

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ, ДОВКІЛЛЯ ТА СІЛЬСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА НАУКОВА УСТАНОВА «ІНСТИТУТ ЕКОЛОГІЧНОГО
ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ УКРАЇНИ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАСЬЯНЕНКО ДМИТРО ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 528.88:504.064.4.03

ДИСЕРТАЦІЯ

**«ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГО-ЗБАЛАНСОВАНОЇ ТЕРИТОРІЇ В УМОВАХ
РОЗРОБКИ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН ШЛЯХОМ
ВПРОВАДЖЕННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ
ДЛЯ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА»**

Спеціальність 183 – Технології захисту навколишнього середовища
Галузь знань 18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Дмитро КАСЬЯНЕНКО

Науковий керівник:

УЛИЦЬКИЙ Олег Андрійович, доктор геологічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Касьяненко Д.Л. Формування еколого-збалансованої території в умовах розробки родовищ корисних копалин шляхом впровадження новітніх технологій для екологізації виробництва – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 - Технології захисту навколишнього середовища (галузь знань, 18 – Виробництво та технології). – Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», Мінекономіки України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному та експериментально-практичному обґрунтуванню формування еколого-збалансованих територій в умовах розробки родовищ корисних копалин шляхом впровадження новітніх технологій для екологізації виробництва, розробленню науково обґрунтованого механізму формування та управління екологічною збалансованістю територій при розробці родовищ корисних копалин (шахтною, кар'єрною та змішаною технологіями розробки) і в постмайнінговий період на основі інтегрального критерію екологічної стабільності з урахуванням геометричних, гідрогеологічних, геохімічних та тектонічних чинників (на прикладі Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів та Полохівського родовища літію).

Основною метою дослідження є розроблення науково обґрунтованого механізму формування та управління екологічною стабільністю території при розробці родовищ корисних копалин (шахтною, кар'єрною та змішаною технологіями видобутку) на основі інтегрального критерію екологічної стабільності з урахуванням техногенного навантаження, змін геологічного середовища.

Основні результати та досягнення.

Проаналізовано природно-геологічні та екологічні передумови формування збалансованості території на прикладі Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів та Полохівського родовища літію.

Досліджено відмінності впливу шахтної, кар'єрної та змішаної систем розробки на геологічне середовище та трансформацію ландшафтної структуру території. Встановлено показники екологічної оцінки та розроблено інтегральний критерій екологічної стабільності I_{ES}^* , що враховує техногенне навантаження, зміну геологічного середовища та технологію розробки родовищ КК.

Показано розрахунок інтегрального показника екологічної стабільності для Полохівського родовища літію з визначенням критичного порогового значення екологічної стабільності.

Обґрунтовано застосування змішаної (кар'єрно-шахтної) технології розробки Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів на основі інтегрального критерію екологічної стабільності I_{ES}^* шляхом порівняльного аналізу екологічних наслідків змішаної технології розробки з урахуванням геометрії кар'єру та ймовірних змін геологічного середовища.

Розроблено організаційно-технологічну модель управління екологічною стабільністю території в період експлуатації та постмайнінгу.

Запропоновано механізм моніторингу та прогнозування змін екосистем постмайнінгових територій із використанням інтегрального критерію як індикатора управління. Показано роль адвокаційних, правових та економічних інструментів у системі забезпечення екологічної рівноваги постмайнінгових територій.

Результати дослідження підтверджують доцільність використання інтегральний критерій екологічної стабільності I_{ES}^* , що враховує техногенне навантаження, зміну геологічного середовища та технологію розробки родовищ КК.

Ключові слова: технології захисту навколишнього середовища, кар'єр, шахта, гірничодобувна промисловість, Гуляйпільське родовище залізистих кварцитів, Полохівське родовище літію, інтегральний показник, екологізація, геологічне середовище, геохімія, моделювання, технології розробки, постмайнінг.

ABSTRACT

Kasyanenko D.L. Formation of an ecologically balanced territory in the conditions of mineral deposits development by implementing the latest technologies for greening production – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 183 - “Environmental Protection Technologies” (branch of knowledge, 18 – Production and Technologies). – State Scientific Institution “Institute for Ecological Restoration and Development of Ukraine”, Ministry of Economy of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation work is devoted to the theoretical and experimental-practical substantiation of the formation of ecologically balanced territories in the conditions of mineral deposit development by introducing the latest technologies for greening production, the development of a scientifically based mechanism for the formation and management of the ecological balance of territories during the development of mineral deposits (by mining, quarrying and mixed development technologies) and in the post-mining period based on the integral criterion of ecological stability taking into account geometric, hydrogeological, geochemical and tectonic factors (on the example of the Polokhiv and Hulyaipil lithium deposits).

The main goal of the study is to develop a scientifically based mechanism for the formation and management of the ecological stability of the territory during the development of mineral deposits (mine, open-pit and mixed mining technologies) based on the integral criterion of ecological stability, taking into account the technogenic load and changes in the geological environment.

Main results and achievements.

The natural-geological and ecological prerequisites for the formation of the balance of the territory are analyzed using the example of the Gulyaipilsky deposit of ferruginous quartzites and the Polokhivsky lithium deposit.

The differences in the impact of mine, quarry and mixed development systems on the geological environment and the transformation of the landscape structure of the territory

are studied. Environmental assessment indicators are established and an integral criterion of ecological stability IES* is developed, which takes into account the technogenic load, changes in the geological environment and the technology of development of KK deposits.

The calculation of the integral indicator of ecological stability for the Polokhivsky lithium deposit is shown with the determination of the critical threshold value of ecological stability.

The application of a mixed (quarry-mine) technology for the development of the Gulyaipilsky deposit of ferruginous quartzites is justified on the basis of the integral criterion of ecological stability IES* by means of a comparative analysis of the environmental consequences of the mixed development technology, taking into account the geometry of the quarry and probable changes in the geological environment.

An organizational and technological model of managing the ecological stability of the territory during the period of exploitation and post-mining has been developed.

A mechanism for monitoring and forecasting changes in ecosystems of post-mining territories using an integral criterion as a management indicator has been proposed. The role of advocacy, legal and economic instruments in the system of ensuring the ecological balance of post-mining territories has been shown.

The results of the study confirm the feasibility of using the integral criterion of ecological stability IES*, which takes into account the technogenic load, changes in the geological environment and the technology of development of KK deposits.

Keywords: environmental protection technologies, quarry, mine, mining industry, Hulyaipil deposit of ferruginous quartzites, Polokhiv lithium deposit, integral indicator, ecologization, geological environment, geochemistry, modeling, development technologies, post-mining.

НАУКОВІ ПРАЦЬ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття у наукових виданнях інших держав, що включені до баз WoS та Scopus:

1. Ulytsky O., Diachenko N., Bezruchko K., Prikhodchenko S., **Kasyanenko D.** Evaluating the current state of the geological and geochemical system at the Polokhivsk lithium field. VI International Conference "Essays of Mining Science and Practice" (RMGET 2024). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1491 (2025) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012018>.

Стаття у науковому фаховому виданні України:

2. **Касьяненко Д.Л.**, Улицький О.А., Д'яченко Н.О. Розробка інтегрального критерію екологічної збалансованості території для кар'єрної та змішаної систем розробки (на прикладі Гуляйпільського родовища). *Екологічні науки*, 2026. - 2(65). – С. 83-88. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.13>

3. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., **Касьяненко Д.Л.** Збалансований підхід до видобутку залізних руд Гуляйпільського родовища в сучасних умовах. *Екологічні науки*, 2023. - 5(50). – С. 54-60. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.8>.

4. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., **Касьяненко Д.Л.** Визначення впливу ймовірного технологічного чиннику видобування залізрудних покладів на зміни еколого-гідрологічного середовища. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*, № 6, 2024 – С. 38-49. <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-05>

5. Д'яченко Н.О., Яловчак Т.М, **Касьяненко Д.Л.** Оцінка інтегральної еколого-технологічної ситуації (м. Солотвино). *Гірнича геологія та геоекологія*, 2023. - № 1 (6) - С. 35-56 [https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2023.1\(6\).287848](https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2023.1(6).287848).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Д'яченко Н.О., Касьяненко Д.Л., Улицький А.О. (2024). Оцінка небезпеки накопичення токсикантів у трофічних ланцюгах морської екосистеми та вторинне забруднення донних відкладів «Каховське водосховище – Чорне море». Збірник тез XII Міжнародної науково-практичної конференції «Вода для миру», присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів, м. Київ, 98-102.

URL: https://waterday.iwpim.com.ua/Water_day_tczy2024.pdf

7. **Касьяненко Д.Л.**, Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Роль технологічних чинників видобування залізорудних покладів на зміни еколого-гідрогеологічного середовища. Матеріали 9 міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». м. Львів, 7-11 жовтня 2024 р. С. 463-468. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/15474/1/.pdf>

8. Улицький О.А., Бойко К.Є., **Касьяненко Д.Л.** Атрибутивний чинник трансформаційної зміни гідрогеологічного режиму розробки Новоукраїнського родовища гранітів. Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». м. Львів, 6-10 жовтня 2025 р. С. 580-587. https://conf.dkz.gov.ua/files/2025_materials_net.pdf

9. Верховцев В.Г., Улицький О.А., Тищенко Ю.Є., Яценко В.Г., **Касьяненко Д.Л.** Радіоекологічна оцінка території Городнявської ділянки Буртинського родовища графіту в умовах підготовки до її планованої розробки. Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Технології безпеки: сучасні виклики та перспективи»: 12–13 березня 2026 року, м. Черкаси [Електронний ресурс] : у 2-х томах / упоряд. : І. Г. Маладика, В. Л. Цікановський; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Т. 2. – Черкаси : ЧДТУ, 2026. – 443 с. <https://bk.chdtu.edu.ua/konferenciya/>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
Розділ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГО-ЗБАЛАНСОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ У ГІРНИЧОДОБУВНІЙ ГАЛУЗІ	23
1.1. Аналіз проблеми навантаження навколишнього середовища гірничорудними підприємствами	25
1.2. Сучасні наукові підходи до оцінювання трансформації геосистем у межах гірничопромислових територій.	35
1.3 Аналіз підходів зменшення навантаження на навколишнє середовище гірничорудними підприємствами	38
1.4. Вплив технології розробки родовищ на характер трансформації території	49
1.5. Обґрунтування наряду досліджень та постановка задач	53
Висновки до розділу 1	57
Розділ 2. ПРИРОДНО-ГЕОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГО-ЗБАЛАНСОВАНОЇ ТЕРИТОРІЇ ПРИ ОСВОЄННІ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН	59
2.1. Базовий стан умов навколишнього середовища території Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів	63
2.2. Природно-геологічні та геоекологічні передумови формування еколого-збалансованої території (на прикладі Полохівського родовища літію)	88
Висновки до розділу 2	102
Розділ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ТА РОЗРОБКА ІНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРІЮ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ(IES) ТЕРИТОРІЙ РОДОВИЩ	105
3.1. Обґрунтування системи показників екологічної рівноваги в залежності від технології розробки (на прикладі Гуляйпільського та Полохівського родовищ)	105
3.2. Розробка інтегрального критерію екологічної збалансованості території для кар'єрної, шахтної та змішаної систем розробки	106
3.3. Емпіричне обґрунтування екологічної доцільності комбінованого способу розробки Гуляйпільського родовища	110
3.4. Розрахунок інтегрального критерію екологічної рівноваги для Полохівського родовища	121
Висновки до розділу 3	126

РОЗДІЛ 4. ФОРМУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ РІВНОВАГИ У ПОСТМАЙНІНГОВИЙ ПЕРІОД	129
4.1. Розробка організаційно-технологічної моделі управління екологічною стабільністю.	129
4.2. Роль адвокації у формуванні екологічно стабільних постмайнінгових територій	137
4.3. Механізм моніторингу та прогнозування змін екосистем у постмайнінговий період	139
Висновки до розділу 4	140
ВИСНОВКИ	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	150
ДОДАТКИ	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТЕО	Техніко-економічного обґрунтування
РКК	Родовища корисних копалин
ІЕС	Інтегральний критерій екологічної стабільності
ДНВП	Державне науково виробниче підприємство «Геоінформ України»
ПЗФ	Природно заповідний фонд
ГВП	Гірничовидобувна промисловість
НС	Навколишнє середовище
ІСММ	Міжнародна рада з гірничодобувної промисловості та металургії
УЩ	Український щит
КГА	Комплексних геохімічних аномалій
ОР	Ореолу розповсюдження
ЛНЗР	Логарифмічно нормальний закон розподілу
ЕРІ	Індексі екологічної ефективності
МПП	Методом попарних порівнянь
WQI	Екологічний індексах якості води
ПМТ	Постмайнінгові території
ФР	Фонд рекультивації

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку гірничодобувної промисловості України характеризується посиленням вимог до екологічної безпеки, ресурсоефективності та інтеграції принципів сталого розвитку у виробничі процеси. В умовах трансформації економіки та післявоєнного відновлення особливої ваги набуває переосмислення технологічних підходів до освоєння родовищ корисних копалин з урахуванням екологічних ризиків, довготривалих наслідків техногенного навантаження та необхідності забезпечення екологічної стабільності територій.

Гірничодобувна діяльність формує комплексний вплив на геологічне середовище, гідрогеологічні умови, ландшафтну структуру, поверхневі й підземні води, атмосферне повітря та соціально-економічний стан регіонів. Особливої гостроти набуває проблема управління територіями на завершальних стадіях життєвого циклу родовищ - у період постмайнінгу, коли екологічні наслідки проявляються у вигляді порушення гідродинамічної рівноваги, формування депресійних лійок, підтоплення, засолення ґрунтів, деградації екосистем та зниження інвестиційної привабливості територій.

Аналіз наукових досліджень свідчить, що існуючі підходи до вибору технологій видобутку переважно орієнтовані на техніко-економічні показники, тоді як екологічна складова часто враховується фрагментарно або на етапі оцінки впливу на довкілля без інтеграції у сам механізм технологічного проектування. Водночас сучасні виклики вимагають переходу до превентивних моделей управління, в яких екологічний критерій виступає не обмежувальним фактором, а системоутворюючим елементом прийняття рішень.

Особливо актуальною є проблема обґрунтування змішаних (кар'єрно-шахтних) технологій розробки родовищ, які потенційно здатні забезпечити екологічне збалансування техногенного навантаження у просторі та часі. Проте відсутність кількісного інтегрального показника екологічної стабільності, що дозволяє порівняти альтернативні технологічні схеми, ускладнює об'єктивний

вибір оптимального варіанта.

У цьому контексті виникає науково-прикладна проблема розроблення науково обґрунтованого механізму формування та управління екологічною збалансованістю територій при розробці родовищ корисних копалин (шахтною, кар'єрною та змішаною технологіями розробки) і в постмайнінговий період на основі інтегрального критерію екологічної стабільності з урахуванням геометричних, гідрогеологічних, геохімічних та тектонічних чинників (на прикладі Гуляйпільського родовищ залізистих кварцитів та Полохівського родовища літію) як інструменту прогнозування та прийняття рішень.

Актуальність дослідження також зумовлена необхідністю інтеграції екологічних показників у процедури вибору технологій видобутку, забезпечення екологічної безпеки територій постмайнінгу в умовах антропогенного навантаження та формування адаптивних моделей екологічного управління

Таким чином, розроблення науково обґрунтованого підходу до оцінки та управління екологічною стабільністю гірничодобувних територій із застосуванням інтегрального критерію є своєчасним та відповідає сучасним вимогам спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

Ключовими проблемами, що зумовлюють необхідність виконання дисертаційного дослідження, є:

- відсутність комплексного інтегрального показника, який би відображав рівень екологічної стабільності геосистем у зоні впливу гірничодобувної діяльності.
- недостатня інтеграція екологічних критеріїв у механізми вибору технології видобутку корисних копалин.
- обмеженість існуючих моделей прогнозування довгострокових змін гідрогеологічного режиму та екосистем у постмайнінговий період.
- відсутність адаптивних організаційно-технологічних моделей управління екологічними ризиками на стадії ліквідації та трансформації гірничих об'єктів.

Розв'язання зазначених проблем потребує поєднання геоекоекологічного аналізу, математичного моделювання, системного підходу та розроблення

інтегрального екологічного критерію, що забезпечить перехід від якісної оцінки впливів до кількісно обґрунтованого управління.

Зв'язок із науковими програмами, планами та темами. Дисертаційне дослідження виконано впродовж 2023–2026 років на базі Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління та Державної наукової установи «Інститут екологічного відновлення та розвитку України». Відповідно до напрямків роботи кафедри екобезпеки ДЕА, автор активно приймав участь у виконанні науково-дослідницьких роботах, а саме: «Підготовка науково-експертного висновку щодо впливу видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища на зміни гідрогеологічного режиму прилеглих територій» (ДР 0122U001073) та «Розробка рекомендацій щодо відновлення Каховського гідровузла та наповнення Каховського водосховища для забезпечення надійної експлуатації водозаборів комунального та промислового водопостачання, та відновлення екологічного стану і біорізноманіття Нижнього Дніпра» (ДР 0123U103857).

Метою дисертаційної роботи є розроблення науково обґрунтованого механізму формування та управління екологічною збалансованістю територій при розробці родовищ корисних копалин (шахтною, кар'єрною та змішаною технологіями розробки) і в постмайнінговий період на основі інтегрального критерію екологічної стабільності з урахуванням геометричних, гідрогеологічних, геохімічних та тектонічних чинників (на прикладі Гуляйпільського родовищ залізистих кварцитів та Полохівського родовища літію).

Об'єктом дослідження є процеси формування екологічного стану та стабільності природно-техногенних систем у межах гірничодобувних територій на різних стадіях життєвого циклу родовища (експлуатація – ліквідація – постмайнінг).

Предметом дослідження є закономірності інтеграції геологічних, гідрогеологічних, геохімічних і технологічних параметрів у систему кількісної оцінки екологічної збалансованості території та механізми управління екологічною стабільністю в умовах гірничого виробництва і постмайнінгу.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі передбачається розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати природно-геологічні та геоекологічні передумови формування екологічної збалансованості території на прикладі Полохівського родовища літію та Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів.

2. Дослідити відмінності впливу шахтної, кар'єрної та змішаної систем розробки на геологічне середовище та трансформацію ландшафтної структури території.

3. Обґрунтувати систему показників екологічної оцінки та розробити інтегральний критерій екологічної стабільності IES*, що враховує техногенне навантаження, зміну геологічного середовища, технологію видобування КК.

4. Виконати розрахунок інтегрального показника Полохівського родовища літію та визначити критичні порогові значення стабільності.

5. Обґрунтувати доцільність застосування змішаної (кар'єрно-шахтної) технології видобутку Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів на основі інтегрального критерію екологічної стабільності IES* шляхом порівняльного розрахунку екологічних наслідків кар'єрної та комбінованої технології розробки з урахуванням геометрії кар'єру, гідрогеологічного режиму, геохімічних показників і тектонічної порушеності.

5. Провести порівняльну оцінку екологічної збалансованості Полохівського та Гуляйпільського родовищ з урахуванням їх геологічних і технологічних відмінностей.

6. Розробити організаційно-технологічну модель управління екологічною стабільністю території в період експлуатації та постмайнінгу.

7. Сформувати механізм моніторингу та прогнозування змін екосистем постмайнінгових територій із використанням інтегрального критерію як індикатора управління.

8. Обґрунтувати роль адвокаційних, правових та економічних інструментів у системі забезпечення екологічної рівноваги постмайнінгових територій.

Методи дослідження. В дослідженнях використані теоретичні методи, а саме: аналіз та узагальнення наукових джерел для систематизації сучасних підходів до оцінки екологічної стабільності гірничодобувних територій, інтегрального оцінювання та постмайнінгового управління. Прийоми системного аналізу для розгляду гірничодобувної території як природно-техногенної системи з багатокомпонентними зв'язками. Структурно-функціональний підхід для визначення взаємозв'язків між геологічними, гідрогеологічними, геохімічними та технологічними чинниками формування екологічної рівноваги. Застосовано порівняльний аналіз для встановлення принципових відмінностей шахтної, кар'єрної та змішаної систем розробки. Геолого-геоекологічний метод геолого-структурного аналізу для оцінки тектонічної порушеності, блочної будови масиву та їх впливу на стійкість території. Прийоми гідрогеологічного аналізу для визначення змін напрямів стоку підземних вод. Прийоми 2D та 3D моделювання. Геохімічний аналіз для оцінки концентрацій елементів, визначення коефіцієнтів накопичення, фонових значень і ступеня техногенної трансформації. Ландшафтно-екологічна оцінка для аналізу трансформації рельєфу та просторової структури порушених територій.

Окремий блок - методи математичного та інтегрального оцінювання, наприклад нормування показників (метод min-max) для приведення різнорідних екологічних параметрів до безрозмірної шкали. Стандартизація показників для оцінки відхилень від фонових значень. Метод кореляційної матриці, а також, метод зваженої адитивної інтеграції для формування інтегрального критерію екологічної стабільності I_{ES}^* . Розрахунково-аналітичний метод для визначення інтегрального показника екологічної стабільності для Полохівського та Гуляйпільського родовищ. Широко використані методи багатокритеріальної оцінки для визначення вагових коефіцієнтів та узгодження різноспрямованих факторів впливу. Задіяно сценарне моделювання для аналізу зміни інтегрального показника залежно від глибини кар'єру та технології розробки КК. Група методів організаційно-управлінського напрямку - моделювання організаційно-технологічних процесів

для формування механізму управління екологічною стабільністю; нормативно-правовий аналіз для узгодження запропонованої моделі з вимогами екологічного законодавства України.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

Вперше:

- розроблено природно-геологічну модель екологічної рівноваги території Полохівського родовища, у якій геологічні чинники (тектоніка, геометрія крутопадаючих пегматитових тіл, геохімічна спеціалізація та гідрогеологічні умови) розглядаються як єдина просторово взаємопов'язана система.

- встановлено закономірності просторової організації природних геохімічних ореолів для Li-спеціалізованої пегматитової системи (осьова та поперечна зональність, орієнтація за напрямками розломів), що дозволило сформувати базову модель доексплуатаційного стану території.

- сформовано кількісну основу визначення місцевого геохімічного фону для родовища літію шляхом статистичного аналізу (логнормальний розподіл, кореляційні асоціації елементів), що забезпечує відокремлення природних аномалій від потенційних техногенних.

- для умов Гуляйпільського родовища виконано просторове (3D) моделювання кінцевого контуру кар'єру з урахуванням геолого-тектонічної будови та варіантів відкритої й комбінованої систем розробки, що дозволило кількісно оцінити масштаб розширення поверхневого контуру відносно геологічно оконтурених рудних тіл.

- обґрунтовано концепцію екологічної рівноваги гірничопромислової території як функції тектонічної порушеності масиву та геохімічної активності порід, що дозволяє перейти від статичної оцінки впливу до структурно-динамічної моделі формування техногенно змінених геосистем.

- запропоновано кількісні індикатори тектонічної та геохімічної дестабілізації, зокрема: коефіцієнт тектонічної порушеності, індекс геохімічної рівноваги, індекс гідрогеохімічної трансформації, які інтегруються до загального інтегрального критерію екологічної збалансованості гірничого підприємства.

- розроблено підхід до врахування тектонічних структур у виборі технології розробки (відкрита / комбінована схема) шляхом оцінки просторового перетину активних зон з кінцевим контуром кар'єру, що дозволяє мінімізувати гідродинамічну та геохімічну дестабілізацію території.

- для умов Гуляйпільського родовища розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності комбінованої системи розробки. Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри. Доведено, що перехід на змішану систему дозволяє зменшити сукупне екологічне навантаження на 50%. Слід зауважити, що інтегральний критерій дозволив кількісно оцінити екологічну ефективність технологічних схем 1 і 2 та показав, що перехід до змішаної системи розробки (другий сценарій) підвищує екологічну збалансованість території.

- для умов Полохівського родовища розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності шахтної системи розробки та визначено, що територія розробки буде мати показник інтегрального критерію екологічної збалансованості на рівні 0.763, що характеризує відносну екологічну стабільність але з підвищеним геохімічним та тектонічним потенціалом дестабілізації.

- визначено, що територія розробки Гуляйпільського родовища при впровадженні технології комбінованої системи розробки буде мати показник інтегрального критерію екологічної збалансованості на рівні 0,71 при глибині кар'єру до 400 м та глибше шахтна розробка.

- показано, що геоекологічні особливості конкретних об'єктів зумовлюють диференційований характер управління:

- для Полохівського родовища – гідрогеологічно орієнтована модель з акцентом на контроль депресійної лійки, поетапне затоплення та довготривалий моніторинг підземних вод;

- для Гуляйпільського родовища – ландшафтно-рекультиваційна модель з пріоритетом відновлення ґрунтів, стабілізації техногенного рельєфу та біоекологічної реконструкції.

- інтегральний критерій екологічної стабільності I_{ES} обґрунтовано як

кількісний індикатор ефективності управлінських рішень. Його використання дозволяє порівнювати альтернативні технологічні сценарії, оцінювати динаміку стабілізації території, визначати критичні порогові значення, формувати адаптивну модель управління на основі зворотного зв'язку.

Удосконалено:

- методичний підхід до інтеграції геолого-структурних і геохімічних чинників у систему екологічної оцінки території, де природні параметри (тектонічна проникність, фонові геохімічна структура, гідро-геоморфологічні особливості) формують базові коефіцієнти інтегрального показника екологічної збалансованості.

