенню безпеки для жителів агломерацій Кривого Рогу. Тим більше, що в Україні є досвід відпрацювання залізорудних покладів підземним способом з твердіючою закладкою очисних камер на Запорізькому залізорудному комбінаті.

Дослідження і обґрунтування оптимальних кутів бортів кар'єрів та відвалів. Левову частку видобутку залізорудної сировини забезпечують кар'єри гірничозбагачувальних комбінатів басейну: Інгuleцького, Південного, Центрального, Північного та гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

З метою зменшення обсягів розкривних порід важливим є обґрунтування граничних кутів нахилу бортів з одночасним забезпеченням необхідного запасу їхньої стійкості. Для цього фахівці постійно вдосконалюють методики розрахунків та способи спостереження за станом гірського масиву. Проектні параметри бортів деяких залізорудних кар'єрів України наведено в таблиці.

Проектні параметри бортів залізорудних кар'єрів України

Найменування об'єктів		Параметри бортів	
Кар'єр, ГЗК	Борт кар'єру	Висота, м	Кут нахилу, °
Кар'єр, ПАТ «ІнГЗК»	Північний	435	38
	Східний	435	38
	Південний	435	36
Кар'єр, ПАТ «ПівдГЗК»	Північний	515	35
	Східний	475	34
	Південний	443	18
	Західний	503	31
Кар'єр № 1, ПАТ «ЦГЗК»	Північний	512	28
	Східний	495	33
	Західний	450	35
Кар'єр, ПАТ «ПівнГЗК»	Південно-західний	400	30
	Північно-східний	400	35
	Північно-західний	402	35
Кар'єр, ПАТ «ПолГЗК»	Північний	391	32
	Східний	296	32
	Південний	300	33

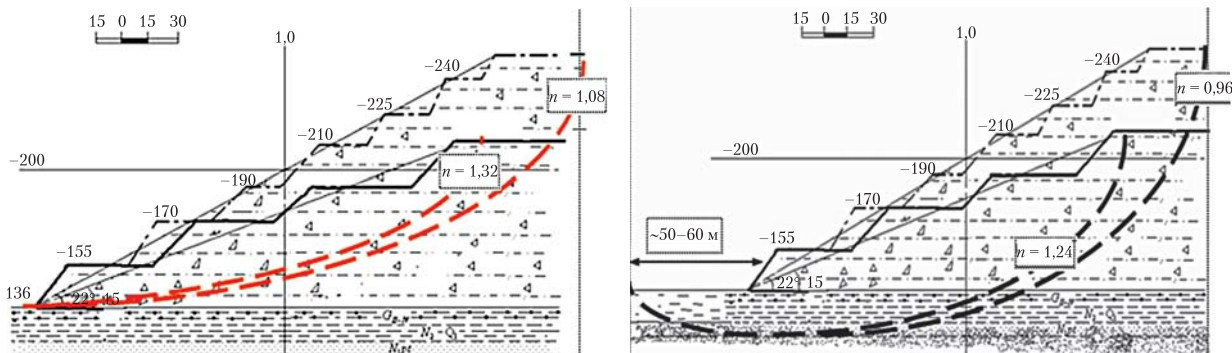


Рис. 9. Розрахункові схеми для визначення стійкості зовнішніх відвалів кар'єру ПАТ «Північний ГЗК» для двох випадків: *а* — коли ймовірна поверхня зрушення формується тільки в тілі відвалу; *б* — коли ймовірна поверхня зрушення формується в підпідшовний зсув

Слід зазначити, що ця проблема є надзвичайно складною й багатофакторною. Для її вирішення з урахуванням значного збільшення глибин видобутку на залізрудних кар'єрах Кривбасу довелося провести такі роботи:

- вдосконалити методи розрахунку стійкості породних укосів на основі сучасних деформаційних моделей міцності гірських порід, що використовують повні діаграми їхнього деформованого стану;
- розробити методологію застосування новітніх маркшейдерсько-геодезичних GPS-систем для безперервного визначення деформованого стану відкритих гірничих виробок з метою прогнозування їхнього стійкого стану;
- розробити на основі ймовірнісних моделей і прикладної теорії надійності методи розрахунку та обґрунтування нормативів надійності стійкого стану уступів, бортів кар'єрів і відвалів;
- створити на базі сучасних обчислювальних комплексів програмні модулі для автоматизованого збору та аналізу маркшейдерсько-геодезичної інформації про деформований стан відкритих гірничих виробок і проведення на цій основі математичних розрахунків з визначення ступеня їхньої стійкості.