- підхід до визначення структурно-тектонічного коефіцієнта стабільності та коефіцієнта геохімічної стійкості як складових інтегрального екологічного критерію, що враховують природні передумови трансформації території при освоєнні надр.

- підхід до оцінки просторових екологічних обмежень при розробці крутопадаючих покладів залізистих кварцитів шляхом інтеграції геометричних параметрів кар'єру (глибина, кути укосу, протяжність покладу) з екологічними показниками порушення ландшафту та гідродинамічної рівноваги території.

- методику оцінювання техногенно трансформованих ландшафтів шляхом поєднання морфометричних, гідрологічних, ґрунтових та біоіндикаторних параметрів у математичних моделях.

- методологію оцінювання екологічної збалансованості гірничодобувних територій за рахунок включення параметрів структурної неоднорідності масиву, показників міграційної здатності хімічних елементів, взаємозв'язку між коефіцієнтом фільтрації тріщинних зон та масштабами депресійної лійки.

- що запропонований механізм забезпечення екологічної рівноваги у постмайнінговий період дозволяє інтегрувати природні передумови території з технологічними рішеннями; мінімізувати довгострокові екологічні ризики; підвищити економічну ефективність відновлення; забезпечити науково обґрунтоване прогнозування динаміки екосистем

Набули подальшого розвитку:

- теоретичне положення про необхідність розгляду родовища як динамічної геолого-геохімічної системи, в якій екологічна рівновага визначається взаємодією тектонічного каркасу, літологічної будови, гідрогеологічного режиму та природного геохімічного фону.

- концепція врахування природного стану території як базової точки відліку для прогнозування екологічних наслідків вибору способу розробки (шахтного, кар'єрного або комбінованого).

- положення про необхідність застосування інтегрованого геоекологічного аналізу на стадії проектування гірничих робіт, де 3D-моделювання розглядається як інструмент для подальшого прогнозування просторових екологічних наслідків.

- теоретичне положення про залежність рівня екологічної рівноваги від глибини розробки в умовах складчастих структур із крутим падінням крил.

- обґрунтування доцільності комбінованої схеми «кар'єр + шахта» як механізму зменшення площі перетину тектонічно активних зон, площі контакту окиснювального фронту, інтенсивності гідрогеохімічної трансформації.

- методичний підхід до врахування гідрогеологічного фактору при виборі способу розробки родовища, зокрема через оцінку очікуваного водоприпливу, формування депресійної лійки та зміни напрямків підземного і поверхневого стоку.

Особистий внесок здобувача. Дисертантом обґрунтовано тему, мету, основні завдання роботи, освоєно необхідні методи польових та лабораторних досліджень. Виконано збір натурного матеріалу, його камеральне опрацювання, визначено інтенсивності гідрогеохімічної трансформації. Обґрунтувати доцільність застосування змішаної (кар'єрно-шахтної) технології видобутку родовищ на основі інтегрального критерію екологічної стабільності IES. Проведено статистичну обробку отриманих даних, сформульовано основні положення роботи та висновки дисертації. Особисто або у співавторстві підготовано до друку наукові праці, у яких викладено основні положення дисертації.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи мають вагомe практичне значення, оскільки спрямовані на впровадження

інженерно реалізованої природоохоронної технології.

Практичне значення дисертаційного дослідження полягає у розробленні та впровадженні науково обґрунтованого інструментарію управління екологічною стабільністю гірничодобувних територій на всіх стадіях життєвого циклу родовища, включаючи етап постмайнінгу.

Запропонований інтегральний критерій екологічної стабільності IES * може бути використаний: при виборі технології розробки родовищ (кар'єрної, шахтної або змішаної); на стадії техніко-економічного обґрунтування (ТЕО); у процедурах оцінки впливу на довкілля; під час розроблення проектів ліквідації та консервації гірничих об'єктів.

На прикладі Гуляйпільського родовища вперше виконано екологічне обґрунтування змішаної (кар'єрно-шахтної) технології із застосуванням інтегрального критерію, що дозволяє перейти від суто економічного вибору технології до кількісно аргументованого екологічного проектування.

Отримані результати можуть бути використані: при розробленні стратегій відновлення територій постмайнінгу; у системах екологічного менеджменту підприємств; у навчальному процесі закладів вищої освіти за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

Запропонований підхід забезпечує підвищення рівня екологічної безпеки, зменшення довгострокових негативних наслідків гірничодобувної діяльності та сприяє реалізації принципів сталого розвитку у промислових регіонах.

Достовірність отриманих результатів. Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується:

1. Системністю методологічного підходу, що ґрунтується на поєднанні геоекологічного аналізу, гідрогеологічного моделювання, математичних методів інтегрування показників та принципів екологічного менеджменту.

2. Використанням офіційних геологічних, гідрогеологічних та виробничих даних, матеріалів моніторингових спостережень, результатів лабораторних і польових досліджень.

3. Застосуванням сучасних методів математичного та комп'ютерного

моделювання, що дозволило кількісно оцінити динаміку змін інтегрального показника екологічної стабільності.

4. Порівняльним аналізом альтернативних технологічних схем видобутку, що підтвердив відтворюваність результатів при зміні вхідних параметрів.

5. Апробацією результатів дослідження на наукових конференціях, у фахових публікаціях та при виконанні прикладних розрахунків для конкретного родовища.

6. Узгодженістю отриманих результатів із сучасними науковими уявленнями щодо закономірностей трансформації геосистем під впливом гірничодобувної діяльності.

7. Кореляцією розрахункових показників із фактичними даними спостережень, що підтверджує адекватність розробленої моделі реальним природно-техногенним процесам.

Таким чином, сукупність застосованих методів, достатній обсяг вихідної інформації, апробація результатів та їх узгодженість із фактичними даними забезпечують належний рівень наукової достовірності дисертаційного дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи було висвітлено у доповідях: IX міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». (7-11 жовтня 2024 р). м. Львів, Україна (м. Львів, 2024); X міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування» (6-10 жовтня 2025 р), м. Львів, Україна (м. Львів, 2024); XII Міжнародної науково-практичної конференції «ВОДА ДЛЯ МИРУ», присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів. м. Київ, 2024; I Міжнародної науково-практичної конференції «Технології безпеки: сучасні виклики та перспективи» : 12–13 березня 2026 року, м. Черкаси.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи відображені в 5 наукових працях, із яких: 1 стаття у науковому періодичному виданні, що індексується міжнародними наукометричними базами даних (Scopus та Web of

Science); 4 статті у наукових фахових виданнях із переліку МОН України.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, який нараховує 97 найменувань. Роботу викладено на 167 сторінках тексту, включаючи 11 таблиць і 21 рисунок. Загальний об'єм роботи становить 167 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГО-ЗБАЛАНСОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ У ГІРНИЧОДОБУВНІЙ ГАЛУЗІ

Гірничопромислові ландшафти формуються внаслідок тривалої та інтенсивної техногенної діяльності, пов'язаної з видобуванням корисних копалин.

У процесі розробки родовищ відбувається істотна перебудова природних геосистем, що проявляється у зміні морфології рельєфу, гідрогеологічного режиму, геохімічної структури та біотичного компонента. Існуючий стан розробки рудних покладів включає багато питань як з погляду перспективи розвитку родовищ та ефективності використання надр, так й з екологічного впливу на довкілля при видобуванні.

Видобуток рудних корисних копалин, особливо за умов значних глибин залягання продуктивних горизонтів, призводить до формування кар'єрів, відвалів, хвостосховищ, зон депресійних воронок та інших елементів техногенного ландшафту. У результаті природна геосистема трансформується у природно-техногенну, в межах якої функціональні зв'язки між компонентами довкілля зазнають суттєвих змін.

Трансформація проявляється у: зміні рельєфу та структури земної поверхні; порушенні водного балансу та зниженні рівнів підземних вод; формуванні техногенних потоків міграції хімічних елементів; деградації ґрунтового покриву; зміні біопродуктивності території.

Таким чином, гірничопромислова територія повинна розглядатися як складна багаторівнева система, в якій техногенний чинник виступає визначальним у формуванні сучасного екологічного стану.

Але, сучасне функціонування залізорудної промисловості України має наступні специфічні риси: певна вичерпаність багатих легкодоступних родовищ корисних копалин; велика глибина ведення робіт на кар'єрах; зношеність основних виробничих фондів; значні коливання світової ринкової кон'юнктури; екологічні збитки від діяльності видобувних підприємств; відсутність відкриття нових шахт та кар'єрів; військова агресія проти України, яка внесла корективи у промислову

розробку залізних руд. Слід зазначити, що видобувна промисловість – це основне історичне джерело шкоди навколишньому середовищу. У той час як уряди країн світу працюють над підтримкою переходу до більш зеленого економічного зростання, та сприяють не тільки підтримці поліпшення екологічних показників у гірничодобувному секторі, але й забезпеченню того, щоб ця галузь могла стати прогресивною частиною екологізації економіки, Україна лише розглядає основні приклади екологічної шкоди, спричиненої різними формами видобутку корисних копалин. На сьогодні ще не створено стандартизованих підходів щодо вирішення прикладних завдань стосовно визначення факторів екологічного впливу видобування залізрудних покладів на прикладі різних способів їх розробки. Це питання обумовлено існуючою десятиріччями традиційною кар'єрною формою видобутку металевих корисних копалин в Україні без врахування альтернативних способів розробки.

Слід відмітити, що розробка родовищ відкритим способом призводить до істотної зміни екологічної обстановки, що проявляється в техногенному впливі на всі компоненти геологічного середовища та його взаємодії з поверхневою гідросферою, біосферою, геохімічними ландшафтами та приземною атмосферою. Експлуатація кар'єрів призводить до порушення природних ландшафтів і впливає на якісний склад природних вод. Наприклад, збільшення видобутку у фінській Лапландії спричинило вилуговування металу та підвищене навантаження миш'яку (As), сурми (Sb), нікелю (Ni) і сульфату (SO_4^{2-}) у системі поверхневих або ПВ, що призвело до потреби пошуку економічно ефективних активних і пасивних методів очищення кар'єрних вод [1].

За даними фінських дослідників [2] характер і масштаби впливу гірничодобувної діяльності на довкілля залежать від геологічних особливостей рудного родовища, від його розміру та форми, концентрації корисного компонента, а також від застосованих методів видобутку та збагачення, обраних технічних рішень і методів очищення, від зобов'язань власника підприємства здійснювати й удосконалювати діяльність у такий спосіб, щоб викиди в навколишнє середовище були мінімальними. Тому, використання той чи іншої технології видобування

залежить, перш за все, від природних чинників. За думкою вітчизняних фахівців [3] характер і масштаби впливу гірничодобувної діяльності на довкілля залежать від геологічних особливостей рудного родовища, від його розміру та форми, концентрації корисного компонента, а також від застосованих методів видобутку та збагачення, обраних технічних рішень і методів очищення, від зобов'язань власника підприємства здійснювати й удосконалювати діяльність у такий спосіб, щоб викиди в навколишнє середовище були мінімальними. Тому, використання той чи іншої технології видобування залежить, перш за все, від природних чинників. За думкою вітчизняних фахівців [4] технологія розробки корисних копалин залежить від глибини залягання останніх, тобто, розробку корисних копалин відкритим способом застосовують у разі залягання їх на порівняно невеликій глибині, що не перевищує, як правило, 300-400 м (хоча нині існують кар'єри, глибина яких перевищує 500 м). Підземний (шахтний) спосіб розроблення застосовують у разі великих глибин залягання родовищ (понад 500 м). Комбінований спосіб розроблення родовищ залізних руд застосовують для розроблення потужних крутопадаючих рудних тіл.

Нині відкритим способом видобувають основну масу корисних копалин, зокрема близько 80 % залізорудної сировини, приблизно 60 % марганцевих руд і майже 70 % руд кольорових металів, що пояснюється більшою економічною ефективністю відкритих розробок порівняно з підземними. На довкілля, пріоритетним чинником переважно є економічна складова видобутку. Але визначення впливу ймовірного технологічного чиннику видобування залізорудних покладів на зміни екологічного середовища або оцінювання трансформації геосистем також необхідно залучати до складових пріоритетних чинників.

1.1. Аналіз проблеми навантаження навколишнього середовища гірничорудними підприємствами

Головними факторами, які визначають екологічний стан гірничовидобувних регіонів України на думку фахівців [4] є:

1 – порушення породного масиву та деформація земної поверхні в наслідок ведення гірничовидобувного і переробного комплексів;

2 – порушення гідрогеологічного режиму території гірничих робіт;

3 – накопичення відходів.

Інші фактори: розвиток небезпечних геологічних процесів (просідання, зсувні, ерозія і ін.), забруднення атмосфери, ґрунтів, підземних та поверхневих вод, тощо, у більшості випадків є похідними від перелічених трьох.

Стосовно порушення породного масиву внаслідок ведення видобувних гірничих робіт - цей фактор дуже непостійний у часі але залежить від обсягів гірничих робіт, що пов'язані з видобутком залізних руд [5]. Слід розуміти, що для України гірничорудна добувна промисловість є не тільки важливим сектором економіки, що забезпечує зайнятість, державні доходи та сировину для військової та цивільної промисловості, але й велику потенційну небезпеку довгострокової шкоди навколишньому середовищу. Саме відкритий видобуток корисних копалин, у тому числі кар'єрний, є найпоширенішою формою видобутку, якій призводить до змін у ландшафті, знищення місць проживання для флори і фауни, забруднювання поверхневих та підземних вод, тощо. За даними [6] основні види змін навколишнього природного середовища під впливом гірничого виробництва мають наступну структуру (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Основні види змін навколишнього природного середовища під впливом гірничого виробництва

Зміни геологічного середовища	Чинники, що викликають зміни природного середовища	Наслідок впливу чинників
Геомеханічні	Будівництво кар'єрів, відвалів, відстійних водойм, різних насипів і траншей. Деформація поверхні внаслідок проведення гірничих робіт. Зберігання відходів збагачення та інших. Монтажні роботи, робота важкого обладнання та ін.	Зміни рельєфу місцевості, геологічної структури масиву гірських порід, ґрунтів та будівельного полотна, механічне пошкодження ґрунтів, ліквідація ґрунтів, виникнення безґрунтових місцевостей, пошкодження будівельних об'єктів та інженерних споруд
Гідрологічні та гідрогеологічні	Дренажний вплив підземних та відкритих гірничих виробок. Деформація поверхні в результаті проведення гірничих виробок з підтопленням.	Зміна положення і руху рівня підземних вод та гідрографічної сітки, погіршення якості вод неглибоко залягаючих

	Будівництво кар'єрів, відвалів, водойм, різних насипів та траншей. Переміщення русел, будівництво водосховищ та інших гідротехнічних споруд. Забруднення вод. Використання підземних вод для різних цілей. Дренування родовища.	водоносних горизонтів, геолого-інженерних умов будівельного полотна, водного режиму ґрунтового шару, зменшення ресурсів підземних вод, збільшення суфозії і механічного ущільнення ґрунтів
Хімічні	Емісія газів і хімічно активного пилу. Скидання засолених і забруднених вод. Вплив токсичних компонентів, що знаходяться в породних відвалах і хвостосховищах.	Зміна складу і властивостей атмосферного повітря, вод та ґрунтів
Фізико-механічні	Емісія пилу та аерозолів. Скидання вод, забруднених суспензією та гідролями	Зміна складу та властивостей атмосферного повітря, вод, ґрунтів: калькуляція русел і водотоків
Термічні	Забруднення повітря. Скидання підігрітих вод у масив гірських порід	Зміна якості атмосферного повітря і водного басейну

Слід підкреслити, що діяльність гірничорудних підприємств нерозривно пов'язана з утворенням великої кількості промислових відходів. Разом із застарілим обладнанням, зношеними комунікаціями, які на цих підприємствах сягають до 70 %, відходи виробництва негативно впливають на навколишнє середовище та відповідають категорії найважливішого фактору забруднення довкілля.

Характерною рисою сучасного гірничорудного виробництва в Україні є також недостатня повнота отримання переробленої сировини. В сучасних умовах розвитку і темпів зростання гірничодобувної промисловості недоліки в комплексному використанні мінеральної сировини також наближають довкілля до незворотних змін. Частка втрат за рахунок досягнутих обсягів виробництва зараз призводить до щорічної втрати 4,5 млн т. залізної руди та 300 тис. т. кольорових металів [7]. Сьогодні наше суспільство спостерігає тенденції щодо зменшення рівня втрат КК у процесі їхнього отримання (рис. 1.1). Але за останні 20 років частка отримання КК збільшилася лише на 1 %.

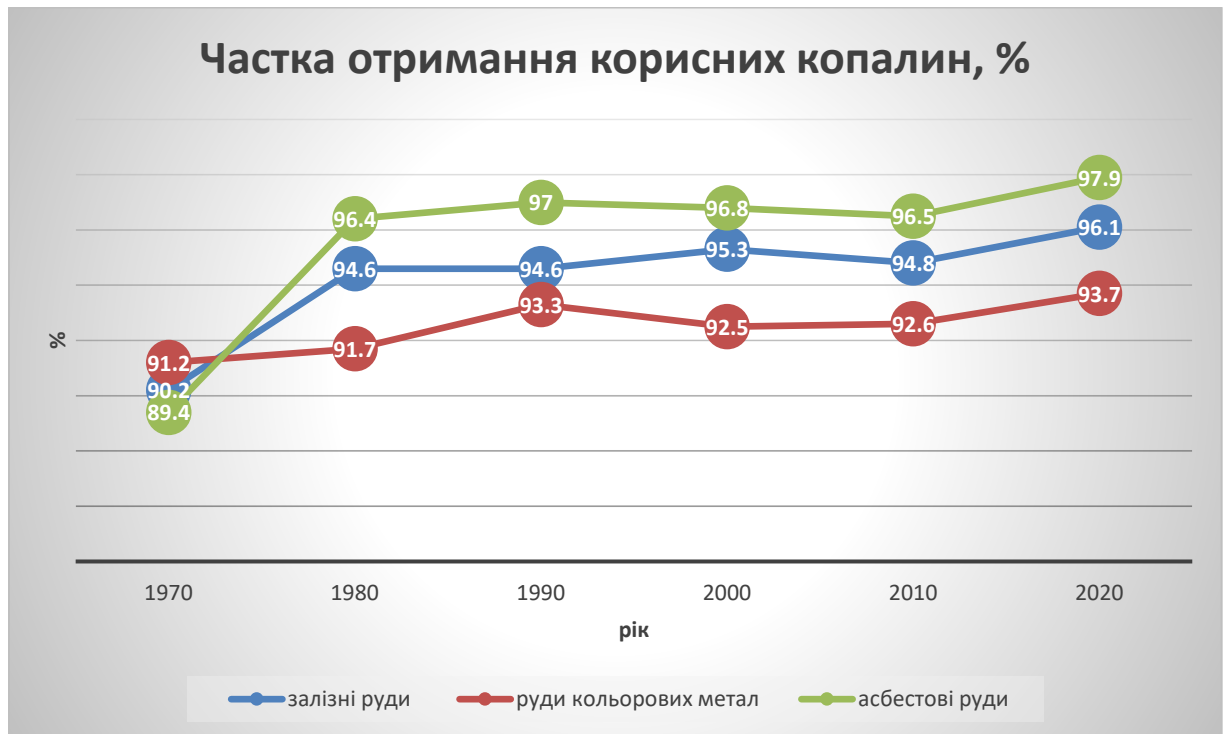


Рис. 1.1. - Тенденції щодо збільшення рівень втрат КК у процесі їхнього отримання

З земних надр щорічно видобувається 1 млрд. т. різної мінеральної сировини. Разом з корисними копалинами виймаються і вміщуючі породи. Останні залишаються на місці розробки у вигляді гірничопромислових відходів (терикони, відвали, шламо- хвостосховища). Вилучення промислово цінних компонентів з мінеральної сировини та їх комплексне використання передбачає утилізацію розкривних та вміщуючих порід разом з залишками продуктів збагачення та перероблення сировини.

Взагалі, відходи гірничодобувних підприємств умовно можна розділити на три основні групи:

1) Розкривні породи, що відносяться до порід осадового походження (60–90%). Це нерудні відходи, що утворюються в результаті розробки родовищ корисних копалин (РКК) відкритим способом. Ці відходи складають у штучно створені відвали. Найбільша маса розкривних порід утворюється при видобуванні руд чорних і кольорових металів.

2) Вміщувальні породи - утворюються у наслідок неоднорідності рудного тіла. В Україні діючими гірничо-збагачувальними підприємствами з видобутку

залізних руд щорічно попутно розробляється більше 60 млн. вміщуючих гірських порід;

3) Відходи збагачення залізних руд – утворюються при збагачуванні руди та представлені великою кількістю дрібнодисперсних відходів: хвости, шлами та інші. Після процесу збагачення залізних руд основний продукт – концентрат. Він формується на збагачувальних фабриках, залишки і є відходи збагачення. Вони становлять 45–50 % загального обсягу сирової руди, що переробляється в процесі вдосконалення технології збагачення [8].

4) Відходи переробки сировинного концентрату які утворюються в результаті фізико-хімічних процесів, що протікають при високих або звичайних температурах на кожній технологічній операції. В такий спосіб утворюється більше 200 найменувань відходів допоміжного та основного виробництв. Це можуть бути: кисла смолка, феросплавні і сталеплавильні шлаки, фуси, доменні шлаки, зола, паливні шлаки, кислі гудрони і та ін.

За даними у загальному обсязі відходів відходи гірничодобувної промисловості складають 29% [9].

У відвали, відстійники та хвостосховища щорічно складають до 0,5–0,6 млрд т. гірських порід і відходів перероблення мінеральної сировини. Загальні обсяги нагромадження гірничопромислових відходів перевищують мільярди тонн. Відходи видобутку та збагачення складають в Україні близько 28 млрд. т, металургійних шлаків - більш 3 млрд. т. За даними Державної служби статистики України за 2018 рік щорічно промисловістю утворюється промислових відходів більше ніж 1,6 млрд. т, а також близько 2 млн. т сумарно скидів та викидів [10], Більш того, найбільший відсоток (84 %) серед промислових відходів становлять відходи процесів видобутку та переробки мінеральної сировини, 7 % металургійні шлаки. Щільність накопичених гірничопромислових відходів (в т. ч. гірничорудних) в Україні в 3,2 рази вище від країн Європейського Союзу та у 6,5 разів вище, чим у США. Основні області, які є лідерами в цьому питанні – Дніпропетровська, Запорізька, Луганська, Донецька та Львівська. Саме тут зосереджені РКК, які розробляються.

На сьогоднішній день в Україні функціонує 65 підприємств – з видобування металевих руд [11].

До початку війни, наприклад у 2020 році, згідно з даними ДНВП «Геоінформ України», видобування руд заліза здійснювалось на родовищах, де зосереджено приблизно 60% від усіх розвіданих запасів України. Видобування здійснювали 14 підприємств. Але, треба визнати, що видобувна промисловість – це основне історичне джерело шкоди навколишньому середовищу. У процесі одного виробничого циклу на гірничодобувних, гірничо-збагачувальних, металургійних, хімічних, кам'янодробильних комбінатах утворюється щорічно до 600–660 млн м³ (або близько 1,5 млрд т.) відходів. Під час розкривних і підготовчих робіт у відвали переміщується близько 500 млн м³ піщаних, глинистих і скельних порід. Унаслідок первинної переробки, збагачення видобутої руди утворюється 75–80 млн. м³ відходів. Усе це становить суттєве техногенне навантаження на довкілля і призводить до зміни природного стану складових екосистем.

Наприклад, у Криворізькому регіоні, щорічно видобувають понад 200 млн т гірничої маси, при цьому у відвали складують близько 90 млн т розкривних, скельних порід і некондиційних залізистих руд. Окрім того, щорічно в хвостосховищах накопичується понад 70 млн т відходів збагачення залізистих кварцитів. Унаслідок багаторічної діяльності гірничо-збагачувальних комплексів у відвалах накопичено близько 13 млрд т гірських порід, у межах Кривбасу вони займають близько 86,5 тис. га орних земель. Тобто, ми маємо «кругообіг» забруднення навколишнього природного середовища за рахунок кар'єрних розробок металевих корисних копалин. Структурна схема забруднення навколишнього природного середовища за рахунок кар'єрних розробок металевих корисних копалин представлена на рис. 1.2.