Визначити оптимальні для конкретних гірничо-геологічних, технічних та економічних умов кути укосу бортів кар'єру можна лише спираючись на результати детальних досліджень інженерно-геологічних умов родовища

і його структурних особливостей; фізико-механічних властивостей гірських порід; деформаційних процесів, що відбуваються в прибортових масивах під впливом різних природних і техногенних факторів. Зокрема, такий цикл досліджень було проведено на північно-східному борті Першотравневого кар'єру ПАТ «Північний ГЗК». Встановлено, що надійність стійкого стану бортів кар'єру по профільних лініях в обраному перетині змінюється в межах від 99,9 % (по корінній породі) до 91,3 % (по тріщині), а коефіцієнт запасу стійкості по тих самих поверхнях ковзання — від 7,3 (по корінній породі) до 1,2 (по тріщині).

З урахуванням деформованого стану породного масиву визначено розрахункові закономірності змінення надійності стійкого стану північно-східного борту Першотравневого кар'єру. Отримана закономірність формалізується рівняннями зв'язку виду:

$$H_p = \exp[-0,0063(e^{0,036t} - 1)],$$

$$H_p = \exp[-0,0134(e^{0,042t} - 1)].$$

Коефіцієнт кореляції цих залежностей дорівнює 0,69 і 0,89.

З урахуванням отриманих даних було визначено граничний час експлуатації досліджених гірничих виробок: для борту кар'єру в цілому — 87 місяців; для спарених уступів — 73 місяці.

Отже, за результатами проведених досліджень встановлено, що північно-східний борт

Першотравневого кар'єру в цілому та його технологічні елементи мають достатній ступінь стійкості як на сьогодні, так і на найближчий період, а оптимальні кути укосів становлять:

- для борту кар'єру в цілому (висота не більш як 400 м) — 42,8°;
- для спарених уступів нижче рудного тракту (висота не більш як 120 м) — 46,7°.

Дослідження стійкості зовнішніх відвалів кар'єру ПАТ «Північний ГЗК» виконано для двох випадків:

- 1) коли ймовірна поверхня зрушення формується тільки в тілі самого відвалу (рис. 9а);
- 2) коли ймовірна поверхня зрушення формується в підпідошовний зсув (рис. 9б).

При цьому коефіцієнт запасу стійкості відвалу визначали як за наявних параметрів (висота, кут укосу), так і за очікуваного збільшення цих величин після досягнення проектного контуру. Результати розрахунків показали, що за нинішніх параметрів відвалу «Західний» його стійкість не викликає побоювань (коефіцієнт запасу стійкості по поверхні ковзання в тілі відвалу — 1,32; по поверхні ковзання можливого підпідошовного зсуву — 1,24).

Висновки. В результаті тісної співпраці вчених НАН України, науковців закладів вищої освіти та фахівців видобувних підприємств встановлено, що сучасний стан сировинної бази Кривбасу та наявні технологічні можливості гарантують подальше відпрацювання унікального родовища в майбутньому.

На основі проведеного аналізу показано вплив тектонічних порушень на змінення рельєфу Криворізького залізрудного басейну.

Проаналізовано проблему збереження денної поверхні в полях відпрацьованих, законсервованих та діючих шахт Криворізького басейну. Доведено необхідність збереження природно-екологічної рівноваги в зонах промислового видобутку корисних копалин.

З метою визначення фундаментальних закономірностей і встановлення ключових залежностей трансформації напружено-деформованого стану масиву проведено дослідження ділянки шахтного поля шахти «Гігант-Глибока» довжиною по простяганню понад 2,1 км і глибиною по падінню до 900 м. Розрахунок напружень і деформацій здійснювали методом скінченних елементів на базі програмного комплексу Ansys 16.0.

Доведено, що єдиним способом забезпечити денну поверхню від провалів і просідань у межах шахтних полів Кривбасу є впровадження на шахтах басейну систем розробки з твердіючою закладкою. Крім того, ця технологія створює умови для виймання міжкамерних ціликів, що дозволить підвищити повноту вилучення корисних копалин з надр.

Встановлено, що величина максимальних вертикальних зсувів борту кар'єру на його уступах збільшується зі зростанням глибини кар'єру з 13—14 мм на верхніх горизонтах (уступах) на глибинах 30—45 м від денної поверхні до 60—63 мм на нижніх уступах на глибинах 270—300 м на дні відпрацьованого кар'єру.

Результати розрахунків величини напружень у гірському масиві дали змогу встановити ступінь і характер змінення напружень у гірському масиві під дном кар'єру.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Paranko I.S., Butyrin V.K. Fracture-blocked techtonics of the Kryvyi Rih structure. *Geological and Mineralogical Bulletin of the Kryvyi Rih National University*. 2004. (1): 5—13 [in Ukrainian].
[Паранько І.С., Бутирін В.К. Розломно-блокова тектоніка Криворізької структури. *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету*. 2004. № 1. С. 5—13.]
2. Belokrys I.S. Pseudotectonic dislocations in the Tertiary deposits of Krivoy Rog. *Nauchnyye doklady vysshey shkoly. Geologo-geograficheskiye nauki*. 1958. (4): 17—22 [in Russian].
[Белокрыс И.С. Псевдотектонические дислокации в третичных отложениях Кривого Рога. *Научные доклады высшей школы. Геолого-географические науки*. 1958. № 4. С. 17—22.]
3. Denisov A.I. Modern movements of the Earth's surface in the Krivoy Rog region and their expression in relief. *Proc. Krivoy Rog Ore Mining Institute Sci. Conf.* 1981. No. 268-281. P. 59—69 [in Russian].