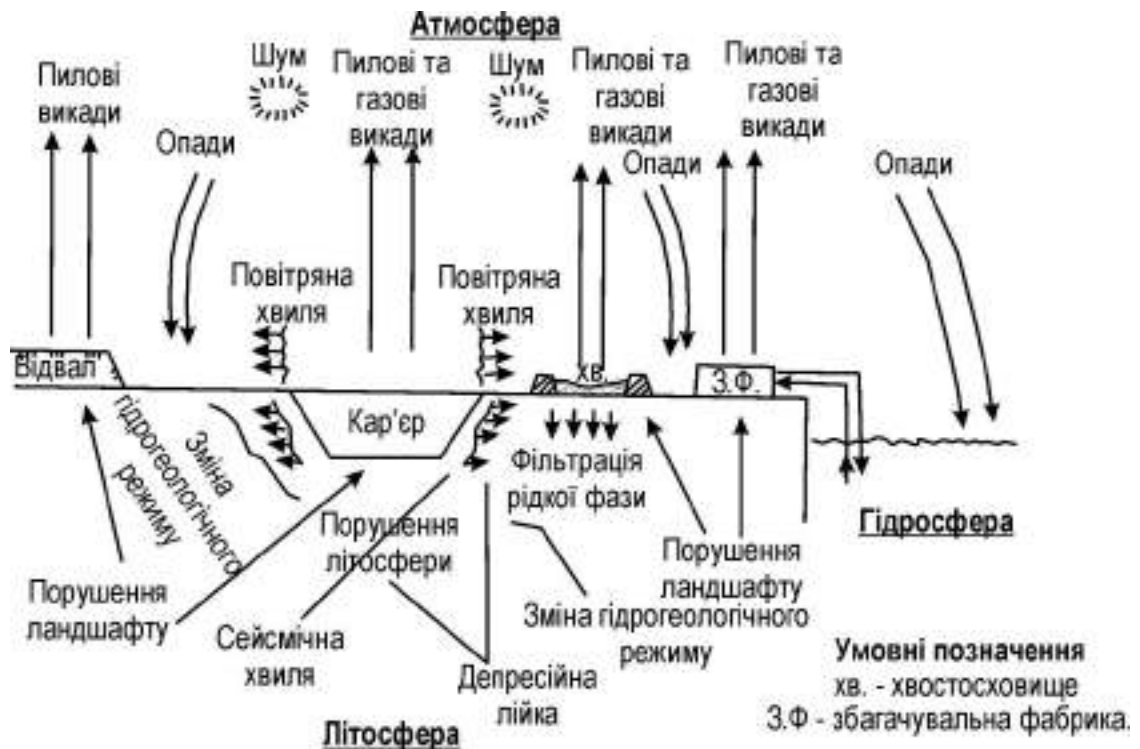


Рис. 1.2. - Структурна схема забруднення навколишнього природного середовища за рахунок кар'єрних розробок металевих корисних копалин (Певзнер М.Є., 1990)

Питанням забруднення довкілля за рахунок видобутку корисних копалин займалися сучасні вітчизняні науковці: Бондар О. І., Білявський Г.О., Рудько Г.І., Улицький О.А., Шестопапов В.М., Яковлев Є.О., Кучеров К.І. Багато досліджень стосується питань забруднення окремих складових довкілля – ґрунтів, води, повітря, тощо.

Наприклад, Кучеров К.І. приділяє увагу пилогазовим хмарам при вибухових роботах та пересувним джерелам газоутворення й надходження пилу при транспортуванні кар'єрних вантажів та їх впливу на забруднення приземного повітря й як наслідок, водних ресурсів [12]. За даними [13] обсяг масового вибуху (до 800-1000 тон вибухової речовини) при буровибухових роботах досягає 2 млн. м³ гірських порід. При цьому, за один вибух в атмосферу викидається 6000-10000 м³ шкідливих газів та 100-250 т пилу. Слід зауважити, що, наприклад, у Криворізькому басейні існує 10 залізорудних кар'єрів на яких на місяць проводяться масові вибухові роботи майже 2-3 рази. На гірничорудних підприємствах, де створюється збагачення та існують хвостосховища, з 1 га

поверхні останнього надходить дисперсний пил у кількості 2-5 т на добу. Антропогенні забруднювачі ґрунтів, як провідного депо повітряних та водних скидів, та приземного повітря поступають в місцеві біогеохімічні потоки міграції та є кругообігом різноманітних речовин [14].

Наступне питання, яке турбує науковців у сенсі проблем навантаження навколишнього середовища гірничорудними підприємствами, це зміна гідрогеологічних умов під час розкриття та розробки корисних копалин та забруднення води, тому що з рудників та шахт щорічно відкачується понад 1 млрд. м³ мінералізованих вод [15].

Стосовно зміни гідрогеологічних умов які відбуваються у 2 напрямках, можна відокремити наступні особливості:

По-перше, зміна структури потоку підземних вод, умов їх живлення та розвантаження внаслідок водозниження чи роботи дренажних систем під час розкриття та розробки рудної залежи. В таких умовах забруднення підземних та поверхневих вод або зниження їх якості пов'язана з декількома факторами:

- з надходженням у дренажні системи вод з підвищеною мінералізацією та токсичними мікроелементами (свинець, ртуть, миш'як та ін.) з глибоких водоносних горизонтів;
- забрудненням вод внаслідок проведення гірничих робіт (буро-вибухові роботи, виймальні роботи, буріння свердловин, тощо);
- надходження у водоносні горизонти забруднених поверхневих вод та забруднюючих речовин із джерел забруднення на поверхні.

По-друге, зміна гідрологічних умов під впливом антропогенних джерел, що не пов'язані з видобуванням корисних копалин безпосередньо. В цьому випадку зміна режиму і балансу підземних вод пов'язана:

- з витокami з гідровідвалів, шламо- і хвостосховищ, ставків-відстійників, накопичувачів стічних вод, водних комунікацій, тощо;
- надходженням забруднених поверхневих вод із вказаних вище споруд, а також атмосферних вод, що забруднюються під час руху крізь відвали гірських порід або проммайданчики промислових підприємств.

Порушення гідрогеологічного режиму зон гідروفільтраційного впливу видобутку руди, на відміну від порушення породного масиву або місць складування відходів виробництва, є більш динамічним фактором. Він здатний доволі різко підсилювати вплив на довкілля всіх інших факторів і в кінцевому рахунку визначати вплив на довкілля всіх інших факторів і в кінцевому рахунку визначити загальну екологічну ситуацію в регіоні.

Тобто, прояв вищезазначених факторів визначає, що розробка залізної руди може мати значний вплив на гідрогеологічну складову довкілля та приводити до забруднення водних ресурсів. Тому основне науково-технічне завдання стосовно цього питання - розробка технології мінімізації екологічного впливу видобутку металевих руд на довкілля [16-19].

Підводячи підсумки, констатуємо, що основні чинники, що сприяють забрудненню геологічного середовища як головного депо наслідків техногенезу, наступні:

1. Зниження рівня ґрунтових вод: розробка залізної руди часто вимагає зниження рівня і осушення ґрунтових вод для забезпечення доступу до руди. Це може призводити до обезводнення та фільтраційної компресії водотривів і зниження розмірів річок та озер.

2. Викиди забруднених речовин: процеси розробки залізної руди часто включають видалення гірської породи та видобуток металевої руди, що може викликати викиди забруднених речовин у водойми. Це можуть бути рудні тискні води, що містять важкі метали, хімічні речовини та інші забруднюючі речовини.

3. Водний стік з утворених шахтних виробок: після закінчення розробки руди утворюються шахтні об'єкти, такі як розриті ями та стоки. Ці об'єкти часто можуть стати джерелом забруднення водних ресурсів через інфільтрацію до ґрунтових вод та стоки у поверхневі водні потоки.

4. Ерозія та зсуви: розробка залізної руди може спричинити зміни в земній поверхні ділянок шахтних (кар'єрних) полів, що може призводити до зсувів та активізації ерозії. Це може впливати на якість води, забруднюючи її вторинними забруднювачами, такими як ґрунт та інші речовини.

5. Зміна гідрохімічного складу: процес розробки залізної руди може також призводити до зміни гідрохімічного складу ґрунтових та поверхневих вод. Це може впливати на фізико-хімічні властивості води та природні екосистеми.

Підводячи висновки, нами запропонована наступна схема впливу видобутку корисних копалин на навколишнє середовище (рис. 1.3).

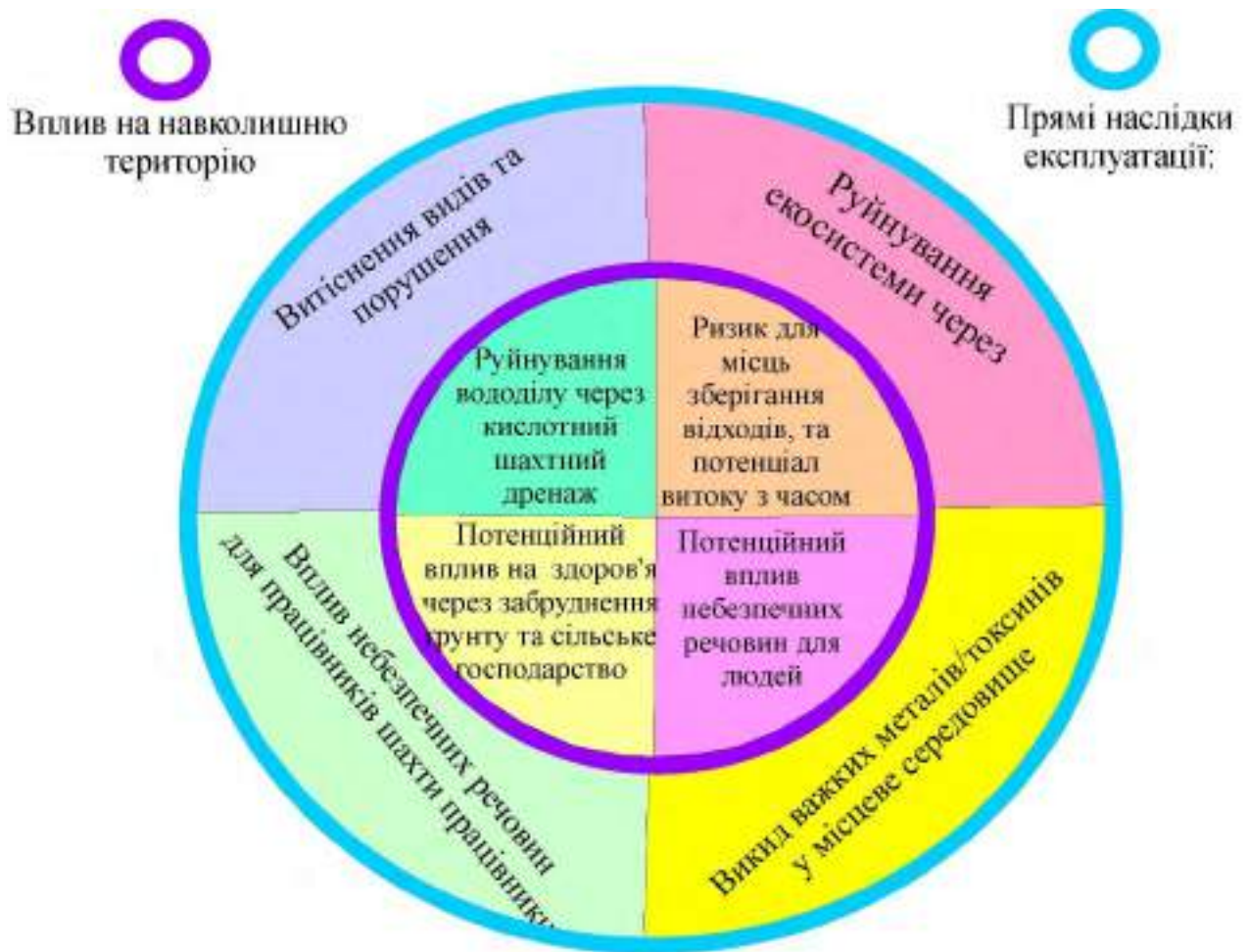


Рис. 1.3. - Схема впливу видобутку корисних копалин на навколишнє середовище

Існує велика кількість країн, які прагнуть припливу не тільки доходів від видобування корисних копалин, але і технологій, які можуть принести нові розробки в гірничодобувній галузі.

Саме тому Уряд України повинен забезпечити видобувну галузь прогресивним партнерством у реалізації стратегій, що сприяють переходу гірничодобувній галузі к життєво важливим цілям сталого розвитку України на

період до 2030 року.

Варто зазначити, що для відновлення та розвитку України вже сьогодні чітко постає потреба в нарощуванні виробництва та видобутку з застосуванням галузевих рішень екологізації видобування, при цьому великі гірничодобувні компанії виявляють значну зацікавленість у вирішенні наявних проблем [20].

З погляду на принципи сталого користування та потреби країни в розробці металевих корисних копалин, виникає необхідність у створюванні таких умов видобування, які будуть сприяти зменшенню навантаження видобутку руди на навколишнє середовище. Тому дуже важливими є питання існуючих наукових підходів до оцінювання трансформації геосистем у межах гірничопромислових територій.

1.2. Сучасні наукові підходи до оцінювання трансформації геосистем у межах гірничопромислових територій

Теоретичні основи геоекологічної оцінки техногенно трансформованих ландшафтів сформовані в працях українських учених, зокрема: Шищенко П.Г. (методологія ландшафтно-екологічної оптимізації територій) [21], Гродзинський М.Д. (стійкість геосистем і екологічний ризик) [22], Бондар О.І. (екологізація гірничого виробництва) [23]. Вони базуються на принципах гармонізації взаємодії між природними ландшафтами та господарською діяльністю, передбачаючи аналіз структури ландшафтів, їх стійкості до антропогенних навантажень та впровадження заходів для сталого функціонування територій.

Початки екологічної оцінки геоекологічного середовища пов'язані з діяльністю інженерів геологів та гідрогеологів, які ввели в науковий обіг поняття «екологічна геологія». В Україні еколого-геологічний напрям активно розвивають О.М. Адаменко [24], Г.І. Рудько, Є.О. Яковлев, В.А. та ін. [25].

Геоекологічні дослідження переважно здійснюють представники географічної науки, зокрема М.В. Багров, а також геоморфологи — І.П. Ковальчук, В.В. Стецюк, В.П. Палієнко та Б.О. Вахрушев [26], Р.О. Спиця, І.Г. Черваньов, М.М. Приходько, та інші [26].

Еколого-ландшафтний підхід сформувався на основі розвитку ландшафтознавства, фахівці: Г.П. Міллер, А.Г. Ісаченко, А.В. Мельник. Вони передбачили оцінювання сучасного стану довкілля шляхом ландшафтного аналізу та вивчення трансформацій природно-територіальних комплексів під впливом антропогенної діяльності [27].

Еколого-геохімічний напрям ґрунтується на працях В.В. Докучаєва, В.І. Вернадського, Б.Б. Полинова, А.І. Перельмана, Ю.Є. Саєта та інших учених. В Україні вагомий внесок у розвиток ландшафтно-геохімії довкілля зробили В.М. Гуцуляк [28], Л.Л. Малишева, та інші дослідники [29].

Геосистемний та ландшафтно-екологічний підхід – це базове методологічне підґрунтя оцінювання трансформації територій рудного видобутку або геосистемна концепція, відповідно до якої гірничопромислова територія розглядається як складна природно-техногенна система з ієрархічною структурою та внутрішніми потоками речовини й енергії. Він базується на аналізі просторової структури, функціонування (латеральні процеси: стік, міграція речовин) та стійкості ландшафтів до навантажень. У межах цього підходу трансформація визначається як порушення структурно-функціональної цілісності геосистеми за рахунок формування кар'єрів, відвалів, хвостосховищ, зон дренажної депресії [30].

Основними індикаторами в межах цього підходу є: ступінь морфологічної перебудови рельєфу; зміна площ ландшафтних контурів; трансформація водно-балансових характеристик; показники біопродуктивності.

Морфометричний та геоморфологічний підхід. Для рудних родовищ (особливо відкритого способу розробки) ключовим чинником є трансформація рельєфу. Формування кар'єрних виїмок глибиною 200–400 м (Криворізький басейн) створює нові геоморфологічні структури з іншими параметрами крутизни, експозиції та вертикальної розчленованості. Дослідження геоморфологічних наслідків видобутку залізних руд ґрунтуються на наступних показниках: зміна амплітуди висот; коефіцієнт вертикальної розчленованості; площа техногенних форм; баланс мас гірничих порід.

Сучасний етап передбачає використання цифрових моделей рельєфу та

дистанційного зондування Землі.

Гідрогеологічний та гідроекологічний підхід. Розробка рудних родовищ супроводжується масштабним водовідливом і формуванням депресійних воронок. Це призводить до: зниження рівнів підземних вод; зміни напрямків фільтраційних потоків; порушення живлення поверхневих водотоків. Тому, оцінювання трансформації здійснюється через: радіус депресійної воронки; зміну п'єзометричних рівнів; мінералізацію шахтних вод; показники кислотного дренажу.

Геохімічний та біогеохімічний підхід. Рудний видобуток супроводжується винесенням на поверхню сульфідних порід, що спричиняє процеси окиснення та формування кислотного дренажу шахт. Це обумовлює: підвищення концентрацій Fe, Mn, Cu, Zn; локальні зони вторинного засолення; деградацію ґрунтів. Оцінювання базується на: коефіцієнтах накопичення; індексах забруднення ґрунтів; співвідношенні фактичних концентрацій до ГДК. Українські дослідження у сфері техногенної геохімії здійснювалися в межах Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України.

Ландшафтно-біоіндикаторний підхід. В ньому, біотичний компонент розглядається як чутливий індикатор трансформацій. Для рудних територій характерні: фрагментація рослинного покриву; зниження видового різноманіття; формування синантропних угруповань. Як правило, застосовуються: індекс NDVI; коефіцієнти фіторізноманіття; оцінка продуктивності фітоценозів.

ГІС та просторово-часове моделювання. Сучасний етап розвитку науки характеризується переходом від статичних оцінок до просторово-динамічного аналізу. Використання ГІС дозволяє: інтегрувати різноманітні дані; будувати карти екологічного ризику; моделювати сценарії розвитку гірничих робіт. Цей підхід відповідає концепції цифрового моніторингу територій та створення 3D-геомоделей.

Комплексний інтегральний підхід. Найбільш перспективним напрямом є формування інтегральних індексів екологічної збалансованості, що поєднують: морфометричні параметри; гідрогеологічні зміни; геохімічні показники;

біоіндикатори; соціально-економічні критерії.

Вплив ймовірного технологічного чиннику видобування залізорудних покладів на зміни екологічного стану середовища в роботах сучасних вітчизняних дослідників остається поза увагою та його, за думкою автора, обов'язково необхідно залучати до пріоритетних чинників оцінювання трансформації геосистем.

Саме тому, незважаючи на значний обсяг досліджень, більшість підходів передбачає або фрагментарну оцінку окремих компонентів довкілля, або статичний аналіз стану території без урахування просторово-часової динаміки. Це зумовлює необхідність формування інтегрального критерію, який би відображав комплексну екологічну збалансованість території гірничодобувного підприємства та оцінювати технологію видобування як першочерговий чинник впливу на зміни екологічного стану довкілля, який впливає на індикацію еколого-збалансованих територій у гірничодобувній галузі.

Саме інтеграція цих підходів створює передумови для оцінювання трансформації геосистем у межах гірничопромислових територій видобутку руди та їх оцінку з точки зору екологізації.

1.3. Аналіз підходів зменшення навантаження на навколишнє середовище гірничорудними підприємствами

Залізна руда відноситься до невідтворювальних природних ресурсів. Тому, незважаючи на достатній резерв розвіданих запасів залізної руди, зараз спостерігається виснаження надр на деяких родовищах, що потребує реформування технологічного та екологічного механізмів користування ними. Сьогодення потребує сталого природокористування. Тобто, на заміну екстенсивного природокористування, яке передбачало інтенсивне використання природних ресурсів і забруднення довкілля викидами до атмосферного повітря та водойм, забрудненням ґрунтів і підземних вод, виникає необхідність використання маловідходних і безвідходних технологій, або екологізація видобутку та виробництва.

Для забезпечення відновлення України та її зростаючих потреб у вигляді матеріального виробництва, необхідно залучати до розробки нові запаси залізорудних родовищ, які раніше не розроблялися з певних причин.

Завдання наукових досліджень щодо екологізації видобутку залізних руд можуть включати наступні аспекти:

1. Вивчення впливу видобутку залізних руд на навколишнє середовище:

- Аналіз змін екосистеми та біологічного різноманіття в районах видобутку.
- Визначення впливу видобутку на якість повітря, води і ґрунту.
- Встановлення екологічних ризиків, пов'язаних з видобутком.

2. Розроблення технологій екологічно чистого видобутку:

- Вдосконалення методів видобутку, що зменшують негативний вплив на довкілля.

- Розробка і впровадження систем очищення та збору шламів, стічних та виробничих вод.

- Використання зелених технологій і енергоефективних рішень.

3. Моделювання та прогнозування екологічних наслідків видобутку:

- Використання математичних моделей для прогнозування впливу видобутку на екосистему.

- Встановлення екологічних показників та стандартів, які допоможуть контролювати вплив на довкілля.

4. Вивчення можливостей реабілітації територій після видобутку:

- Дослідження ефективності різних методів рекультивації та відновлення порушених природних біотопів.

- Розроблення та впровадження планів раціонального використання територій після закінчення видобутку.

5. Економічний аналіз екологічно чистих технологій:

- Оцінка вартості впровадження екологічних заходів у видобутку залізних руд.

- Визначення можливості економічного вигоду від впровадження екологічно чистої технології.

6. Залучення зацікавлених сторін:

- Взаємодія з місцевою громадою, окремими групами та організаціями, щоб забезпечити участь громадськості у прийнятті рішень та зменшити протистояння.

- Співпраця з виробниками, урядовими органами та міжнародними організаціями з метою розвитку стандартів та політик щодо екологічно чистого видобутку залізних руд.

Результати таких наукових досліджень допоможуть покращити стан довкілля, підвищити ефективність видобутку та створити умови для сталого розвитку гірничої промисловості.

Визначення принципів та пріоритетів охорони довкілля базується на змінах відносин між природою та суспільством таким чином, коли суспільна система стабілізує природну. Тому, необхідно вирішувати дві основні задачі:

- запобігання погіршення стану природного середовища;
- запровадження раціонального використання природних ресурсів.

Більш того, пріоритети державної екологічної політики, що визначені у ЗУ «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» передбачає стратегічні цілі: збалансоване використання природних ресурсів та зниження екологічних ризиків та безпечне довкілля [31].

Якість життя є на сьогодні дуже важливим показником, якій потребує роз'яснення. Аналіз екологічних аспектів розвитку суспільного прогресу вказує на тенденцію до збільшення кількості штучно створених людиною систем, які витісняють або замінюють природне середовище. Тому на думку фахівців (Хилько М. І., та ін., 1999) природне середовище зрештою розчиниться в навколишньому [31]. Тим самим суспільство буде поставлено перед необхідністю розробки методів управління створеним ним середовищем.

На думку (В. Петрук, 2024) зараз перед наукою поставлено питання про розробку системи заходів, що «мають за мету не тільки раціональне використання природних ресурсів і охорону природи, а й підвищення якісного рівня оточуючого людину середовища, яке по суті справи є показником якості життя людей».

Надзвичайно важливим є усвідомлення того, що в середовищі

життєдіяльності суспільства є лише одна складова, яка характеризується двоїстою, тобто і соціальною і біологічною природою, це населення. А це означає, що саме населення може виступати в ролі своєрідного індикатору стану довкілля. Такі фактори, як рівень здоров'я, захворюваності різних вікових категорій населення, а також рівень смертності відображають зміни, які відбуваються в якості навколишнього середовища. Означені фактори є виразниками біологічної природи населення. А соціальний аспект виявляється в змінах потреб людей, що й визначає напрямки й цілі розвитку техносфери і соціального середовища. А от підвищення якості життя людей визначає і принципи їхньої екологічної поведінки, тобто можливість чи неможливість того чи іншого методу природокористування.

Оскільки, розробка залізної руди може мати серйозний вплив на гідрогеологічну складову довкілля та призводити до значного забруднення водних ресурсів, необхідно вживати заходів для мінімізації цього впливу шляхом впровадження ефективних технологій очищення води, контролю над скидами забруднених речовин та збереження природних водонапорів.

Сучасні методи збереження природних водонапорів включають в себе ряд заходів, спрямованих на збереження природного балансу води і запобігання її надмірному використанню. Деякі з них мають наступні риси:

1. Захист водоносних зон: Це відрізки землі, що оточують джерела, річки та інші природні водонапори. Заборона будівництва промислових підприємств, шкідливих для водного середовища, у цих зонах і встановлення обмежень на використання хімічних речовин інших джерел забруднення може зберегти якість джерел води.

2. Використання стічних вод: Замість відведення стічних вод у водойми, їх можна використовувати для поливу сільськогосподарських угідь, промислової інфраструктури та інших цілей, де не потрібна вода високої якості. Цей підхід допомагає зменшити навантаження на природні водонапори.

3. Збереження і заростання вологовидалених місць: Вологовидалені місця, такі як болота, болота і інші водні екосистеми, забезпечують природний зберігальний об'єм і фільтрацію води. Збереження цих екосистем і підтримка їх

здоров'я є важливим чинником збалансованого водоспоживання.

4. Системи збирання дощової води: Використання систем збирання дощової води може допомогти зменшити залежність від природних водонапорів. Вода зібрана з покрівлі або інших поверхонь може бути використана для поливу рослин, пильоводопостачання та інших побутових потреб.

5. Підтримка біорізноманіття: Збереження біорізноманіття в регіонах навколо природних областей живлення поверхневих і підземних вод і обмеження еколого-техногенного впливу промислової діяльності, яка може негативно вплинути на екосистему взаємодії водоносних горизонтів і річкової мережі.

6. Освіта та обізнаність: Важливим кроком у збереженні природних водонапорів є освіта громадськості про значення збереження водозабезпечення та ефективного використання водних ресурсів. Чим більше люди будуть свідомими про це питання і бережливо використовуватимуть воду, тим більше шансів зберегти природні водонапори.

Застосування перелічених методів сприятиме збереженню природних водонапорів, забезпеченню стабільного водопостачання та збереженню екологічної рівноваги в регіонах

Враховуючи ситуацію сьогодення, наприклад, у місті Гуляй Поле, коли ця територія опинилася у «сірій зоні» в зв'язку з військовими діями, природничий потенціал території (екосистема) дуже порушений. Забруднення вод та ґрунтів, випалювання лісів, великий обсяг хімічного забруднення та порушення ландшафтів від снарядів, будівництво фортифікаційних споруд та проїзд техніки, що спричиняють ерозію ґрунту – все це призводить до того, що територія за екологічними параметрами поступово стає непридатною для життя людей. Військові дії стають причиною зменшення біорізноманіття та призводять до руйнування природних екосистем. Тобто, поступово територія втрачає здатність підтримувати життя різних біологічних видів - у тому числі людей. З великою ймовірністю відновити втрачені ліси і річки вже не вийде. Умови життя в цьому регіоні України стануть менш сприятливими, ніж були раніше.

Руйнування екосистеми призвело до змін в складі екопараметрів життя

району досліджень. Гуляйполе розташоване на межі трьох областей (саме місто у Запорізькій, але межує із Донецькою та Дніпропетровською) і було дуже важливим аграрним та рекреаційним населеним пунктом. Наявність ландшафтного заказнику місцевого значення «Балка Різана» та об'єкту природно-заповідного фонду - Ботанічного заказнику місцевого значення «Цілинні пришляхові смуги» робили цю територію зоною з обмеженим використанням земель. В сучасні часи практичне усі ці об'єкти ПЗФ зруйновані.

Оскільки екосистемні послуги мають великий соціальний аспект втрата можливості землеробства зробить цю територію безлюдною. Саме тому, можливо саме розробка Гуляйпільського родовища створить умови для відновлення соціалізації території у зв'язку зі створенням нових робочих місць, що насамперед підвищить економічний потенціал регіону .

Основний еколого-ресурсний виклик в рішенні питання видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища полягає в створенні умов мінімізації впливу на довкілля за рахунок використання новітніх технологій для екологізації виробництва і видобування та врахування прикладів розробок родовищ, що використовують більш екологічно чисті технології.

Наприклад, в деяких країнах досліджують можливість використання альтернативних джерел енергії, таких як вітер, сонце, та гідроелектростанції, для розробки руд заліза. Це може допомогти зменшити вплив на довкілля та сприяти більш сталому розвитку галузі. Яскравий приклад – застосування монокар'єрів (покриті резиною) у залізорудних кар'єрах в Швеції, що допомагають запобігти забрудненню питної води та зменшити ерозію ґрунтів. Одним із прикладів використання біологічно очищеної води є родовище в Канаді, де ефективно відновлюється природне середовище після діяльності кар'єрів. В Німеччині практикують використання технології відновлення після гірничодобувної діяльності. На прикладі родовища залізної руди в Гайльсдорфі, що знаходиться південніше Берліна, після добування відбувається відновлення ландшафту та реконструкція зруйнованих територій. У США існують проекти, спрямовані на використання ефективніших і екологічно чистих технологій розробки залізної

руди. Наприклад, компанія Cliffs Natural Resources здійснює дослідження з використання гідрометалургійних методів для видобутку залізної руди, що дозволяє зменшити використання розчинників та оптимізувати процеси відновлення. У Канаді зустрічаються проекти з використання екологічно чистих технологій в родовищах залізних руд. Наприклад, одне з родовищ у провінції Квебек, що належить компанії ArcelorMittal, використовує біологічно очищену воду та має системи відновлення рельєфу для збереження природного середовища.

Такі приклади демонструють, що існують альтернативи традиційним технологіям, які можуть зменшити негативний вплив на довкілля та сприяти більш сталому розвитку родовищ руд заліза.

Інше питання, це прогнозування наслідків впливу кар'єрного видобутку заліза на довкілля, яке зазвичай проводиться за допомогою різних методів та програмних засобів. Перший – це моделювання та симуляція, тобто використання комп'ютерних моделей та симуляційних програм, що дозволяє прогнозувати можливий вплив. Ці моделі повинні враховувати наступні фактори: рухи ґрунту, водний потік, взаємодію з твердими речовинами тощо. З їх допомогою можна визначити зміни в якості води, повітря, стану ґрунтів, тощо.

Другий – це екологічні аудити, що використовуються для експертної оцінки і контролю впливу видобутку на довкілля. Вони включають збір та аналіз даних про якість повітря, ґрунту та води. Сертифіковані екологи проводять дослідження, складають звіти та рекомендації щодо зниження негативного впливу видобутку на довкілля.

Наступний – це моніторинг, згідно якого на постійній основі здійснюються спостереження різних показників якості навколишнього середовища, таких як рівень шуму, концентрація шкідливих речовин, забруднення водних джерел тощо. Це дозволяє відстежувати зміни впливу на довкілля та при необхідності ухвалювати заходи для запобігання забрудненню та зменшення впливу.

Особливу увагу треба приділити оцінкам ризиків. Методи оцінки ризиків впливу видобутку залізних руд на довкілля можуть включати різні підходи та інструменти для оцінки потенційних загроз та визначення їх наслідків. Ось кілька

методів, що застосовуються у цій області:

1. **Екологічна оцінка:** Цей підхід включає оцінку впливу видобутку залізних руд на різні компоненти довкілля, такі як повітря, вода, ґрунти, рослини та тварини. Враховуються фактори, такі як розмір та інтенсивність гірничої діяльності, способи видалення та оброблення руди, рівень відходів та забруднення, а також здатність екосистеми до самовідновлення. Екологічна оцінка може визначити потенційні ризики та запропонувати конкретні заходи для зменшення негативного впливу.

2. **Життєцикловий аналіз:** Цей метод дозволяє оцінити повний життєвий цикл видобутку залізних руд, включаючи етапи добування, транспортування, обробки та відновлення. Враховуються різні аспекти, такі як використання ресурсів, енергозатрати, викиди забруднюючих речовин, управління відходами та ефективність процесів. Це дозволяє виявити основні етапи, які можуть мати негативний вплив на довкілля, та знайти шляхи для їх удосконалення.

3. **Ризик-орієнтоване управління:** Цей підхід передбачає ідентифікацію потенційних ризиків у діяльності з видобутку залізних руд та розробку стратегій управління, щоб зменшити ці ризики до прийнятних рівнів. Це може включати впровадження високих стандартів безпеки та екологічного управління, встановлення ефективних систем моніторингу та контролю, розробку планів надзвичайних ситуацій та навчання персоналу.

4. **Моделювання ризиків:** Цей підхід використовує комп'ютерні моделі для прогнозування та оцінки впливу видобутку залізних руд на довкілля. Моделі дозволяють аналізувати різні сценарії та умови, включаючи розробку альтернативних варіантів технологій, визначення потенційних зон впливу та розрахунок ризиків забруднення.

Ці методи можуть застосовуватися окремо або в поєднанні один з одним, залежно від конкретних потреб і умов. Вони дозволяють оцінити ризики та розробити стратегії для зменшення негативного впливу видобутку залізних руд на довкілля.

У даний час існує також багато програмних засобів, що додатково допомагають в аналізі та прогнозуванні наслідків впливу на довкілля. Деякі з них

включають ERDAS IMAGINE, ArcGIS, ENVI, R, MATLAB тощо. Ці програми дозволяють обробляти та аналізувати великі обсяги даних, створювати моделі та візуалізувати результати для подальшого прогнозування та прийняття рішень.

Проведений в дослідженні аналіз «новітніх технологій екологізації виробництва при розробках руд кар'єрним способом» дозволяє надати загальну інформацію про деякі основні напрямки екологічної модернізації в гірничорудній промисловості [32-34].

Перш за все, це використання біорозкладавальних матеріалів, яке допомагає зменшити відходи від рудних розробок. Це може включати використання біокомпозитів для заміни традиційних будівельних матеріалів.

Друге - використання енергоефективних технологій, яке допомагає знизити споживання енергії під час процесу видобутку. Це може включати використання енергозберігаючих конструкцій та обладнання, як от електромобілі, сонячні панелі та енергозберігаюче освітлення.

Третє - використання вторинних ресурсів, такі як відходи виробництва або ретельно перероблені матеріали, для заміни первинних матеріалів. Це допомагає позбутися відходів та зменшити потенційний негативний вплив на довкілля.

Наступний спосіб - використання сучасних методів очищення, які дозволяють знизити кількість токсичних речовин та забруднення руди в процесі видобування. Наприклад, застосування фільтрації та хімічних реагентів для видобування руди може зменшити шкідливий вплив на водне середовище. Останній - впровадження систем управління екологічною безпекою для забезпечення дотримання норм та стандартів щодо охорони навколишнього середовища. Це допомагає забезпечити ефективне використання ресурсів та запобігти надмірному забрудненню.

Новітні технології створюють умови екологізації за рахунок великої поваги до довкілля та сприяють його збереженню. Технологічні тенденції сталого розвитку в гірничодобувному секторі мають наступний вигляд;

Автоматизація: Використання автоматизації та дистанційного керування в гірничодобувній галузі зумовлене продуктивності, охорони здоров'я та безпеки, але

також має позитивний вплив на екологічні показники. Наприклад, автоматизовані кар'єрні вантажівки і бурові установки можуть зменшити викиди, більш ефективно використовувати ресурси та подовжити термін служби обладнання.

Електрифікація: Гірничодобувний сектор не уникнув глобального переходу до електричних електромобілів та використання відновлюваних джерел енергії, що має потенційні вигоди для підвищення ефективності використання ресурсів, надійності та скорочення викидів. Наприклад, для шахт, що працюють поза мережею, відновлювані джерела енергії або гібридні системи зменшують викиди та експлуатаційні витрати, одночасно підвищуючи надійність. Для підземних шахт перехід на електромобілі означає безпечнішу та ефективнішу роботу.

Використання даних і дистанційного зондування кардинально змінили якість і кількість даних, до яких мають доступ гірничодобувні компанії. Наприклад, геологорозвідувальні компанії тепер можуть покладатися на цілий ряд різних геофізичних технологій і технологій дистанційного зондування, які показують, що знаходиться під поверхнею, відбирати зразки і приймати рішення про те, розробляти шахту чи ні. Можливість вчасно отримувати необхідні дані та їх використовувати, навіть, без втручання у докілья - це велике досягнення сучасності.

Покращення екологічних показників гірничодобувного сектору має відчутні економічні та соціальні вигоди для гірничодобувних компаній і позитивний вплив на інші сектори економіки. Однак у нашій країні лише деякі з цих переваг є очевидними. Державна політика може відігравати важливу роль у сприянні передачі навичок і технологій, підтримуючи її впровадження через структури стимулювання, запроваджуючи передачу технологій та підготовку кадрів шляхом включення передачі технологій до ліцензій на видобуток корисних копалин, заохочення видобувних компаній до максимізації місцевих закупівель, а також шляхом підтримки місцевих компаній заохочення гірничодобувних компаній до максимального використання місцевих закупівель та підтримки місцевих компаній у дотриманні міжнародно визнаних стандартів, а також шляхом розвитку людського потенціалу через програми освіти та професійної підготовки.

Впровадження нових технологій: Гірничодобувний сектор може виступати каналом для розгортання нових "зелених" технологій, зокрема автоматизації, які можуть бути перенесені в інші сектори економіки. Більш енергоєфективні операції, підвищення рівня електрифікації та використання відновлюваних джерел енергії також можуть бути застосовані в інших секторах економіки.

Екологічні послуги: Цей напрямок може також створити нові ринки для компаній, що надають екологічні послуги, які допомагають гірничодобувним компаніям стати "зеленими". Екологічні послуги актуальні на кожному кроці видобувного процесу, включно з етапом оцінки впливу на довкілля, етапом експлуатації та рекультивації екологічної оцінки, етапу експлуатації, закриття шахти та рекультивації території.

Зелена спільна інфраструктура: Видобуток корисних копалин вимагає значних обсягів інфраструктури, включаючи транспорт, водопостачання та енергопостачання. Ця інфраструктура може використовуватися на користь місцевим громадам, а також для підтримки розвитку інших галузей промисловості, пом'якшуючи при цьому вплив на навколишнє середовище.

Циркулярна економіка: Концептуальне переосмислення економіки від лінійних моделей використання матеріалів (сировина, виробництво, використання та утилізація) до моделі безвідходної (матеріали повторно використовуються, переробляються або переробляються на кожному економічному етапі), має потенційно може вплинути на гірничодобувну галузь у багатьох сферах:

- «Міська копальня» промислових приладів та електроніки, які можуть бути перероблені та перероблені, є потенційно багатим джерелом промислових приладів та електроніки, які можуть бути перероблені, є потенційно багатим джерелом металів.

- Хвостосховища та відвали пустих порід зі старих гірничодобувних підприємств можуть містити метали через неефективні або економічно неефективні методи видобутку під час їхньої первинної переробки.

- Зростаюча здатність відстежувати металеві та мінеральні товари від місця їхнього походження створює потенціал для нових бізнес-моделей від місця їхнього

походження до нових бізнес-моделей, де гірничодобувні компанії залишаються відповідальними за переробку та утилізацію металів, які вони продають.

- Вертикально інтегровані бізнес-моделі, що використовують як вторинні метали з переробних підприємств, так і первинні метали як вторинні метали з переробних підприємств, так і первинні метали безпосередньо з шахт.

Сучасні природоохоронні технології захисту навколишнього середовища та забезпечення екологічної безпеки в гірничодобувній галузі залізних руд потребують постійного фахового розуміння необхідності їх впровадження, осучаснення та беззаперечного використання.

Методи досліджень. В роботі використано комплекс науково-практичних методів, які базуються на аналізі науково-технічної літератури та інших інформаційних джерел; методи системного аналізу умов і особливостей формування техногенного впливу гірничодобувної галузі на довкілля (дерево рішень та Баєсова мережа) пошуку ефективних заходів для поліпшення екологічного стану; методи екологічного моніторингу для експертного оцінювання екологічного ризику; методи статистичного аналізу; геоінформаційний метод представлення та відображення екологічної інформації при розробці природоохоронних заходів спрямованих на поліпшення екологічної обстановки; метод 3D моделювання компонентів родовища. Інформаційна база досліджень та фактичний матеріал був зібраний автором самостійно та в результаті опрацювання даних геологічного звіту та графічних матеріалів з ресурсу «Мінеральні ресурси України» та фонду ДНВП «Геоінформ України», сучасні данні Публічної кадастрової карти України, сучасні данні космічних знімків та моніторингові гідро-геохімічні показники Державного агентства водних ресурсів України (ДАВРУ) та дані вітчизняних наукових праць з питань прогнозування та оцінки впливу промислового видобутку корисних копалин на довкілля.

1.4. Вплив технології розробки родовищ на характер трансформації території

Спосіб розробки родовища є одним із ключових чинників формування

масштабів та інтенсивності техногенного впливу.

Відкритий спосіб розробки супроводжується значним вилученням земельних ресурсів, формуванням глибоких кар'єрів та великих обсягів розкривних порід. Зі збільшенням глибини кар'єру відбувається розширення його площі, що обумовлено геометрією бортів і залежить від кута їх укосу.

Підземний спосіб видобутку характеризується меншими площинними порушеннями, однак може супроводжуватися деформаціями земної поверхні, просіданнями та зміною гідрогеологічних умов.

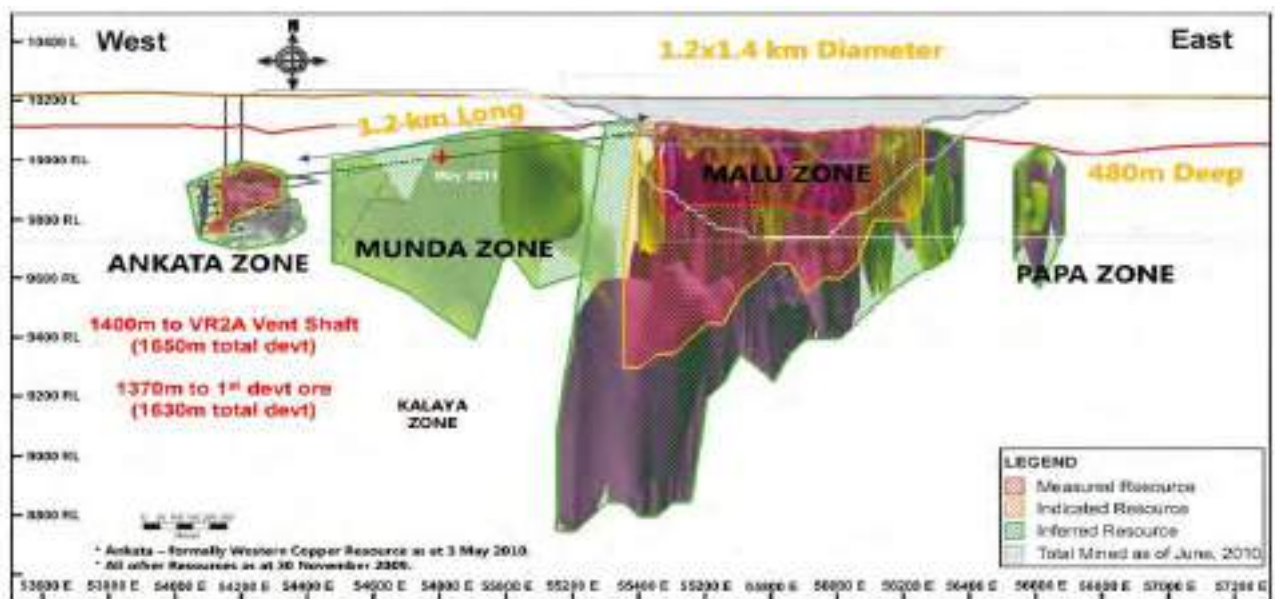
В умовах зростаючого попиту на мінеральні ресурси та посилення вимог до екологічної безпеки окремі гірничі підприємства світу широко досліджують **змішані технологічні схеми розробки родовищ**, що поєднують **кар'єр і підземні роботи**. Такий підхід має потенціал мінімізувати екологічні наслідки видобутку та підвищити ефективність використання ресурсів.

Ідея змішаної схеми (кар'єр + шахта на великих глибинах) полягає в оптимальному поєднанні: **кар'єрних робіт** на меншій глибині, де вигідно і безпечно видобувати руду; **підземних виробок** — коли кар'єр досягає економічної чи технологічної межі (наближення до ґрунтових вод, тектонічно нестійких зон, екологічно чутливих територій). Цей підхід не новий, але сьогодні його треба широко переосмислити в контексті екологізації гірничих технологій. Практичні проекти демонструють, що змішана система може: зменшувати обсяги відкритих кар'єрів та пов'язаних з ними техногенних порушень; скорочувати площі порушених земель; мінімізувати негативний вплив на гідрогеологічний та ландшафтний режими; підвищувати економічну ефективність розробки родовищ.

Наприклад, у Австралії змішані схеми застосовуються на родовищах з глибоким заляганням корисної копалини (оксидні руди заліза та Au–Cu родовища). На цих комплексах кажуть про «ступінчасту» схему, де кар'єрна розробка переходить у підземні виробки з переходом на безбар'єрну систему вентиляції та безпеки ґрунтових вод. Це родовище Prominent Hill (Південна Австралія) (рис. 1.4), [35].



а



б

Рис. 1.4. - Родовище Prominent Hill, кар'єр Malu (а), з деталізацією послідовності видобутку за рахунок зміни технології видобутку (б)

Спочатку розробка велася через гігантський кар'єр Malu (480 м глибина), але з досягненням великої глибини вона трансформувалася у підземний видобуток через похилі з'їзди та шахтні стовбури. Саме на таких об'єктах впроваджують інтегровані системи, де вентиляційні потоки кар'єру та шахти координуються для

енергоефективності, а моніторинг ґрунтових вод стає єдиним бар'єром для захисту екосистеми пустелі. Роботи почали відкритим способом через кар'єр Малу у 2009 році. У 2012-му додалась розробка рудного тіла Анката, до якого проклали похилий тунель завдовжки близько 1,3 кілометра (з верхніх ярусів кар'єру Малу). У 2014-му почав діяти підземний рудник Малу з доступом через відгалуження від тунелю. З 2018-го розробка кар'єру припинилась, після чого роботи тривали тільки підземним способом.

В першій половині 2020-х для досягнення нижніх горизонтів рудного тіла Малу узялись за спорудження шахтного стовбуру «Віра» (Wira), який має досягнути глибини у 1360 метрів (завершення у 2025 році) [35].

Також подібна модель реалізована на залізорудному проєкті Greater Solomon компанії Fortescue (Австралійська залізорудна компанія), де поєднуються різні типи виїмок для оптимізації доступу до глибоких оксидних руд та екологізації гірничого виробництва.

На деяких родовищах Ni–Cu–PGE (нікелево-мідій-платинові групи елементів) в Канаді застосовують схему «від стелі до підосви»: верхня частина родовища видобувається кар'єрно, нижня — підземним способом. Це мінімізує кількість техногенних відвалів і зберігає цінні екосистемні компоненти. Така комбінована схема розробки є характерною для великих канадських родовищ, зокрема в рудних районах Садбері (Sudbury) та Томпсон (Thompson).

Найвідомішим прикладом є проєкт Voisey's Bay компанії Vale у Лабрадорі. Там видобуток розпочався з кар'єру на родовищі Ovoid (в неглибокій зоні), а наразі триває перехід до підземної експлуатації зон Reid Brook та Eastern Deeps для доступу до глибших покладів. Це розширення, яке включає будівництво нових підземних шахт та інфраструктури, такої як конвеєрні системи [36].

В Україні, попри те що переважна частина видобутку залізної руди ще здійснюється відкритим способом у Криворізькому басейні, змінена геологічна ситуація та геотехнічні умови багатьох родовищ роблять змішані схеми перспективними. У деяких наукових публікаціях українських дослідників підкреслюється необхідність переходу до комбінованих технологій у зв'язку з

поглибленням корисних копалин [37, 38]. Автори бачать плюси змішаної системи в зменшенні площі техногенних порушень, важливості інтеграції з системами вододренажу, рекультивації та моніторингу.

Змішана (кар'єрно-шахтна) система поєднує переваги обох способів і передбачає розробку верхніх горизонтів відкритим способом з подальшим переходом на підземний видобуток на більших глибинах. Такий підхід потенційно дозволяє:

1. Зменшення площі порушених земель. Комбінований підхід дозволяє обмежити розміри кар'єрної виїмки, що безпосередньо знижує площу порушених територій, обсяги гірничих відходів та техногенних ландшафтних структур.

2. Менше техногенного впливу на ландшафти. Підземні роботи менш помітні на поверхні: катастрофічних форм рельєфу менше, знижується ерозійне навантаження та зміна водозборів, менше впливів на флору і фауну.

3. Зниження рівня шуму, пилу, викидів. Відкриті виробки є джерелами найбільшого пилового навантаження та шуму. Перехід на підземні виробки в глибших горизонтах зменшує ці складові.

4. Контроль водних ресурсів. Скорочення масштабів депресійної лійки. У змішаних схемах легше організувати систему гідрогеологічного моніторингу та регулювання водовідливу, що важливо з огляду на ризики забруднення та зміни гідрогеологічного режиму.

1.5. Обґрунтування напряму досліджень та постановка задачі

Проведений аналіз наукових джерел свідчить, що питання екологізації гірничодобувної діяльності широко досліджуються в працях вітчизняних і зарубіжних учених. Розроблено значну кількість технологічних, організаційних та природоохоронних рішень, спрямованих на зниження негативного впливу на компоненти довкілля.

Сучасні підходи до формування екологічно безпечних територій у зонах видобутку корисних копалин можна систематизувати за такими напрямками:

1. Технологічні рішення, спрямовані на зменшення викидів, скидів та

утворення відходів.

2. Гідрогеологічні підходи, що передбачають контроль за рівнями підземних вод та попередження депресійних лійок.

3. Рекультиваційні заходи, орієнтовані на відновлення порушених земель після завершення експлуатації родовищ.

4. Моніторингові системи, що базуються на використанні ГІС-технологій та дистанційного зондування.

5. Організаційно-управлінські механізми, спрямовані на регулювання техногенного навантаження.

Разом із тим встановлено, що більшість досліджень мають фрагментарний характер і розглядають окремі аспекти впливу гірничодобувного виробництва без формування інтегрованої моделі екологічної рівноваги території. Аналіз існуючих досліджень показує, що оцінювання окремих компонентів довкілля не дозволяє сформувати цілісне уявлення про екологічний стан гірничопромислової території.

Для забезпечення об'єктивного порівняння різних технологічних сценаріїв розробки родовищ необхідним є формування інтегрального підходу, який враховує: площу порушених земель; обсяг розкривних робіт; зміни гідрогеологічного режиму; рівень хімічного забруднення; біоекологічні показники.

Основними недоліками існуючих підходів є:

- відсутність комплексного інструментарію прогнозування трансформації екосистем на всіх етапах життєвого циклу родовища;

- недостатня інтеграція технологічних і природоохоронних рішень у єдину систему управління;

- відсутність просторово-часових моделей оцінки кумулятивного впливу;

- обмежене використання 3D-моделювання для аналізу змін екосистем;

- відсутність науково обґрунтованих критеріїв формування еколого-збалансованих територій у постмайнінговий період.