- [Денисов А.И. Современные движения земной поверхности района Криворожья и их выраженность в рельефе. *Материалы научно-технической конференции КГПИ*. 1981. № 268-281. С. 59—69.]
4. Peregudov V.V., Kulikovska O.E., Sergeeva M.P. The relationship between the speeds of modern day surface movements and the features of the geological structure of the Kryvyi Rih region. *Modern Achievements of Geodesic Science and Industry*. 2004. P. 158—162 [in Ukrainian].
[Перегудов В.В., Куліковська О.Є., Сергеева М.П. Співвідношення між швидкостями сучасних рухів денної поверхні й особливостями геологічної будови Криворізького регіону. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2004. С. 158—162.]
 5. Kulikovska O.E. Conceptual principles of surveying monitoring of the safe functioning of mining regions. Dr. (Engin.) thesis. Kryvyi Rih, 2012.
[Куліковська О.Є. Концептуальні засади маркшейдерського моніторингу безпечного функціонування гірничовидобувних регіонів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.01. Кривий Ріг, 2012.]
 6. Tsarikovskiy V.V., Bulat A.F., Prikhodchenko V.P. Monitoring of Kryvbas ore destruction processes using geophysical methods to improve the efficiency of ore mining. In: *Problemy gornodobyvayushchey promyshlennosti metallurgicheskogo kompleksa Ukrainy* [Problems of the mining industry of the metallurgical complex of Ukraine]. Krivoy Rog, 1998. P. 21—24 [in Russian].
[Цариковский В.В., Булат А.Ф., Приходченко В.П. Контроль процессов разрушения руд Кривбасса геофизическими методами для повышения эффективности их отработки. В кн.: *Проблемы горнодобывающей промышленности металлургического комплекса Украины*. Кривой Рог: НИГРИ, 1998. С. 21—24.]
 7. Chetverik M.S., Bubnova O.A., Babiy K.V., Batur M.O. Technogeneous earthquakes and mining operation safety. *Geo-Technical Mechanics*. 2017. **136**: 127—146 [in Russian].
[Четверик М.С., Бубнова Е.А., Бабий Е.В., Батур М.А. Техногенные землетрясения и безопасность горных разработок. *Геотехнічна механіка*. 2017. Вип. 136. С. 127—146.]
 8. Chetverik M.S., Bubnova O.A., Babiy K.V., Batur M.O. Rate of deformations developing in the indurated rock massifs at underground mineral extraction basing on the surveying monitoring. *Geo-Technical Mechanics*. 2016. **130**: 3—12 [in Ukrainian].
[Четверик М.С., Бубнова О.А., Бабій К.В., Батур М.О. Швидкість розвитку деформацій у підробленому гірському масиві при підземному вийманні корисних копалин на основі маркшейдерських спостережень. *Геотехнічна механіка*. 2016. Вип. 130. С. 3—12.]
 9. Malakhov G.M. *Upravleniye gornym davleniyem pri razrabotke rudnykh mestorozhdeniy Krivorozhskogo basseyna* [Rock Pressure Control in the Development of Ore Deposits in the Krivoy Rog Basin]. Kyiv: Naukova Dumka, 1990 [in Russian].
[Малахов Г.М. *Управление горным давлением при разработке рудных месторождений Криворожского бассейна*. Киев: Наукова думка, 1990.]
 10. Kalinichenko O.V. Development of scientific fundamentals for controlling the stress-strain state of the rock mass during the formation of underground workings. Dr. (Engin.) thesis. Dnipro, 2020.
[Калініченко О.В. Розвиток наукових основ управління напружено-деформованим станом масиву при формуванні підземних виробок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.02. Дніпро, 2020.]

Mykola I. Stupnik

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3318-3889>

GEOMECHANICAL SUPPORT FOR THE EFFICIENCY OF ORE MINING PROCESSES IN THE KRYVYI RIH IRON ORE BASIN

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, September 10, 2025

The report emphasizes the strategic importance for Ukraine of the complex of industries related to the extraction of iron ore raw materials at the unique Kryvyi Rih iron ore deposit. Research, development and design work in the field of geomechanical support of underground and open-pit mining in this region, as well as the development of engineering and technical measures to minimize the negative consequences of mining are among the priority areas of activity of scientific institutions of the relevant specialization.

Cite this article: Stupnik M.I. Geomechanical support for the efficiency of ore mining processes in the Kryvyi Rih iron ore basin (according to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, September 10, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (11): 32—42. <https://doi.org/10.15407/visn2025.11.032>