- відсутність інтегрального критерію оцінки екологічної збалансованості

Під інтегральним критерієм екологічної збалансованості території гірничодобувного підприємства пропонується розуміти узагальнений

багатофакторний показник, що враховує просторовий розподіл техногенного навантаження та часову динаміку трансформації компонентів екосистем і дозволяє кількісно оцінити ступінь відхилення природної системи від стану екологічної рівноваги.

Слід зауважити, що це узагальнений кількісний показник, який об'єднує декілька екологічних параметрів у єдину оцінку стану території. Тобто, замість окремих: концентрації забруднювачів, рівня підземних вод, площі деградованих земель, інтенсивність ерозії, втрати біорізноманіття, ми формуємо єдиний показник, який показує: наскільки територія є екологічно збалансованою або дестабілізованою.

Інтегральний критерій повинен формуватися на основі просторово диференційованих параметрів, що мають координатну прив'язку та вертикальну структуру (глибина кар'єру, висота відвалів, рівень ґрунтових вод, міграція фонових забруднювачів та ін.). Тому велику увагу слід приділити оцінці природних умов та геоекологічних передумов формування еколого-збалансованих територій при освоєнні родовищ, бо визначення просторової структури міграційних каналів, природний геохімічний фон та гідродинамічні умови територій є базовими для розробки механізму екологічної рівноваги при освоєнні родовищ корисних копалин.

Особливо актуальною ця проблема є для України в умовах трансформації гірничодобувної галузі та необхідності відновлення територій, що зазнали значного техногенного навантаження.

Таким чином, існує наукове протиріччя між: потребою у нарощуванні видобутку стратегічних корисних копалин, та відсутністю комплексного механізму формування еколого-збалансованої території на основі інтеграції новітніх технологій екологізації виробництва.

Це зумовлює необхідність розробки науково обґрунтованої концепції формування еколого-збалансованої території, що базується на: системному аналізі геолого-гідро-екологічних факторів, інтегрований оцінці техногенного навантаження, застосуванні цифрового 3D-моделювання, розробці механізмів

забезпечення екологічної рівноваги в постмайнінговий період.

Тільки комплексна оцінка дозволить визначити ступінь екологічної збалансованості території та обґрунтувати доцільність впровадження певної системи розробки. Це зумовлює необхідність розроблення інтегрального критерію та моделі його застосування на прикладі Гуляйпільського родовища.

Саме тому, **мета дисертаційного дослідження** - розроблення науково обґрунтованого механізму формування та управління екологічною збалансованістю територій при розробці родовищ корисних копалин (шахтною, кар'єрною та змішаною технологіями розробки) і в постмайнінговий період на основі інтегрального критерію екологічної стабільності з урахуванням геометричних, гідрогеологічних, геохімічних та тектонічних чинників (на прикладі Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів та Полохівського родовищ літію).

Основні задачі досліджень.

1. Проаналізувати природно-геологічні та геоекологічні передумови формування екологічної збалансованості території на прикладі Полохівського родовища літію та Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів.

2. Дослідити відмінності впливу шахтної, кар'єрної та змішаної систем розробки на геологічне середовище, гідрогеологічний режим, геохімічну трансформацію та ландшафтну структуру території.

3. Обґрунтувати систему показників екологічної оцінки та розробити інтегральний критерій екологічної стабільності I_{ES}^* , що враховує техногенне навантаження, зміну гідрогеологічного режиму, геохімічну трансформацію, тектонічну порушеність, технологію видобування КК.

4. Виконати розрахунок інтегрального показника Полохівського родовища та визначити критичні порогові значення стабільності.

5. Обґрунтувати доцільність застосування змішаної (кар'єрно-шахтної) технології видобутку Гуляйпільського родовища на основі інтегрального критерію екологічної стабільності I_{ES}^* шляхом порівняльного розрахунку екологічних наслідків кар'єрної та комбінованої технології розробки з урахуванням геометрії кар'єру, гідрогеологічного режиму, геохімічних показників і тектонічної

порушеності.

5. Провести порівняльну оцінку екологічної збалансованості Полохівського та Гуляйпільського родовищ з урахуванням їх геологічних і технологічних відмінностей.

6. Розробити організаційно-технологічну модель управління екологічною стабільністю території в період експлуатації та постмайнінгу.

7. Сформувати механізм моніторингу та прогнозування змін екосистем постмайнінгових територій із використанням інтегрального критерію як індикатора управління.

8. Обґрунтувати роль адвокаційних, правових та економічних інструментів у системі забезпечення екологічної рівноваги постмайнінгових територій.

Об'єкт дослідження - процеси формування екологічного стану та стабільності природно-техногенних систем у межах гірничодобувних територій на різних стадіях життєвого циклу родовища (експлуатація – ліквідація – постмайнінг).

Предмет дослідження - закономірності інтеграції геологічних, гідрогеологічних, геохімічних і технологічних параметрів у систему кількісної оцінки екологічної збалансованості території та механізми управління екологічною стабільністю в умовах гірничого виробництва і постмайнінгу.

Висновки до розділу 1

Проведено системний аналіз сучасних підходів до формування еколого-збалансованих територій в умовах розробки родовищ корисних копалин.

Встановлено, що гірничопромислові території характеризуються комплексною трансформацією природних геосистем під впливом техногенної діяльності.

Встановлено, що існуючі технологічні та природоохоронні рішення спрямовані переважно на мінімізацію окремих видів впливу (мають переважно компонентний характер) та не забезпечують комплексного управління екосистемною трансформацією територій.

Визначено, що технологія розробки родовища визначає масштаби та

інтенсивність екологічного навантаження.

Виявлено відсутність інтегрованої методики просторово-часової оцінки екологічного стану території родовища з урахуванням інженерно-технологічних параметрів видобутку.

Обґрунтовано необхідність формування інтегрального підходу до оцінювання екологічної збалансованості території, де просторово-часове моделювання виступає інструментом кількісного аналізу та прогнозування змін геосистем.

Сформульовано наукову проблему, яка полягає у створенні комплексної системи формування еколого-збалансованої території в умовах розробки родовищ корисних копалин із застосуванням інноваційних технологій екологізації виробництва.

Отримані результати літературного аналізу визначають напрям подальших досліджень, що представлені у наступних розділах дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. ПРИРОДНО-ГЕОЛОГІЧНІ ТА ГЕОЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГО-ЗБАЛАНСОВАНОЇ ТЕРИТОРІЇ ПРИ ОСВОЄННІ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Для відновлення та розвитку України, вже сьогодні чітко постає потреба в нарощуванні виробництва та видобутку корисних копалин, залучати до розробки нові запаси залізорудних родовищ, які раніше не розроблялися з певних причин, але з застосуванням галузевих рішень екологізації видобування. Екологізація видобутку корисних копалин передбачає втілення передової практики управління водними ресурсами на різних етапах видобутку, що передбачає вибір найбільш відповідних моделей розрахунків та вимірювань, а також втілення методів контролю у вигляді моніторингу [39] та інноваційних технологічних систем розробки рудних корисних копалин [40]. Великі гірничодобувні компанії виявляють значну зацікавленість у вирішенні наявних проблем екологізації (Міжнародна рада з гірничодобувної промисловості та металургії (ICMM) [41], при цьому, найбільша зацікавленість прикута до родовищ залізних та літєвих руд.

Наприклад, станом на 01.01.2023 р балансові запаси залізних руд згідно з даними ДНВП «Геоінформ України» [42] становили 18065,04 млн. т. Кількість родовищ у 2020 році становила 60 од. (рис.2.1). Обсяг балансових запасів розподіляється наступним чином: Дніпропетровська область - 8781,52 млн. т (48,61%), Полтавська - 5038,69 млн. т (27,89%) і Запорізька - 2755,13 млн. т (15,25%).

Наявним прикладом є Гуляйпільське родовище залізистих кварцитів (рис. 2.1). Гуляйпільська магнітна аномалія була виявлена ще в 1931 році Українським геофізичним трестом. В період 1973–1981 років Білозірською геологорозвідочною експедицією ВГО «Південьгеологія» проведена розвідка на площі всієї Гуляйпільської структури.



Рис. 2.1. - Географічне розташування районів залягання залізних руд України (а) з деталізацією контурів покладу Гуляйпільського родовища (б).

Гуляйпільське родовище увійшло до «Переліку ділянок надр (родовищ корисних копалин), які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави» [43], що надаватимуться у користування шляхом проведення аукціонів з продажу спеціальних дозволів на користування надрами та на умовах угод про розподіл продукції.

Зараз ця територія знаходиться в «сірій зоні», але в Україні відбувається повоєнне відновлення інфраструктури та економіки. За думкою фахівців «Метінвесту» [44] Україна може замінити на європейському ринку всю російську металопродукцію. Це дасть змогу українським підприємствам наростити виробництво постраждалого від війни сектору. Враховуючи ситуацію сьогодення, в зв'язку з військовими діями, природничий потенціал території (екосистеми) дуже порушений. Забруднення вод та ґрунтів, випалювання лісів, великий обсяг хімічного забруднення від снарядів, будівництво фортифікаційних споруд та проїзд техніки, що спричиняють ерозію ґрунту – все це призводить до того, що територія за екологічними параметрами поступово стає непридатною для життя людей.

Військові дії стають причиною загибелі біоти та призводять до руйнування природних екосистем. В сучасні часи практичне усі об'єкти ПЗФ що знаходяться поблизу родовища (ландшафтний заказник місцевого значення «Балка Різана» та об'єкт природно-заповідного фонду - Ботанічний заказник місцевого значення «Цілинні пришляхові смуги») зруйновані. У північній частині, Поклад Східний був розташований в ореолі Смарагдової мережі (the Emerald Network), яка є природоохоронною територією європейського значення, створена на виконання положень Бернської конвенції про охорону дикої флори і фауни [45] (рис. 2.2).

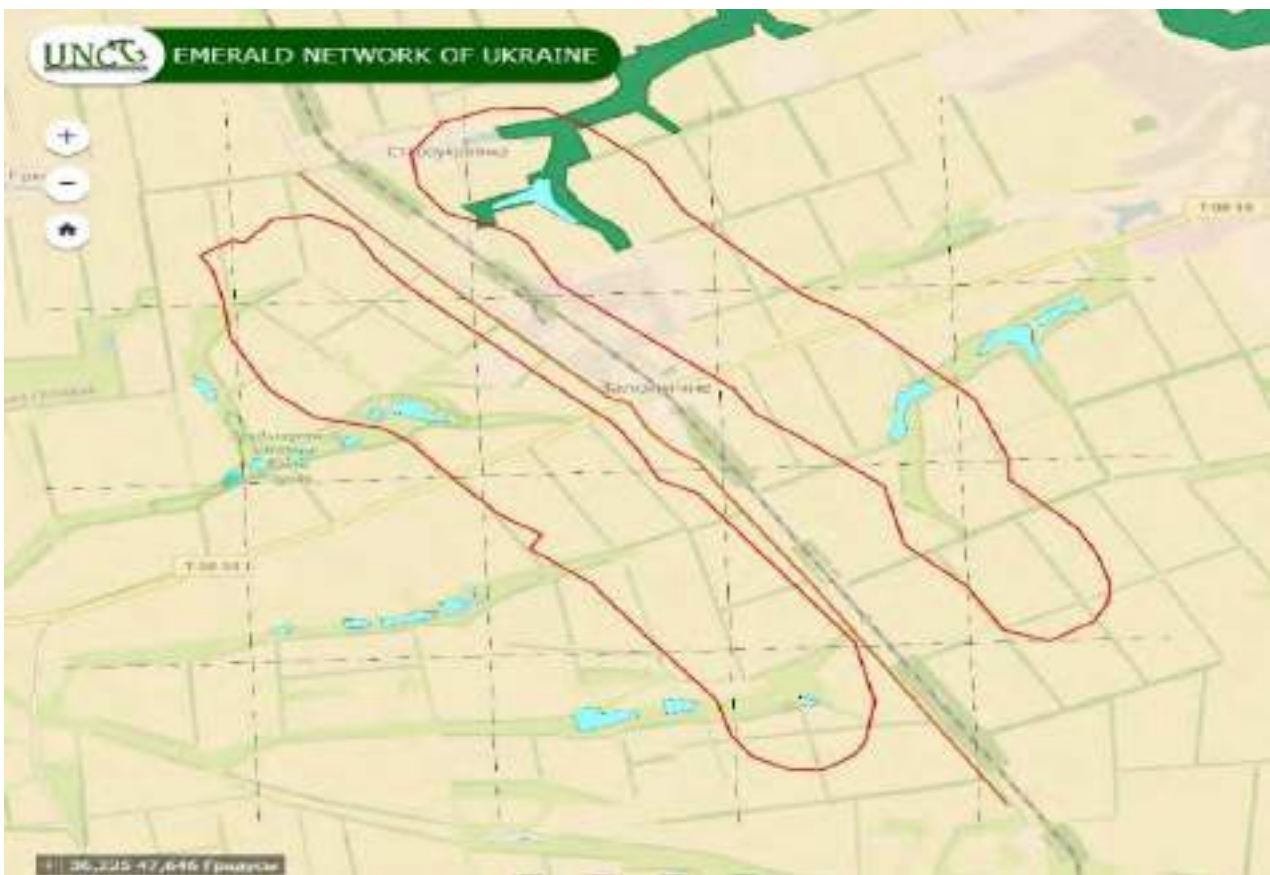


Рис. 2.2. – Результат винесення координат покладу на мапу Смарагдової мережі (сmt. Залізничне) [46].

В сучасні часи, ця ділянка знищена. Тобто, поступово територія втрачає здатність підтримувати життя різних біологічних видів. З великою ймовірністю відновити втрачені ліси і річки вже не вийде. Умови життя в цьому регіоні України стануть менш сприятливими, ніж були раніше.

Руйнування екосистеми призвело до змін в складі життя району, який був

дуже важливою аграрною та рекреаційною територією. Оскільки екосистемні послуги мають великий соціальний аспект [47], втрата можливості землеробства зробить цю територію безлюдною. Саме тому, можливо саме розробка Гуляйпільського родовища створить умови для відновлення соціалізації території у зв'язку зі створенням нових робочих місць, що насамперед підвищить економічний потенціал регіону.

Україна має одні з найбільших у Європі балансових запасів літєвих руд, зосереджених переважно в Кіровоградській, Донецькій та Запорізькій областях. Основні родовища — це Полохівське, Шевченківське, Крута Балка та родовище Балка Діброва (рис. 2.3). В останні роки літій став одним з найбільш затребуваних металів у світі. Це дуже важливий вид мінеральної сировини для інноваційної економіки, використання якої постійно зростає разом з розвитком низки сучасних технологій та виробництвом літій-іонних акумуляторів.



Рис. 2.3. - Географічне розташування районів залягання літєвих руд України

Сучасний попит на цей метал з боку військової та цивільної промисловості вимагає видобутку нових запасів. Наразі промислового освоєння підлягає Полохівське родовище (ПР) літєвих руд. Наприкінці жовтня 2023 р. в Новоукраїнському районі, біля с. Копанки українська компанія «Геобудівельні технології» на замовлення ТОВ «Укрлітйвидобування» розпочала геотехнічне та гідрогеологічне буріння свердловин на ПР петалітових літєвих руд. Планується експлуатація шахти терміном 15-20 років і передбачуванім річним виробництвом до 200 тис. тонн петалітового концентрату [48].

Руди є комплексними. Запаси представлені петалітовими та сподуменовими рудами, розвідані запаси оцінюються у сотні тисяч тонн оксиду літію. Пегматити Полохівського родовища також містять ніобій, тантал і цезій. Запаси становлять 27 774 000 тонн у категорії C₁-C₂ та 4 746 000 тонн у категорії П1.

При освоєнні вказаних родовищ корисних копалин, формування еколого-збалансованої території буде вкрай необхідне.

2.1. Базовий стан умов навколишнього середовища території Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів.

Гуляйпільське родовище залізистих кварцитів розташоване у Гуляйпільському районі Запорізької області (Пологівська громада). На південному заході на відстані 3 км знаходиться м. Гуляй Поле. Поряд з родовищем є з/с «Гуляй Поле» (Залізничне). Родовище має форму еліпсу, що витягнутий у північно-західному напрямку (азимут простягання 310-315°) на 9 км, завширшки приблизно 3 км. Глибина покладу розвідана до 600 м. Родовище, що розвідано, має 2 контури: Західний та Східний (див. рис. 2.1, б). Площа родовища - 936 га. Детальна розвідка Західного крила родовища виконувалась в період 1981–1985 років Білоярською ГРЕ. Гуляйпільське родовище має поклади корисних копалин, включаючи поклади сланцю, кварциту та залізних і германієвих руд.

З точки зору геолого-економічної оцінки Гуляйпільського родовища, воно характеризується великими компактно локалізованими запасами залізистих кварцитів (3,5 млн т категорії B+C₁+C₂) [49].

Руди родовища, незважаючи на відносно невисокий зміст заліза магнетитового (16,6%) при загальному залізі 25,2% є легкозбагачуваними за простими схемами магнітної сепарації і забезпечують можливість отримання високоякісних концентратів (69 – 70,3%). В результаті оцінки на основі кондицій за результатами попередньої та детальної розвідок на державний баланс прийнято приріст запасів у кількості 1314,2 млн. т, зокрема, за західним синклінальним крилом - 999,5 млн. т.

Великі потужності рудного пласта і майже однорідний склад дадуть змогу успішно застосовувати під час експлуатації родовища високопродуктивні комплекси відпрацювання руди відкритим способом. Рентабельність наміченого до освоєння родовища на стадіях пошукової оцінки та попередньої розвідки, з урахуванням одержання як планованої продукції окатишів із вмістом у них заліза 63,5%, а також продуктів збагачення, які використовуються попутно, становить 15,4%. При цьому багатоваріантні техніко-економічні розрахунки засвідчили, що родовище є найбільшим за запасами в Приазовському районі і його можна відпрацьовувати самостійним ГЗК з продуктивністю 25 млн. т/рік (608 млн. т концентрату). Найвигіднішим для відкриття планованого розроблення є рудний пласт західного синклінального крила, який забезпечить термін служби кар'єра протягом понад 50 років.

Рельєф району представлений слабо горбистою рівниною з балками, річними долинами та ярами. Абсолютні відмітки поверхні безпосередньо на площі родовища коливаються від 124,5 до 157 м.

2.1.1. Геологічна будова як фактор екологічного ризику

В геологічній будові родовища беруть участь складно дислоковані та глибокометаморфізовані комплекси порід докембрію, кора вивітрювання і осадові відклади мезокайнозою. Розкриті породи: четвертинні відклади – суглинки, глини, піски; полтавські; харківські – піски, пісковики, алевроліти, глини; буцацькі – зверхньодрібні піски, глини, мергелі; кора вивітрювання – глиноподібна пісковиковоподібна «м'яка кора» та кристалічні породи (метаморфічні породи) – кварцити, сланці.

Товща метаморфічних порід родовища поділяється на три підсвіти: нижня – сланцеве-пісковикова, середня – залізисте-кремнієва, верхня – пісковикове-сланцева.

Продуктивна товща належить до середньої світи. Пласти магнетит-силікатних кварцитів середньої світи, які залягають в Західному та Східному крилах синклінальної складки, простежуються на відстань 9,0 км, ширина між прошарками складки по пласту залізистих кварцитів біля 3,0 км. Протяжність пласта залізистих кварцитів 17 км. Замикання складчастої структури передбачається на глибині до 3-3,5 км. Будова крил витримана за простяганням, але ускладнюється у південно-західному крилі дрібнішими складками та розривними порушеннями. Останні виявляються у північній та, особливо, південній частинах родовищ. Орієнтовані вони у субширотному, північно-східному, меншою мірою субмеридіальному напрямках. Найбільш тектонічно опрацьованою частиною структурою є південно-західне крило. Тут виражені метасоматичні зміни, як у гранітах, так і метаморфічній товщі [50].

Інженерно-геологічні та гірничо-технічні умови досить складні, середня потужність розкриву сягає 120 м, коефіцієнт розкриву $1,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Продуктивний пласт складений кумінгтоніт-біотит-магнетитовими, стильномелан-магнетитовими і кумінгтоніт-магнетитовими кварцитами. Потужність товщі залізистих кварцитів змінюється від 5 до 425 м. Падіння пластів залізистих кварцитів на крилах складки центроклинальне під кутом $68\text{--}87^\circ$. Потужність внутрішньо-рудних прошарків, слабо зруднілих та порожніх порід по покладах Західного крила коливаються від 1 до 25 м. Оконтурювання рудних покладів проведено згідно кондиціям з мінімальною потужністю 10 м та максимальною потужністю внутрішньо-рудних прошарків при бортовому вмісті 12% заліза магнетитового.

За масштабом, умовам залягання та характером розповсюдження корисної копалини Західна частина Гуляйпільського родовища віднесена до 2 групи класифікації запасів родовища та прогнозних ресурсів. По площі західного крила Гуляйпільського родовища встановлено два типи руд. В верхній частині, в межах

розвитку площадкової кори вивітрювання, знаходяться окислені сидерит-мартит-лимонітові, в нижній частині – неокислені кварцити. Глибина розповсюдження зони окислення 120–150 м від поверхні. Неокислені кварцити представлені наступними різновидами: біотит-кум'їнтгоніт-магнетитові (висячий блок), стильпно-мелан-рибекіт-магнетитові (центральна частина) та кум'їнтгоніт-магнетитовими (лежачий блок).

У складі Гуляйпілько-Куйбишевської купольної структури виражено гранітоїдний комплекс за участю тоналітів, плагіогранітів, діоритів, роговообманкових та інших типів гранітів та мігматитів, зупинкових тіл ультрабазитів, базитів. Вік плагіогранітів 2800 млн. років, мікроклінових гранітів – 2010 млн. років [51].

У тектонічному відношенні Гуляйпільський район знаходиться у Приазовському кристалічному масиві, який є південно-східною частиною Українського щита (УЩ). Кордоном Приазовського регіону служить Бердянська зона розломів на півдні, яка відокремлює його від Азово-Чорноморської западини. На півночі регіон межує з Південно-Донбаською зоною розломів із Дніпрово-Донецькою западиною (ДДЗ) та складчастим Донбасом. Східна його околиця проходить по Грузько-Еланчикській зоні розломів, пастка – по Ореховській шовній зоні (Оріхово-Павлоградська складчаста зона). Характерною особливістю Гуляйпільського блоку є північно-західне простягання в ньому розломів, порід та шарнірів складчастих структур, що підкреслює незгоду його з сусідніми структурами – Корсакською та Орехово-Павлоградською складчастими зонами [51]. У більш широкому тектонічному аспекті територія включена до Приазовської металогенічної області, до складу якої крім Гуляйпільського рудного району так само входять Вовчанський, Західно-Приазовський та Східно-Приазовський.

Тектонічні форми, що визначають розміщення рудних зон – поєднання купольно-кільцевих структур, глибинних регіональних порушень, що визначили складно-блокову будову Приазов'я та просторовий розподіл депресійно-складчастих синклінальних зон (рис. 2.4, а, б).

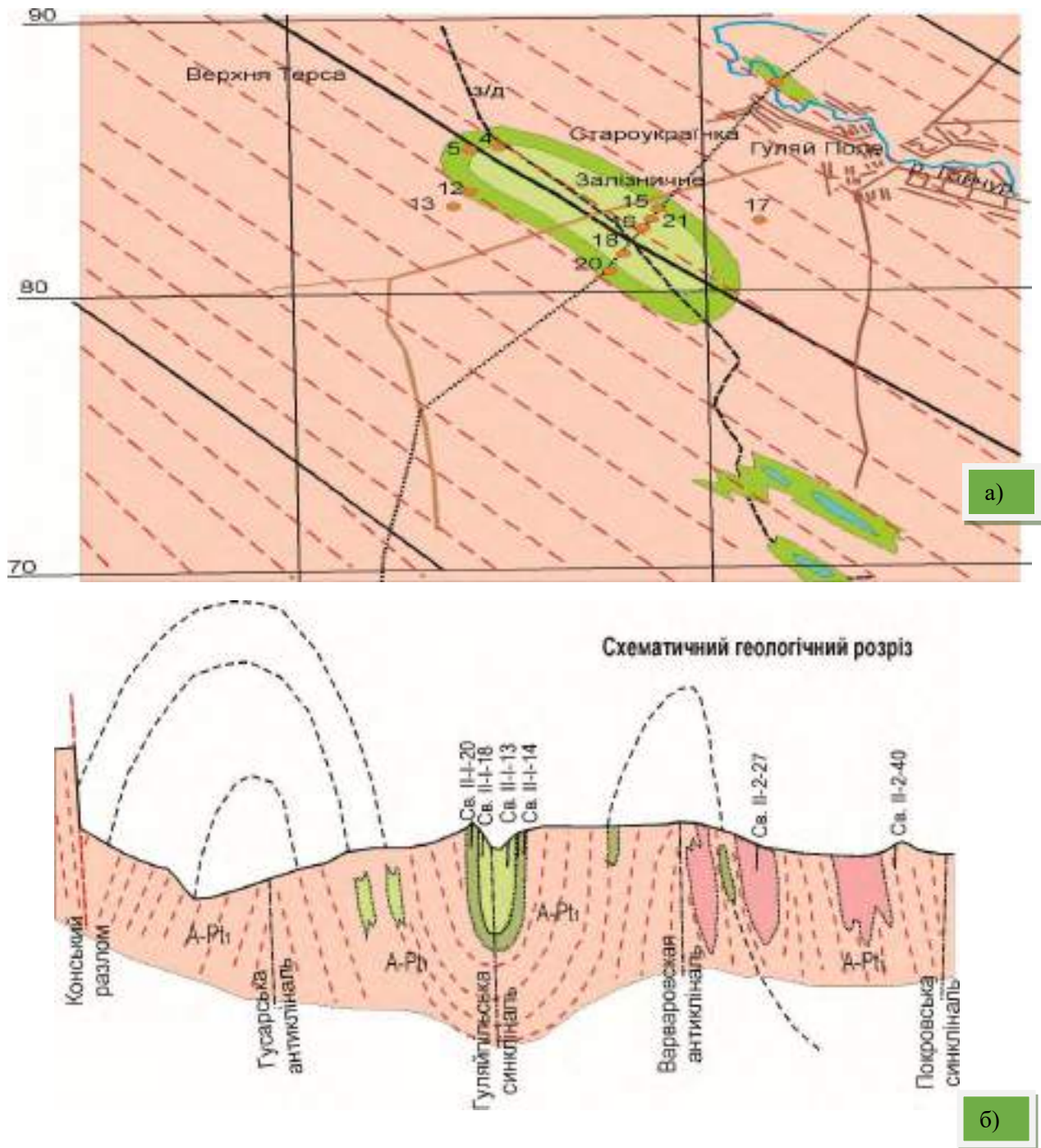


Рис.. 2.4. Фрагмент геологічної мапи докембрію в зоні рудоносної структури (а), доповнений геологічним розрізом по лінії 1-1 (б).

Умовні позначки: 1 – сверд. 20-14 – рудоносне тіло.

У тектонічній будові масиву Гуляйпільське родовище присвячене однойменній складці, витягнутій у напрямку ПнЗ 310-315°, осьова площина залягає практично вертикально. Крила складки падають назустріч один одному під кутами 68-87°. Розмір довгої осі складки 9,5 км., короткої 2,2 - 2,8 км (рис. 2.4, 2.5).



Рис. 2.5. Результат винесення контурів покладу в натуру (фрагмент космознімку) з деталізацією проектних кар'єрів Західного та Східного.

Проектні кар'єри Західний та Східний, розташовані с Пн на Пд (за простяганням рудного покладу) (см. рис. 2.5). Західний поклад в порівнянні зі Східним покладом характеризується більш великою потужністю та концентрує більше запасів (більш 1 млрд. т.). Саме тому, Західний контур планується розробляти в першу чергу. Але, в сучасні часи можлива розробка покладів одним кар'єром.

Згідно з вищезначеними геологічними даними можна сформувати вихідні параметри Гуляйпільського родовища для оцінки екологічної збалансованості території майбутнього видобутку корисних копалин (табл.2.1).

Таблиця 2.1 Вихідні параметри (Гуляйпільське родовище)

Параметри	Одиниці
Площа родовища	936 га
Протяжність пласта	17 км
Глибина оцінки запасів	600 м
Середня потужність розкриву	120 м
Коефіцієнт розкриву	1,1 м ³ /м ³
Прогнозна глибина кар'єру	600 м

2.1.2. Гідрогеологічна система як ключовий екологічний фактор

Що стосується гідрогеологічних умов Гуляйпільського родовища ЗК, воно розташовано на Пвн-З окраїні Консько-Ялинського малого артезіанського басейну, що знаходиться в межах гідрогеологічної області тріщинних вод Українського кристалічного масиву. В межах родовища встановлено 7 водоносних горизонтів. Основними горизонтами, які обводняють родовище і охоплюють територію в радіусі 8-10 км навколо родовища є: безнапірний полтавсько-харківський водоносний горизонт та напірні водоносні горизонти кори вивітрювання та кристалічних порід докембрію.

Встановлено наявність 7 водоносних горизонтів [52, 53].

1. Четвертинний водовмісні породи еолове-делювіальні суглинки та піщано-глинисті відклади. Потужність горизонту від 5 до 11 м, має вільну поверхню. Глибина залягання ґрунтових вод від 1.2 до 3.8 м. Багатоводність слабка, дебіт колодязів до 1м³/год.

2. Полтавсько-харківський основний горизонт, який обводнює родовище та залягає єдиним комплексом. Потужність у межах кар'єру 19-49 м (Західний 1) та 2-47 м (Західний 2). Безнапірний. Статичний рівень +89 – +84 м (абс. позначки в межах Західний 1 та 2), в районі робіт +106 – +65 м. Падіння рівнів зі сходу на захід. Горизонт має гідравлічний зв'язок із горизонтами що залягають нижче. Висока водопроникність – від 34 до 249 м²/добу. Питомий дебет свердловин – до 5.13 м³/годину. Коефіцієнт фільтрації 0.8 - 14.8 м/добу. Коефіцієнт рівня неперівності 4,4*10⁴ м²/добу.

3. Харківського – обмежене поширення. Потужність 22,4 м. Водовмісні

породи – глинисті, дрібнозернисті піски. Багатоводність слабка. Дебет свердловин $0.04 \text{ м}^3/\text{година}$. Слабо напірний.

4. Бучацький – поширений на невеликих ділянках у межах родовища. Водовмісні породи – піщано-глинисті вуглисті відкладення потужністю 2-3 м. Позначки рівня +81 - +82. Багатоводність слабка.

5. Верхнекрейдовий – суцільне поширення на південь від району робіт. У межах ділянки поширений лише на невеликій площі у північній частині родовища. Приурочений до тонкозернистих пісків. Багатоводність слабка. Напірні води з величиною напору 23 м.

6. Кори вивітрювання має суцільне поширення з величиною напору від 27 до 35 м (напірний). Має гідравлічний зв'язок з нижчим горизонтом тріщинуватої зони порід докембрію та з вище залягаючим полтавсько-харківським горизонтом у місцях його залягання безпосередньо на корі. Багатоводність різна, дебіти свердловин $0,006 - 1,94 \text{ м}^3/\text{добу}$.

7. Вод тріщинних зон кристалічних порід докембрію – Багатоводність залежить від ступеня вивітрілості та тріщинуватості. Поширення по латералі та в розрізі нерівномірне. Найінтенсивніші зони простежуються по глибині від 100 до 200 м. Наступні, менш інтенсивні – 200 – 5300 м. Нижче – тріщинуватість рідкісна, закритого типу. Горизонт напірний (32 – 102 м). Статичні рівні встановлюються на глибинах від 47 до 78 м. К фільтрації варіює від 0,01 до 0,6 м/добу. Може досягати в окремих зонах до 10,8 м/добу.

Загальний водоприплив в кар'єр очікується до $1500 \text{ м}^3/\text{год}$ (складні інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови родовища ЗК, залягання покладу ЗК по нестійким породам потужність яких має 100 м та більше). Все це свідчить про необхідність проведення дренажних робіт.

Основними горизонтами, які обводняють родовище і охоплюють територію в радіусі 8-10 км навколо родовища є: безнапірний полтавсько-харківський водоносний горизонт та напірні водоносні горизонти кори вивітрювання та кристалічних порід докембрію [53].

Враховуючи складні гідрогеологічні та інженерно-геологічні умови

родовища, залягання рудного покладу по розкритим нестійким породам потужністю до 100 та більш метрів, дислокація та водоносність рудного покладу, очікується загальний водоприплив в кар'єр до 1500 м³/год. Існує необхідність проведення подальших дренажних робіт.

Для оцінки екологічної рівноваги екологічної рівноваги гідрогеологічного блоку можна враховувати значення мінералізації, коефіцієнту фільтрації, загального водоприпливу, розміри депресійної лійки та ін.

2.1.3. Поверхневі води та геохімічні особливості

Гідромережа відноситься до басейну р. Дніпро. Остання представлена р. Конка (ліва притока Дніпра) з власною правою притокою у вигляді р. Жеребець і річок Гайчур та Верхня Терса, які є притоками р. Вовча. Безпосередньо в ореолі річні поклади відсутні. Безпосередньо на родовищі ріки немає. Долині рік пологі, шириною 1-2 км та глибиною до 30 м. Русла річок на прилеглих територіях замулені зі збереженням лише плесів та дрібних сезонних водотоків. Схили балок пологі, раніше були зайняті посівами. В паводковий сезон по яр-балочної мережі спостерігається водотік. Останні використовуються для накопичення води для зрошення. На площі родовища розташовані балки: Гончариха, Солона, Ризана, Попова, Шестипол'є, Кучерявська. Схили балок завжди під пашнею, пологі. Район родовища бідний на поверхневі води. Ресурси обмежені.

Хімічний склад поверхневих вод має наступні характеристики: води ставків, що розташовані безпосередньо на полях кар'єрів Західний 1 та 2, й поблизу цих полів мають сухий залишок 5,1 – 9,6 г/дм³, загальну жорсткість 40,4 – 68,2 мг-екв. Р. Гайчур – сухий залишок 3,9 г/дм³ та загальна жорсткість. 29,9 мг-екв. ПВ спінюються, корозійні, з твердим котельним осадом, мають сульфатну і вуглекислу агресивність до бетону. ПВ не придатні для централізованого водопостачання.

У поверхневих водах та ґрунтах є присутність породоутворюючих хімічних сполук та елементів: Fe_{заг.} – 25,29%, Fe_{магн.} – 16,98 %, SiO₂ – 56,48%, Al₂O₃ – 1,43 %, MgO – 2,11 %, P₂O₅ – 0,042 %, SO₃ – 0,052 % та ін.

В магнетиті в якості ізоморфної домішки встановлений германій (вміст від 2,5 до 19,5 г/т в середньому – 10,6 г/т). Концентрат характеризується вмістом Fe

68,8–69,9 %, при виході 21–23 % та вилученні заліза 63,47 %. Використання сухої магнітної сепарації дозволяє виділити до 27 % сухих хвостів, які придатні для використання на щебінь в будівельному виробництві.

При детальній розвідці Західного крила були оцінені скельні розкривні породи в якості сировини для виробництва будівельного щебню та додатково вміст германію. Останній є елементом-супутником та, як правило, поширений у докембрійських залізородних родовищах УЩ.

Зміст германію в рудах Гуляйпільського родовища ЗК варіює від 1,5 до 13 г/т (Західний 16,8 г/т, Західний 2 – 7,8 г/т). В покладах германій розповсюджений рівномірно, пов'язаний з магнетитом до 60% та з нерудними мінералами (кумінтоніт, біотит) – до 40%. Вміст його в магнетиті в середньому 10,6 г/т, в нерудних мінералах 4,62 г/т.

Слід зазначити, що на родовище, у межах кларкових значень виділено геохімічні аномалії: германію, ніобію, міді, золота, срібла, свинцю, лантану, цинку, та інших елементів. Самостійного значення перелічені аномалії не мають.

Особливу увагу було приділено вивченню уранових аномалій. У процесі детальної розвідки виявлено 24 радіоактивні аномалії. Фахівцями був проведений радіометричний аналіз. Радіоактивні аномалії [52] характеризуються невисоким вмістом елемента (від 0,0104 до 0,0002) та низькою інтенсивністю. Однак, за даними графічної та аналітичної інформації присутнє широко розвинене розсіяння хоча аномалії не мають промислового значення.

2.1.4. Просторові екологічні обмеження кар'єру

Розробка кар'єрів — це радикальне втручання в геоекологічну середу, яке створює низку просторових обмежень. Ці обмеження визначаються як законодавством (санітарні норми), так і фізичними процесами, що відбуваються навколо місця видобутку. Саме тому, в проведеному в роботі дослідженні просторові екологічні обмеження стосуються не лише тільки кар'єру, а ще території навколо та оцінки можливості застосування технології змішаного видобутку руди.

Сучасний виклик в рішенні питання видобутку залізистих кварцитів

Гуляйпільського родовища полягає в створенні умов мінімізації впливу на довкілля за рахунок вибору належного способу розробки корисних копалин, використання новітніх технологій для екологізації виробництва і видобування та врахування прикладів розробок родовищ, що використовують більш екологічно чисті технології.

Оцінка масштабів зони порушеного ландшафту та загалом природного геологічного масиву з урахуванням кінцевого контуру кар'єру буде мати значно більші обсяги чим суто рудні тіла, що виявлені при геолого-вишукувальних роботах.

Структура кар'єру зазвичай має ступінчасту форму, верхні шари складаються в основному із розкривної породи, а на нижніх здійснюється видобуток. Загальна схема освоєння покладів у кар'єрах додана на рис.2.6 [40] де:

- шари порожніх порід поділяються на уступи, які знімаються зверху вниз, причому верхні шари випереджають нижні (зона Б на рис.2.6);
- вироблений простір збільшується в міру переміщення робочих уступів (зона А, рис 2.6).



Рис. 2.6. - Схема відкритої розробки корисних копалин

Примітка: H_k - кінцева глибина; α - кут падіння корисної копалини;

$\gamma_{отк}$ - кут укосу неробочого борту кар'єра з боку висячого боку покладу;

γ - те саме з боку лежачого боку покладу корисної копалини.

Саме тому, зона порушеного ландшафту та загалом природного геологічного масиву з урахуванням кінцевого контуру кар'єру буде мати значно більші обсяги. Для простих за формою та крутих за заляганням покладів корисних копалин максимальні параметри кар'єру по поверхні визначають таким чином:

а) довжина кар'єру по поверхні (за простяганням покладу) розраховується за формулою (1):

$$L_d = L_{dn} + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma_{отк} \quad (2.1)$$

де L_{dn} - довжина покладу корисної копалини, м.

б) ширина кар'єру по поверхні (у хрест простягання покладу) розраховується за формулою (2):

$$Ш_n = Ш_d + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma_{сep}^{(1)} \quad (2.2)$$

де $Ш_n$ - ширина дна кар'єру, м;

$$Ш_d = 20-30 \text{ м};$$

$\operatorname{ctg} \gamma_{сep}^{(1)}$ - середній кут укосу неробочих бортів кар'єру, град;

$$\operatorname{ctg} \gamma_{сep}^{(1)} = \frac{\gamma_{сep} + \gamma}{2}$$

Кути укосів неробочих бортів кар'єру для крутих покладів корисної копалини визначають з табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Кути укосів неробочих бортів кар'єру

Породи	Коефіцієнт міцності порід, f	Кут укосу неробочого борту (градуси) за глибини кар'єру, м				
		≤90	≤180	≤240	≤300	>300
Найвищою мірою міцні та дуже міцні	15-20	60-68	57-65	53-60	48-54	43-49
Міцні та доволі міцні	8-14	50-60	48-57	45-53	42-48	37-43
Середньої міцності	3-7	45-50	41-48	39-45	36-43	32-37
М'які та доволі м'які	1-2	30-43	28-41	26-39	26-36	-
М'які та землісті	0,6-0,8	21-30	20-28	-	-	-

Встановлено, що при кінцевій глибині кар'єру 600 м, наведені вище аналітичні розрахунки довжини та ширини кар'єру по поверхні дозволяють оцінити масштаби просторового порушення території у плані. розміри поверхневого контуру збільшуються на 1287 м за простяганням та на 1400 м у хрест простягання покладу порівняно з геологічно оконтуреними рудними тілами. З іншого боку, за думкою вітчизняних фахівців [3] технологія розробки корисних копалин залежить від глибини залягання останніх, тобто, розробку корисних копалин відкритим способом застосовують у разі залягання їх на порівняно невеликій глибині, що не перевищує, як правило, 300 - 400 м (хоча нині існують кар'єри, глибина яких перевищує 500 м). Підземний (шахтний) спосіб розроблення застосовують у разі великих глибин залягання родовищ (понад 500 м). Комбінований спосіб розроблення родовищ залізних руд застосовують для розроблення потужних крутопадаючих рудних тіл. Це дуже важливо тому, що в роботі як раз і вирішується питання доцільної технології розробки дослідженого родовища.

Однак двовимірна геометрична оцінка не відображає реальної просторової структури гірничого об'єкта, морфології уступів, об'ємів розкриву та зон впливу на гідрогеологічне середовище.

У зв'язку з цим наступним етапом дослідження є перехід до тривимірного (3D) моделювання кар'єру, з врахуванням: середніх кутів укосу неробочих бортів, параметрів уступів, розширення контуру по поверхні [39].

Перехід до тривимірного моделювання є методично обґрунтованим, оскільки: просторові екологічні обмеження мають об'ємний характер; гідрогеологічні та тектонічні чинники не можуть бути коректно враховані у площинній моделі; порівняння альтернативних систем розробки потребує оцінки не лише площі, а й об'єму порушення а екологічна оцінка рівноваги безпосередньо залежить від просторових параметрів.

2.1.5. 3D моделювання та визначення умов мінімізації впливу розробки залізистих кварцитів з точки зору збереження довкілля та ресурсів підземних вод.

Комплексна оцінка екологічного фактору при розробці родовищ залізистих

кварцитів в дослідженні передбачає аналіз результатів 3D моделювання майбутнього кар'єру та прилеглих територій за змінами у часі та у просторі під час етапів виробничих робіт з метою оцінки впливу видобутку корисних копалин на НС та створення оцінки формування еколого-збалансованої території під час проведення гірничих робіт.

Комплексне оцінювання впливу кар'єрної розробки на НС в даному дослідженні ґрунтується на результатах 3D моделювання. Тоді, перед тим, як визначатися з методичними засобами створення моделі та оцінки отриманих результатів, треба визначитися: який вплив на НС або територію буде оцінюватися в рамках моделювання. Виходячи з того, що в дослідженнях в основу 3D моделювання закладені елементи колекції базових даних (площа території впливу, площа рудного покладу, потужність осадових відкладів, потужність ЗК, глибина кар'єру min/max, санітарно-захисна зона, рівень ґрунтових вод і ін.), тоді, в якості результату будуть показники саме оцінки фундаментальних складових ризику: «тип діяльності/сектор» та «обсяг/розмір».

1) Вплив на територію завжди оцінюється розміром площі, що залучена для розміщення об'єкта, утворенням нових форм рельєфу (наприклад, кар'єра та відвалів), зміною стану порушеного ґрунтового покриву, категорією порушених земель.

2) Вплив на геологічне середовище в тривимірній моделі визначається глибиною розробки та можливими ускладненнями. Останні можуть бути зв'язані з затопленням підземними водами, або розвитком екзогенних процесів. При цьому, механізм негативного впливу кар'єрів на навколишнє середовище відповідає впливу розкривних робіт ГРК.

3) Вплив на гідрогеологічне середовище в тривимірній моделі визначається змінами напрямів підземного та поверхневого стоку, підвищенням рівня ПВ (або формуванням депресійних лійок).

4) Вплив на біологічне середовище в тривимірній моделі визначається: збільшенням (або навпаки) флори та фауни за умови змін техногенного навантаження або змінами площ заповідного фонду.

Перший етап. Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) як «форма подання вихідних даних та спосіб їх структурного опису, що дозволяє відновлювати об'єкт шляхом інтерполяції, апроксимації чи екстраполяції» [53] є основою для вирішення поставлених завдань моделювання. В якості джерела даних до створення цифрової моделі використано фрагмент топографічної карти району досліджень. Особливу увагу слід приділити координатному оцифруванню (координати X , Y , Z) контуру рудного тіла та природних та матеріальних ресурсів (інфраструктурні, водні та лісові), як об'єктів захисту при розробці родовищ КК. Процеси моделювання поверхонь важливі при проектуванні різноманітних планів, при виконанні завдання підрахунку і оптимізації обсягів переміщуваного ґрунту або площі негативного впливу на НС. Шляхом прийомів функції «інтерполяція» отримуємо дані для моделювання у вигляді ізоліній (рис. 2.7).

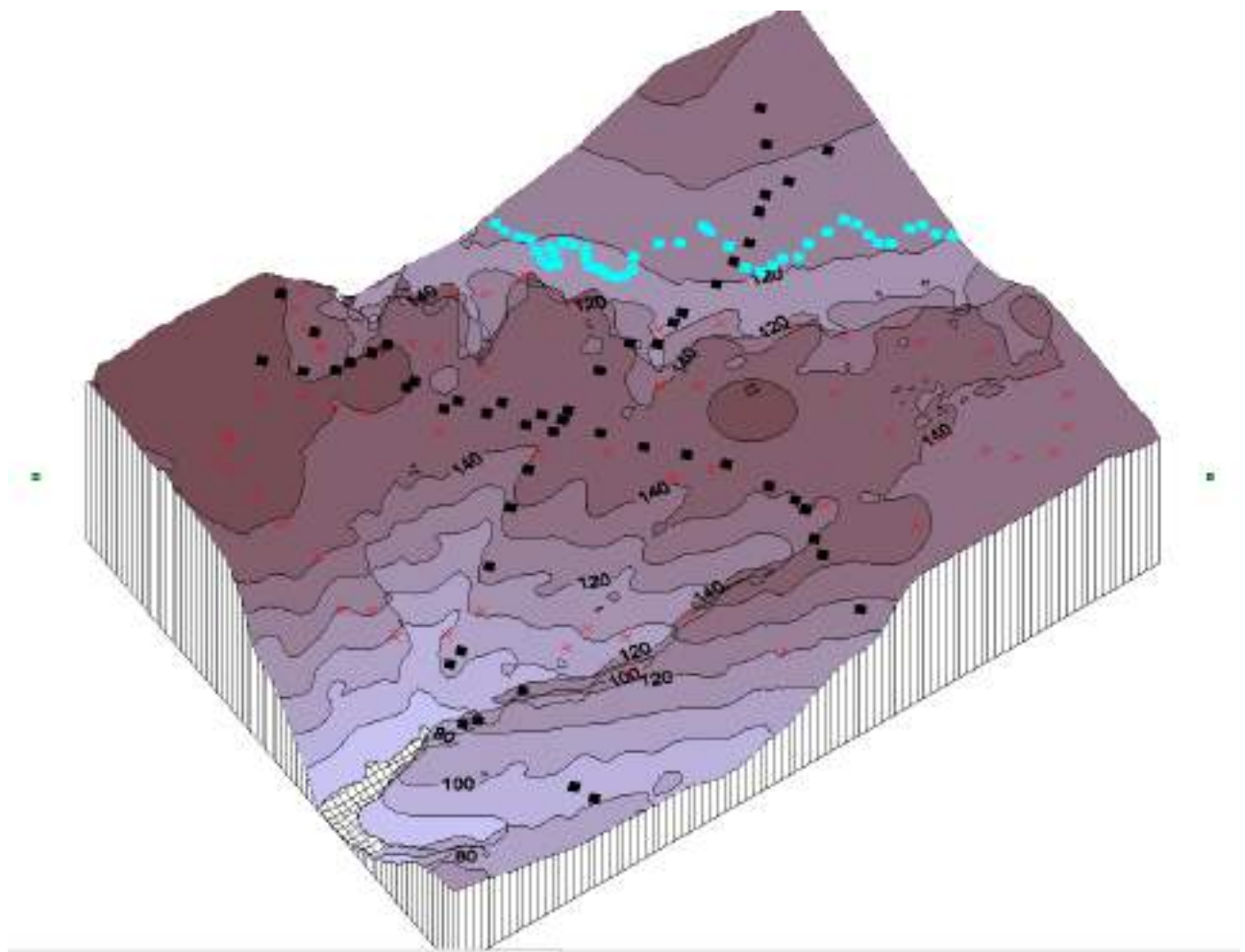


Рис. 2.7. Тривимірна модель рельєфу земної поверхні з визначенням ореолів рудного тіла (червоні хрести) та річок (сині кружки) й доріг (чорні точки), од. виміру, м. [53]

В результаті виймання КК і розкривних порід бокова поверхня кар'єру приймає ступінчасту форму, а в земній корі утворюється виїмка за рахунок якої змінюються усі фактори довкілля. В першу чергу, це елементи мезорельєфу та мікрорельєфу – антропогенна морфологія рельєфу (перетворення долин річок або яр-балкових мереж, водойм, створення гірничо-промислового рельєфу). Саме тому до досліджень треба залучати тривимірні розрізи земної поверхні (рис. 2.8), які дозволяють оцінити можливий вплив експозиції та крутості схилів на формування комплексу екологічних факторів для рослин чи на процеси ґрунтоутворення.

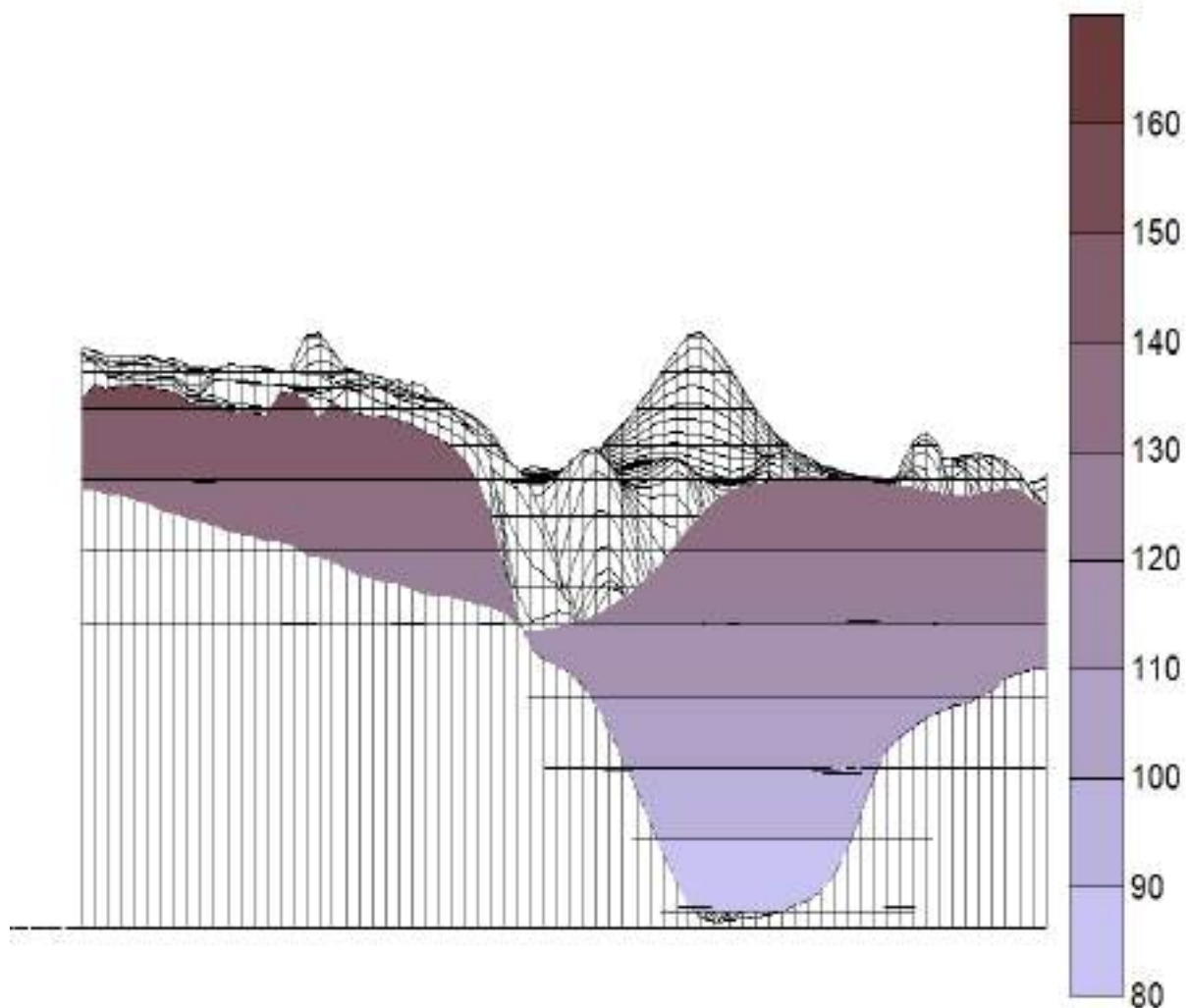


Рис. 2.8. – Приклад тривимірного розрізу земної поверхні (ПдС –ПнЗ напрямом, західний кордон Західного поклада; од. виміру, м) [43]

Тривимірне геометричне уявлення ділянки землі – це відображення існуючої поверхні за допомогою засобів програмного забезпечення. Прогнозна оцінка завдання створення і використання цифрових моделей поверхонь після або на час видобутку КК. Тому в дослідженні [53] створена прогнозна модель Гуляйпільського кар'єру (рис.2.9) в процесі видобутку КК до глибини мінус 600 м (згідно з даними підготовлених та розвіданих запасів), що має два окремих кар'єра (Західний та Східний).

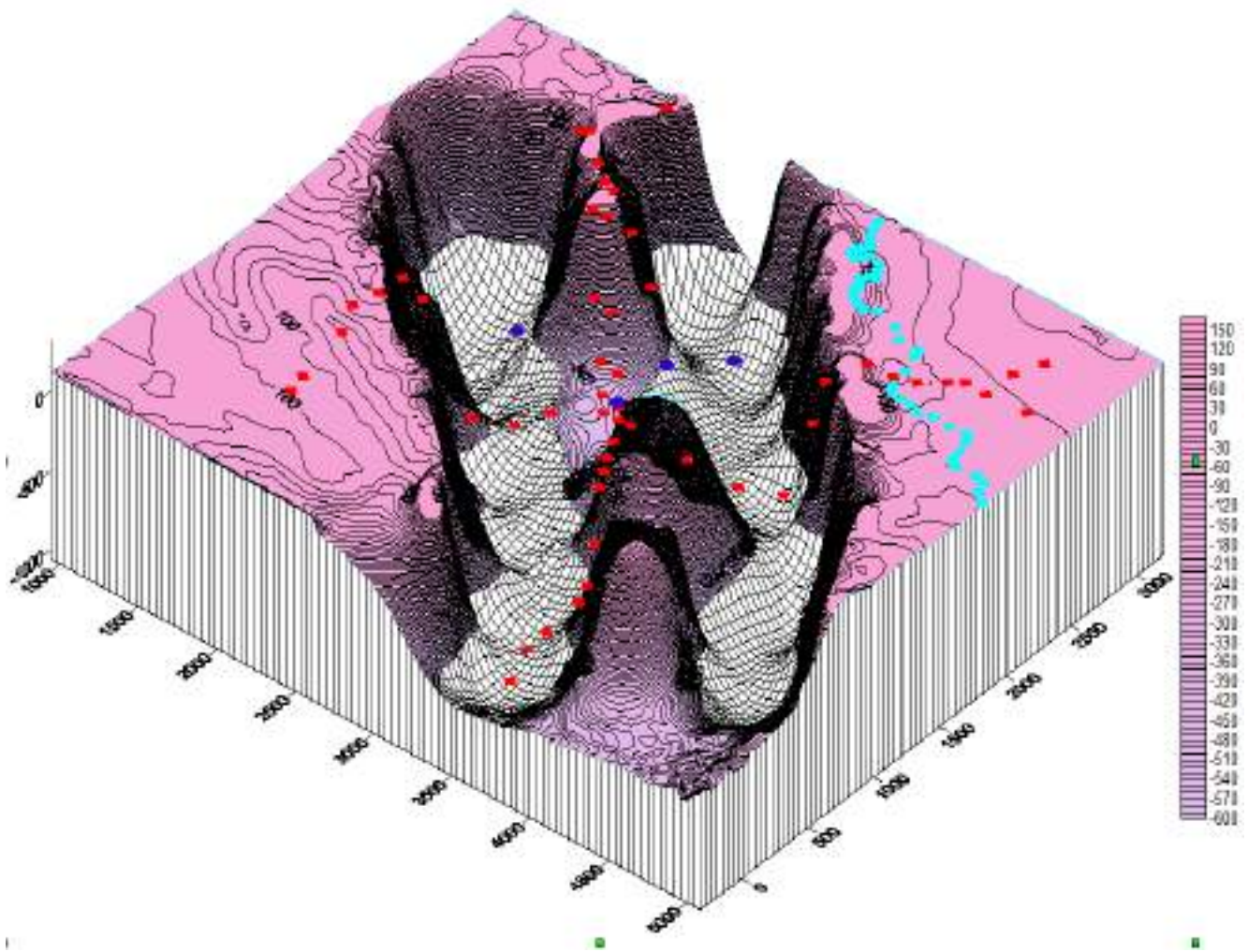


Рис. 2.9. – Тривимірна модель території досліджень під впливом гірничих робіт (кар'єр) з деталізацією річкової мережі (блакитні точки), інфраструктурних об'єктів: дороги, н/п, з/д станція (червоні хрести, сині круги) [53]

Зміни довкілля під техногенним впливом викликають незворотну трансформацію ландшафтних систем, тому врахування отриманих результатів 3D моделі майбутнього кар'єру дозволяє комплексно оцінити ландшафтні зміни та

втрата первинних характеристик довкілля за умови активізації різноманітних гідродинамічних або геоморфологічних процесів під впливом гірничих робіт та видобутку ЗК.

Але представлена в роботі [53] тривимірна модель не враховувала кути укосів неробочих бортів кар'єрів, які розширюють їх площу і периметр впливу на денну поверхню та призведуть до обвалення уступів внутрішньої частини залишеного цілика між двома окремими кар'єрами, що активує схильні неконтрольовані зсувні процеси. Розробка покладів Західний та Східний окремими кар'єрами до глибини 650 м (абсолютна позначка -500 м) згодом створить умови латерального об'єднання цих кар'єрів на окремих ділянках.

Саме тому, в дисертаційному дослідженні розроблена інша технологічна схема видобутку КК, яка відображена у вигляді 3D моделі кар'єру (рис. 2.10), який мінімізує наслідки видобутку кварцитів та має одне «дно», що сприяє зменшенню небезпечних ситуацій, зменшує ризик провалів та зсувів та передбачає використання «змішаної» технології видобування – **«кар'єр + шахта»**.

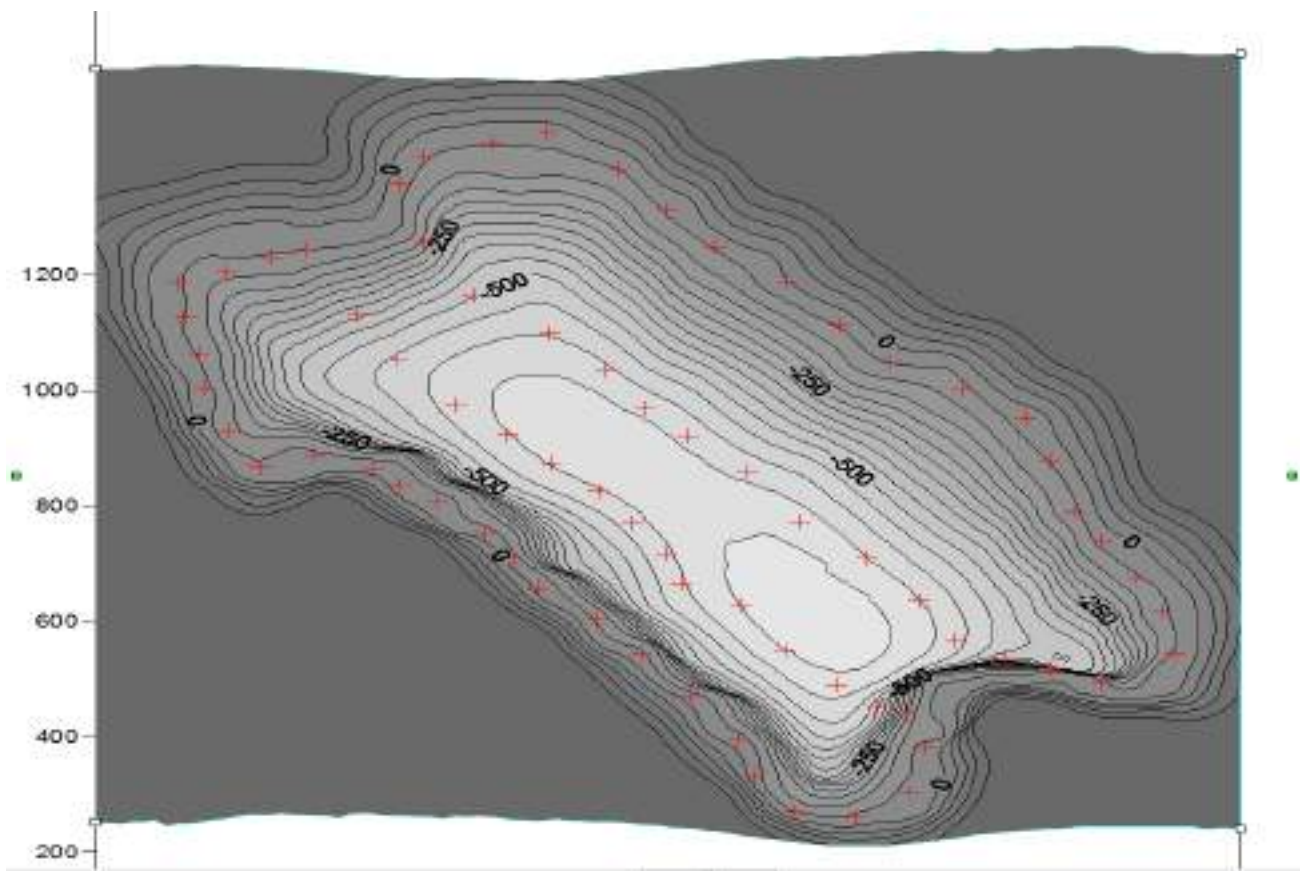


Рис. 2.10 - 3D-модель майбутнього кар'єру Гуляйпільського родовища [54]
Умовні позначки: 1 – контур рудних тіл (червоні хрести)

Отримані результати 3D-моделювання, виявлені в процесі дослідження особливості геолого-тектонічної будови (круте падіння крил синклінальної складки з зануренням на глибини більш ніж 1000 м) та отримані нами розрахунки довжини та ширини майбутнього кар'єру, а також глибокий аналіз застосування способів розкриття родовищ, виконаний, зокрема, з урахуванням роботи [55], дав змогу встановити наступне:

1) Розробка залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища може бути здійснена комбінованим способом, тобто до глибин 400-500 м – відкрита розробка, глибше – підземна.

2) Вертикальні стовбури можуть бути пройдені з глибини 400 - 500 м «дна» кар'єру і використовуватися одночасно для підйому руди, породи, для провітрювання, доставки матеріалів і устаткування, спускання-підйому людей, прокладання трубопроводів і кабельних ліній, що неможливо або неекономічно в разі похилих конвеєрних стовбурів. Як видається, для умов глибокої шахти можна рекомендувати розкриття горизонтів із застосуванням сліпих вертикальних стовбурів.

3) Будівництво горизонту другого ступеня можливе з використанням: однієї точки прикладання робіт - від головного стовбура; двох - від головного стовбура та одного з флангових; трьох точок - від головного стовбура та обох флангових або - від головного стовбура, флангового та тимчасового приштрекового; п'яти точок - від головного стовбура, двох флангових і двох тимчасових приштрекових.

Наступний крок – створення прогностичних 3D моделей, що мають характеризувати зміни стану не тільки окремих елементів екосистеми, але й елементів інфраструктури (природної та інженерної) для розуміння, наприклад гідрогеологічних змін та їх впливу на екологію території навколо родовища.

Відстежити гідрологічні зміни можна за допомогою створення тривимірної моделі сучасного природного стоку підземних або поверхневих вод у зоні родовища та прилеглих територій використовуючи оператор GRID до створеної цифрової моделі рельєфу. В дослідженні застосовані прийоми морфометричного градієнтного аналізу картографічного матеріалу. Результат математичної обробки

- тривимірна модель напрямку природного стоку поверхневих вод (рис. 2.11). Поверхневий стік є однією з характеристик загального водоприпливу у відкриті гірничі виробки.

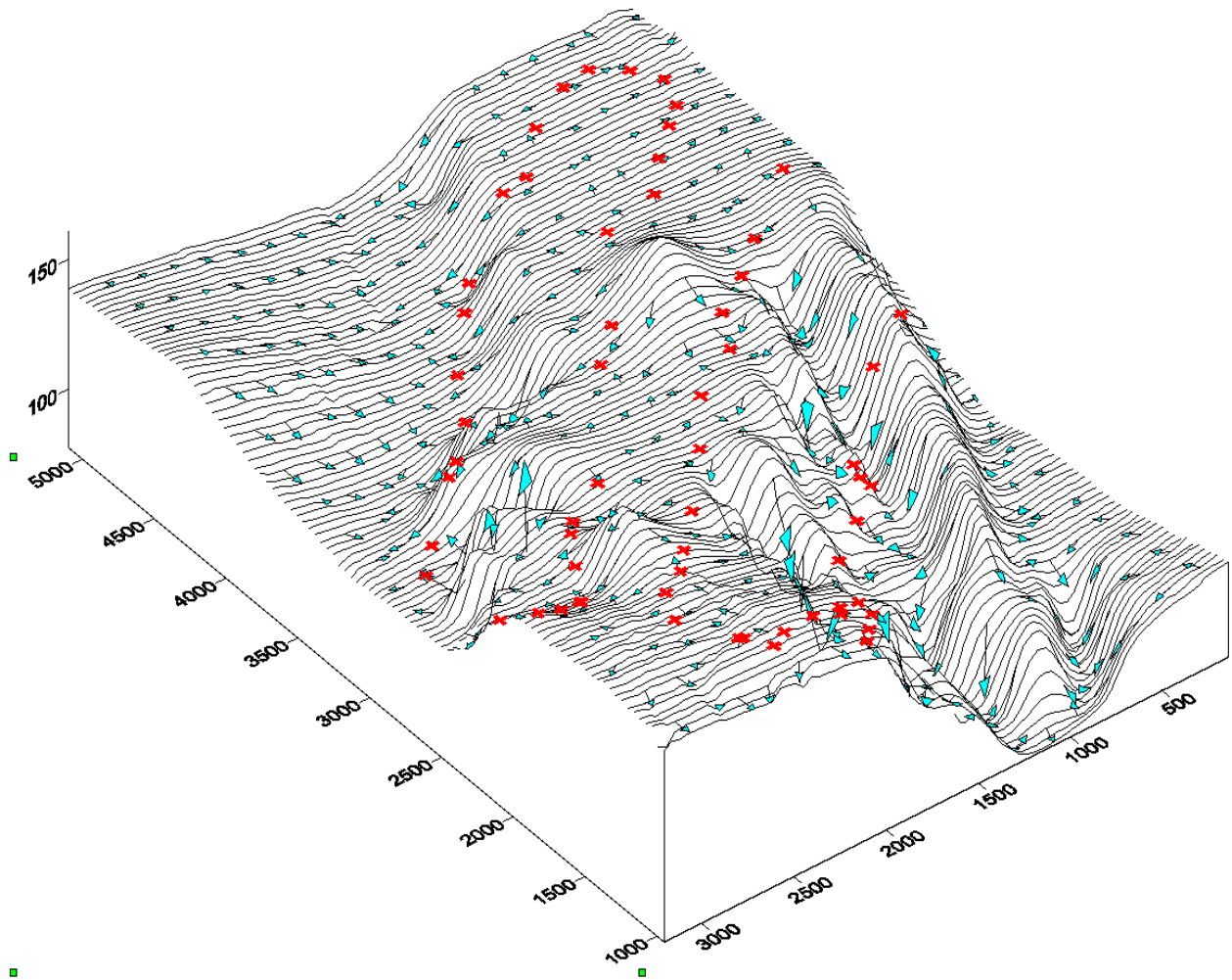


Рис. 2.11 - Результат моделювання напрямку природного стоку поверхневих вод в зоні родовища. Умовні позначки: 1 – ореоли рудного тіла (червоні хрести), 2 – напрямок природного стоку поверхневих вод (зелені стрілки)

Враховуючи результати тривимірного моделювання, напрямок природного стоку початково незмінного рельєфу направлено до яр-балкових мереж – Гончарихи, Різаної, Шестіпол'я, Соленої, Попова та Кучерявої.

Але наявність відкритих гірничих робіт змінює цей напрямок на прямо протилежний. Модельна оцінка прогнозних гідрогеологічних змін була зроблена в роботі [53] за умови відпрацювання КК двома кар'єрами (рис. 2.12).

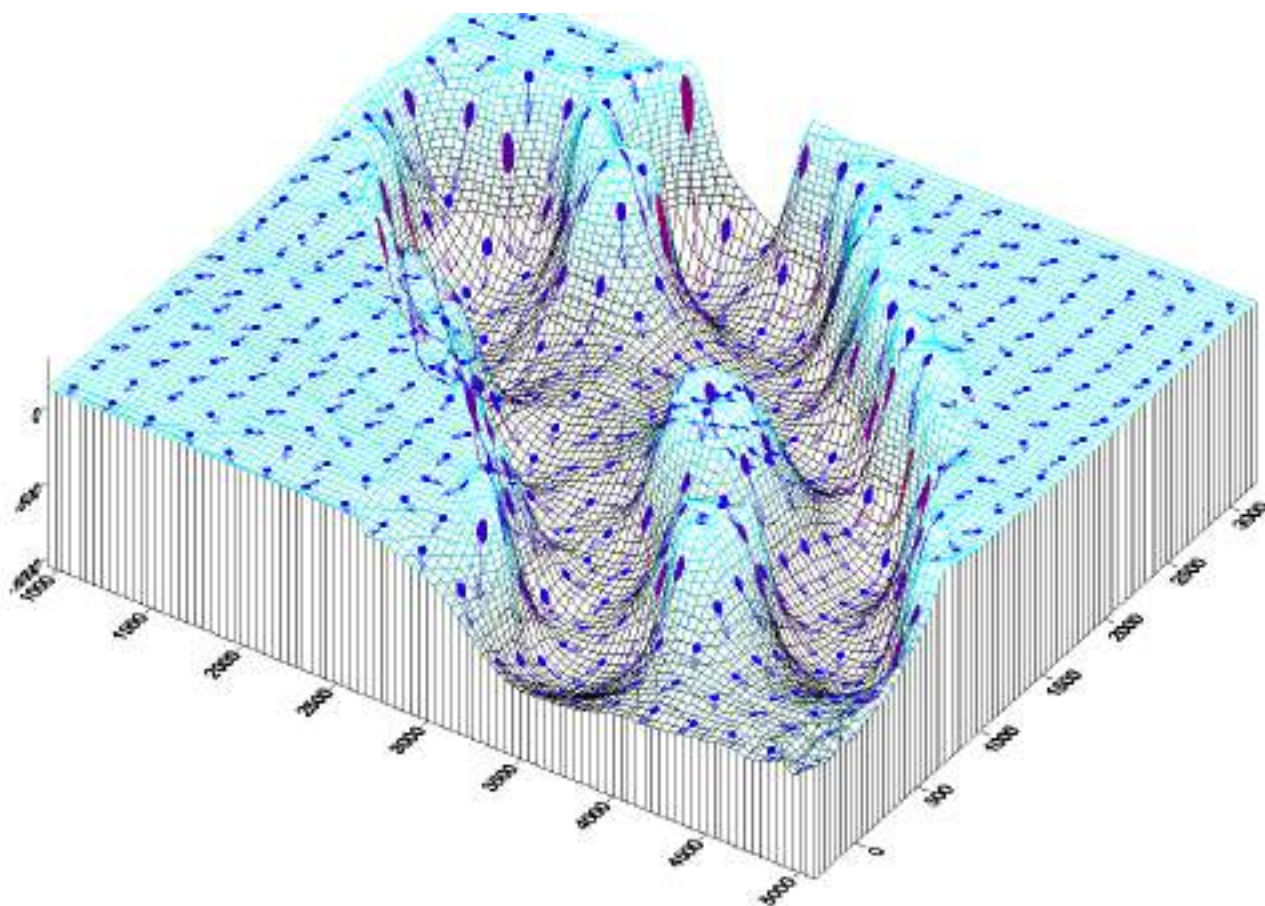


Рис. 2.12 – Результати моделювання напрямку стоку поверхневих вод за умови відпрацювання КК двома кар'єрами (напрямок та довжина блакитної стрілки - кількісні характеристики)

Варіант відпрацювання КК одним кар'єром напрям стоку підземних та поверхневих вод буде аналогічним – весь потік буде направлений в кар'єр.

Найбільша величина водоприпливів буде спостерігатися в період будівництва кар'єра, коли статичні запаси підземних вод становитимуть приблизно 50% від загальної величини. Під час експлуатації кар'єра величина водоприпливів за рахунок підземних вод перебуватиме в межах 700-1200 м³/год, а з урахуванням атмосферних опадів 1100-1500 м³/год. Це значення можна прийняти як максимальне. Водночас під час експлуатації кар'єра, особливо під час проходки в кристалічних породах, необхідно дотримуватися обережності під час розкриття тріщинних зон, за якими під час випробування було отримано коефіцієнт фільтрації 10,87 м/добу. Загалом, кар'єр Західний 1 за величинами водоприпливів може бути аналогічним кар'єру Полтавського ГЗК.

Річки Гайчур і Конка в літній час пересихають. Ресурси підземних вод району обмежені, що пояснюється малою кількістю опадів, малою потужністю проникних (порово-трищинних) горизонтів і їх слабкою напірністю. Розкриті кар'єром водоносні горизонти відповідно зменшать водність району. Раніше планувалося як джерело додаткового водопостачання гірничого підприємства використовувати воду Каховського водосховища, що не є можливим після його руйнування. У зв'язку з цим, видається можливим, використати схему самопливного колектору до збудованого водозбірника, коли дренажні води до виходів бортів кар'єра на проектне положення колектором надходять до водозбірника, звідки перекачуються до хвостосховища, де разом із кар'єрними водами можуть бути використані для виробничого оборотного водопостачання, у т.ч. збагачувальної фабрики. Загальна кількість госппобутових стоків за розрахунками становить 29 тис. м³/добу, з яких від промислових об'єктів 3,5 тис. м³/добу, від жилпоселення 20 тис. м³/добу, необліковані - 5,5 тис. м³/добу. Ці стоки системою самопливних колекторів, насосних станцій і напірних трубопроводів повинні бути відведені на очисні споруди, де пройдуть біологічну очистку. Очищені стоки відводяться в ставок-накопичувач і насосною станцією по напірному трубопроводу подаються на поля зрошення сільськогосподарського призначення.

Виходячи з особливостей геолого-тектонічної та гідрогеологічної будови (круте падіння крил синклінальної складки з зануренням на глибини більш ніж 1000 м) району досліджень та отриманих нами розрахунків довжини та ширини майбутнього кар'єру, та результатів створених 3D-моделей, розробка залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища може бути здійснена комбінованим способом, тобто до глибин 400 - 500 м – відкрита розробка, глибше – підземна.

2.1.6. Підсумок досліджень та концептуальні засади формування інтегрального критерію екологічної збалансованості Гуляйпільського родовища

Екологічна збалансованість території гірничодобувного підприємства повинна розглядатися як інтегральна властивість геосистеми, що відображає узгодженість між: рівнем техногенного навантаження; стійкістю природних компонентів; здатністю до самовідновлення та ефективністю рекультиваційних

заходів.

У межах дослідження пропонується трактувати територію підприємства як просторово-часову геоінформаційну систему, де кожен компонент (рельєф, ґрунти, води, тектоніка, геохімія, рослинність) має кількісні параметри змін під впливом технології розробки КК.

Показники можливого (прогнозного) впливу гірничодобувного комплексу Гуляйпільського кар'єру на окремі складові довкілля, полягають у наступному:

а) Вплив гірничодобувного комплексу на земну поверхню, ландшафт і ґрунти є реалізація проєкту розробки родовища, що передбачає вилучення із сільськогосподарського використання 2773 га земель. Формування гірничодобувного комплексу матиме довготривалий характер впливу та супроводжуватиметься безповоротною втратою земельного фонду, відведеного під кар'єри або кар'єр, промислові майданчики, відвали, хвостосховища та транспортну інфраструктуру.

Унаслідок масштабних розкривних робіт відбудеться суттєва трансформація природного рельєфу з формуванням кар'єрно-відвального та дорожньо-комунікаційного типів техногенного ландшафту. Найбільшого антропогенного навантаження зазнають території, прилеглі до залізничних шляхів, населених пунктів Петрівка, Староукраїнка, Залізничне, а також схили балки Різана, де розташований ландшафтний заказник «Балка Різана», що належить до земель з обмеженим режимом використання.

Порушення ґрунтового покриву прогнозується як у межах родовища, так і за його межами — в радіусі 500 м навколо об'єктів гірничодобувної діяльності (кар'єри, відвали, збагачувальні пункти, об'єкти огрудкування). У межах санітарно-захисної зони передбачається обмеження житлового будівництва, ведення сільськогосподарської діяльності та водозабору. Порушені ґрунти втратять придатність для господарського використання.

Найбільш уразливими до ерозійних і денудаційних процесів є ділянки на схилах ярково-балкової системи балки Різана (Західний поклад) та тераси річки Гайчур (Східний поклад). У разі додаткового техногенного навантаження можливе

активізування зсувних процесів.

Розробка Західного та Східного покладів окремими кар'єрами до глибини 650 м (абсолютна відмітка 500 м) потенційно може призвести до їх часткового латерального злиття в межах окремих ділянок.

Тому найбільш прийнятний спосіб розробки «змішана технологія видобування» - кар'єр до 400-500 м, глибше шахтна розробка.

б) Вплив на водні ресурси. Інтенсивне водовідливання з кар'єрів і дренажних систем, включаючи відкачування мінералізованих вод, може спричинити засолення поверхневих і підземних вод та істотну зміну гідрогеологічних умов регіону. Очікується зниження рівнів підземних вод із формуванням депресійної лійки.

За наявності гідравлічного зв'язку з глибшими водоносними горизонтами можливе їх часткове drenування. Значні обсяги розкривних порід (понад 652 млн м³ для двох кар'єрів), що формуватимуть відвали, можуть створити умови для формування техногенного водоносного горизонту, особливо поблизу хвостосховищ.

Порушення природного гідродинамічного режиму проявлятиметься у зміні напрямків руху підземних вод — від природних зон розвантаження до кар'єрних порожнин. У перспективі депресійна лійка може досягти р. Гайчур і сформувати нові гідродинамічні умови, зокрема режим підпертої фільтрації. Це створить ризики погіршення умов водопостачання населених пунктів у радіусі 7–15 км.

Додатковий вплив пов'язаний із будівництвом гідротехнічних споруд і водогосподарської інфраструктури (водогонів, насосних станцій, хвостосховищ, ставків-накопичувачів, очисних споруд).

в) Вплив відходів гірничодобувного виробництва. Екологічну небезпеку становлять не лише відвали розкривних і корінних порід, а й супутні мінерали, зокрема можливі уранові аномалії. Кварцитові жили родовища можуть містити рідкісні та радіоактивні елементи.

Міграція хімічних компонентів з відвалів у вертикальному та латеральному напрямках здатна формувати геохімічні та радіоактивні аномалії в підземних водах. Речовини можуть надходити до атмосфери, акумулюватися в ґрунтах і водному

середовищі. Поширення забруднювальних компонентів відбуватиметься як атмогенним, так і гідрогенним шляхами.

Тому перехід до шахтного видобування вплине на зменшення відходів гірничодобувного виробництва

г) Вплив на атмосферне повітря. Основними джерелами впливу на повітряний басейн будуть викиди збагачувальної та огрудкувальної фабрик, вихлопні гази кар'єрної техніки, пилогазові викиди від вибухових робіт, а також пил сухих хвостів із хвостосховищ.

Особливу небезпеку становить пил кварцитових порід із високим вмістом вільного кремнезему, який є силікозонебезпечним. Значну екологічну загрозу становить діоксид сірки, що в атмосфері може утворювати сірчану кислоту та спричиняти кислотні опади. Площа поширення забруднення може перевищувати гранично допустимі концентрації.

д) Вплив на рослинний і тваринний світ. Осушення територій, запилення та інші чинники техногенного навантаження здатні порушити екологічну рівновагу регіону. У межах зони впливу розташовані території природоохоронного фонду — ландшафтний заказник «Балка Різана», ботанічний заказник «Цілинні пришляхові смуги» та ділянки Смарагдової мережі. Ризик втрати або деградації місць зростання видів рослин, занесених до Червоної книги України, а також зміни ареалів проживання або зменшення чисельності рідкісних видів тварин вже існує, бо на досліджуваній території ведуться боеві дії.

Вищезначені показники прогнозного впливу гірничодобувного комплексу Гуляйпільського кар'єру на окремі складові докільля потребують окремої комплексної оцінки екологічного стану території родовища методом інтегральної оцінки екологічної збалансованості (зваженої функції нормалізованих показників). До формування системи показників пропонується включити отримані в результаті дослідження данні базового стану умов території досліджень та прогнозні модельні результати.

Провести обґрунтування екологічної доцільності комбінованого способу розробки Гуляйпільського родовища за двома сценаріями технології розробки:

Сценарій 1 – кар’єр до глибини 600 м; Сценарій 2 – комбінований варіант: до 400 м – кар’єр, 400+ м – підземна розробка. Провести обґрунтування екологічної доцільності глибини кар’єру в Сценарії 2.

2.2. Природно-геологічні та геоекологічні передумови формування еколого-збалансованої території (на прикладі Полохівського родовища літію)

2.2.1. Геолого-структурна основа як базис екологічної рівноваги території

Полохівське родовище розташоване у східній частині Шполянсько-Ташлицького рідкіснометалевого району Інгульського мегаблоку Українського щита та приурочене до петаліт-сподуменових пегматитів, пов’язаних із внутрішньокоровими гранітоїдами. На відміну від Гуляйпільського родовища залізних руд, формування Полохівського родовища пов’язане з ендегенними процесами рудогенезу. Геолого-промисловий тип родовища літію приурочений до кислих порід (внутрішньокорові граніти), при цьому зосередження запасів має місце в рідкометалевих пегматитах [56].

Родовище складається з мікроклін-альбіт-петалітових пегматоїдних гранітів. Літійвмісні заміщені пегматити залягають у дислокованих метаморфічних породах. Основну практичну значущість мають руди із вторинною накладеною мінералізацією, представленою петалітом. Склад: петаліт (80-90%), сподумен і трифілін (разом 10-15%). Пегматити Полохівського родовища містять також ніобій, тантал і цезій.

Запаси становили за категорією C_1-C_2 – 27 774 тис. тонн, за категорією P_1 – 4746 тис. тонн. Полохівський масив витягнутий у північно-західному напрямку на 1600 м. Його потужність у центральній частині сягає 400 м [57].

За даними (Калашник А.А., 2015) формування промислових рудних тіл Полохівського родовища пов’язане із зонами проникних транслітосферних глибинних розломів субмеридионального та діагонального простягання Звенигородсько-Аннівської розломної зони у вузлах їхнього перетину з диз’юнктивами широтного Суботсько-Західницько-Мошоринського розлому в літосферному сегменті Інгульського мегаблоку та Мошоринського розлому в

літосферному сегменті Інгульського мегаблоку високого ступеня зрілості й пов'язане з надходженням металогенічно спеціалізованих мантийних флюїдів із роз'єднаних локальних астеносферних пасток первинного концентрування окремих груп елементів, зумовлених неоднорідностями підосви літосфери та варіаціями РТ-умов у їхніх межах.

Міграція транслітосферними розломами зумовила рудоконцентрацію на геохімічних бар'єрах та у структурно-літологічних пастках. Результати дослідження Полохівського масиву [58] методом радіо-тепловізорної технології (РТТ) та прийомів спектрального аналізу дозволили авторам: оконтурити рудне тіло (рис. 2.13, а), виявити площу розташування рудного покладу на площі, яка не співпала з раніше розвіданою (рис. 2.13, а).

Автори прийшли до висновку, що лінії меж ліцензійної ділянки «Укрлітвидобування» та геолого-прогнозних меж «Київгеологія» не збігаються і, згідно з проведеними роботами, основний поклад літію приурочений до вертикального геотермічного розрізу (рис. 2.13, а, с), що в плані значно південніше, ніж визначалося раніше. Фрагмент геологічної мапи та розрізу, який використовували автори, був створений іншими дослідниками [59] у 2005 р.

В 2011 р. наказом ДКЗ України з кадастру корисних копалин проведено уточнену геолого-економічну оцінку родовища на основі переосмислення наявних геологічних даних. Тому, геологічна модель і пов'язана з нею площа корисної копалини була переглянута та класифікована за рівнями геонаукової надійності (рис. 2.13, с, d) [60].

Саме тому, в пропонованих дослідженнях геоморфологічні дослідження зроблено в контурі ліцензійної площі за даними свердловин, що зазначені в роботі [60] (рис. 2.13, с, е), а планування пунктів відбору проб ґрунтів охоплювало усі зазначені в різні роки площі (рис. 2.13, с).

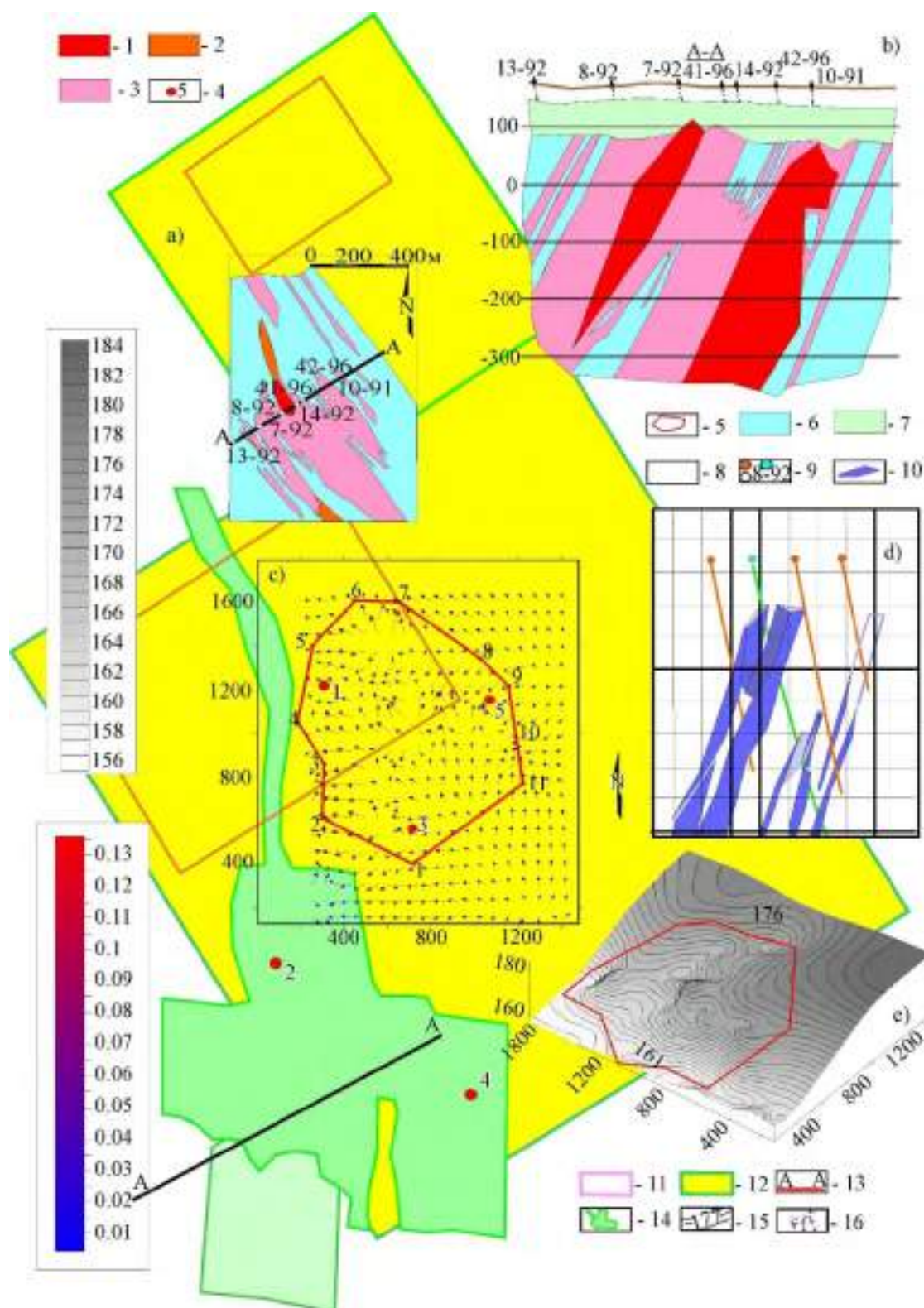


Рис. 2.13. - Результат уточненого розташування ділянки Полохівського родовища по матеріалах попередніх досліджень [58-60] з авторськими дослідженнями геоморфологічних умов Полохівського родовища [61] з деталізацією напрямків стоку поверхневих вод: а – геологічна карта родовища з виносом ліцензійної ділянки за даними «Укрлітійвидобування» та границь геолого-

практичних робіт «Київгеології» [58] з деталізацією геологічного розрізу (b) [59], c - результат за перекартографування регіону [60] доповнений картою точок геолого-геохімічних спостережень з використанням Google Earth, та картограмою напрямків стоку поверхневих вод на ліцензованій площі родовища, d - блочна 3D модель рудних покладів за даними [60], e – результат аналізу геоморфологічних особливостей по даних розвідувальних свердловин.

1- сподумен-петалітові пегматити (рудні зони), 2 - плагіонегматити біолітові, 3 - граніти апліт-пегматоїдні, 4 - точки відбору проб ґрунту, 5 - ліцензійний контур родовища (ГКЗ), 6 - гнейси та кристалічні сланці, 7- кора вивітрювання, 8 - осадові відклади, 9 - геофізичні та розвідувальні свердловини, 10 - контур рудного тіла за даними розвідувальних свердловин, 11 - геолого-прогнозна межа «Київгеологія», 12 - лінії меж ліцензійної ділянки «Укрлітійвидобування», 13 - лінії геофізичного розрізу, 14 - лісосмуга та балка, 15 - ізолінії рельєфу земної поверхні, 16 - вектор руху поверхневих вод.

В дослідженнях [58] також представлені вертикальні геотермічні розрізи (рис. 2.14, а, b), які, за нашою думкою, свідчать про те, що структурний рисунок розривів має належність до «квіткової структури» (рис. 2.14, c) або «зон концентрованих деформацій», які являють собою флюїдодинамічні осередки та характерні для зсувних зон. В цьому сенсі, дуже важливою інформацією є визначення кута падіння центральної осі рудного тіла під кутом 72° - 82° , тобто, практично вертикально.

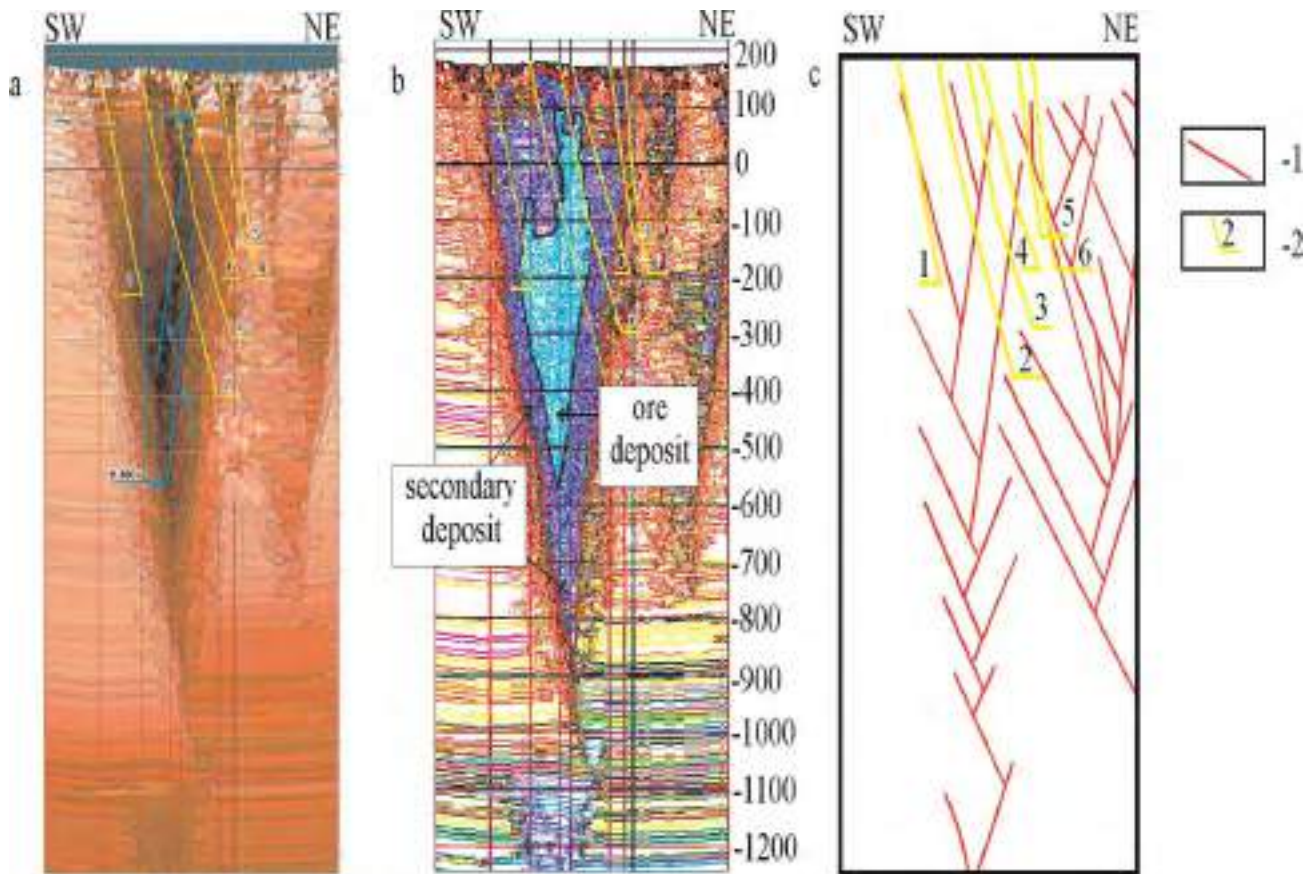


Рис. 2.14 - Вертикальні геотермічні розрізи РТТ Пд-3 - Пн-С (а, б) [62], доповнені авторською інтерпретацією «квіткової структури» (с)
1-тектонічні порушення, 2 - лінія стовбура свердловини

Більш того, за даними [62] під час побудови 3D сейсмологічної моделі Кіровоградського рудного району за даними реєстрації поздовжніх і обмінних хвиль із подальшим розрахунком у вигляді відношення амплітуди обмінної хвилі до амплітуди поздовжньої хвилі (A_{PS}/A_P), під Північноукраїнсько-Кіровоградським гранітоподібним масивом встановлено аномалії A_{PS}/A_P , які простягаються на меншу глибину, мають меншу інтенсивність і розділені майже вертикальними зонами фонових значень цього параметра. Одна з них з'єднує мантійний ров із широкою смугою концентрації забруднень урану, літію та золота на поверхні. Автори підкреслюють що фізична природа вказаної крутопадаючої зони поки що не встановлена. За нашою думкою, це може бути структура, яка сформувалася під час зсувних трансформацій кристалічної основи.

Формування квіткових структур під впливом тектонічних напружень сприяє розвитку морфологічних типів зсувів оперіння і структурних парагенезів осадового

чохла у зоні динамічного впливу зсуву по фундаменту [63] та можуть бути двох типів. У першому типі формується вертикальний розлом із вузькою зоною оперяючих структур Ріделя, які орієнтовані під невеликим кутом нахилу в горизонтальній площині. Другий тип структур складається з поверхонь порушень, які в горизонтальній площині мають нахил 40° щодо осі зсуву. Підтвердження зсувних дислокацій в структурі Інгульського мегаблоку УЩ також обґрунтовано в роботі [64].

З'ясовано, що структурний візерунок центральної частини УЩ, який формувалася в декілька етапів суттєво зсувних трансформацій кристалічної основи, відповідає дислокаційній системі зсуву-ротації, становлення якої відбулося в палеопротерозої. В той же час, дослідження авторів в роботі [65] свідчать про те, що будова та встановлення Інгульського мегаблоку взаємозв'язана з суміжними шовними зонами та перетерпіло більш сьоми деформаційних генерацій в т.ч. надсувної та право- і лівосторонньо-підкидо-зсувної. Незалежно від того, за якого характеру напружень формувалися розломи (стиснення або розтягування), вони проникні для розчинів і флюїдів, оскільки як гірські породи, що їх складають, зазнали ділатансійного розпушення [66].

Тектонічні квіткові структури ("flower structures"), є важливим елементом в геологічних моделях зсуву. Вони мають значний вплив на формування рудних покладів - можуть діяти як структурні бар'єри або контролювати розподіл рудних покладів. В той же час, присутність цих геологічних утворень може впливати на міграційні процеси - створювати тріщини і канали, по яких можуть мігрувати рудні розчини за рахунок підвищення проникливості і здатності до накопичення окремих хімічних елементів в приповерхневих шарах з утворенням гідрогеохімічних ореолів за рахунок обмінних процесів. З цього приводу, на нашу думку, визначення площі родовища доволі довго тривало у часі. Тому, багаточисельні дослідження родовища різних років та з використанням різноманітних методів [59, 60, 67], тільки в останні роки дозволяють впевнено використовувати отриману геологічну інформацію.

Таким чином, генезис родовища зумовлений глибинними

транслітосферними розломами субмеридіонального та діагонального простягання [61], які виконували роль флюїдопровідних каналів для мантийних металогенічно спеціалізованих розчинів. Рудоконцентрація відбувалася у структурно-літологічних пастках та на геохімічних бар'єрах.

Встановлено, що кут падіння рудних тіл – $72-82^\circ$ (практично вертикальний). Рудоконцентрація приурочена до зон концентрованих деформацій («квіткові структури») та має зв'язок із глибинними сейсмічними аномаліями (APS/AP).

Структурна будова яка визначає шляхи міграції флюїдів, зони підвищеної проникності, потенційні канали вертикальної та латеральної міграції елементів та можливі гідрогеохімічні ореоли розсіювання має велике значення для екологічної рівноваги території майбутнього видобування КК.

Можемо з впевненістю констатувати, що досліджена в дисертаційній роботі тектонічна модель родовища є базовим елементом при формуванні блоку структурно-тектонічний вплив та стабільність в оцінці екологічної збалансованості.

2.2.2. Геолого-геохімічна система доексплуатаційного стану як модель природного фону

Згідно з даними координат ліцензованого контуру (ЛК) видобування літію на ділянці Полохівського родовища [60], в дослідженні було зроблено прив'язка точок інвентаризаційних спостережень з використанням Google Earth (рис. 2.13, с) та проведено геоморфологічний аналіз рельєфу земної поверхні в межах ЛК (рис. 2.13, е) з визначенням напрямку стоку поверхневих вод (рис. 2.13, с), які разом з тектонічною структурою впливають на міграцію фонових показників геохімічної спеціалізації.

Слід зазначити, що рідкіснометалеві метасоматити Полохівського родовища представлені екзоконтактовим типом перекристалізованих гнейсів та апоамфіболітовими біотитами. Їхня геохімічна спеціалізація має спрямованість, зумовлену Li, Rb, Cs, P, Be, Sn, Nb [60].

В той же час, дослідження [67] показали, що літієві пегматити мають чітку геохімічну спеціалізацію – крім лужних металів для них характерний підвищений

вміст фосфору, олова, танталу і ніобію. При цьому, рухомі форми хімічних елементів представлені F, Li, Ca, Cu, Ni, Zn. Більш того, рідкометалеві літієві пегматити (рис. 2.13, b), пов'язані з комплексом кристалічної основи та не виходять на денну поверхню. Вони перекриті мезозой-кайнозойськими теригенними відкладами платформного чохла, що залягають на нижньокрейдяній корі вивітрювання. Але, в районі ПР розріз має наступний вигляд: кора вивітрювання – 30 – 75 м; піски – 0 – 10,5 м; суглинки – 15 – 23 м. Загальна потужність покривних покладів коливається в межах 60 – 90 м [59] (рис. 2.13, b).

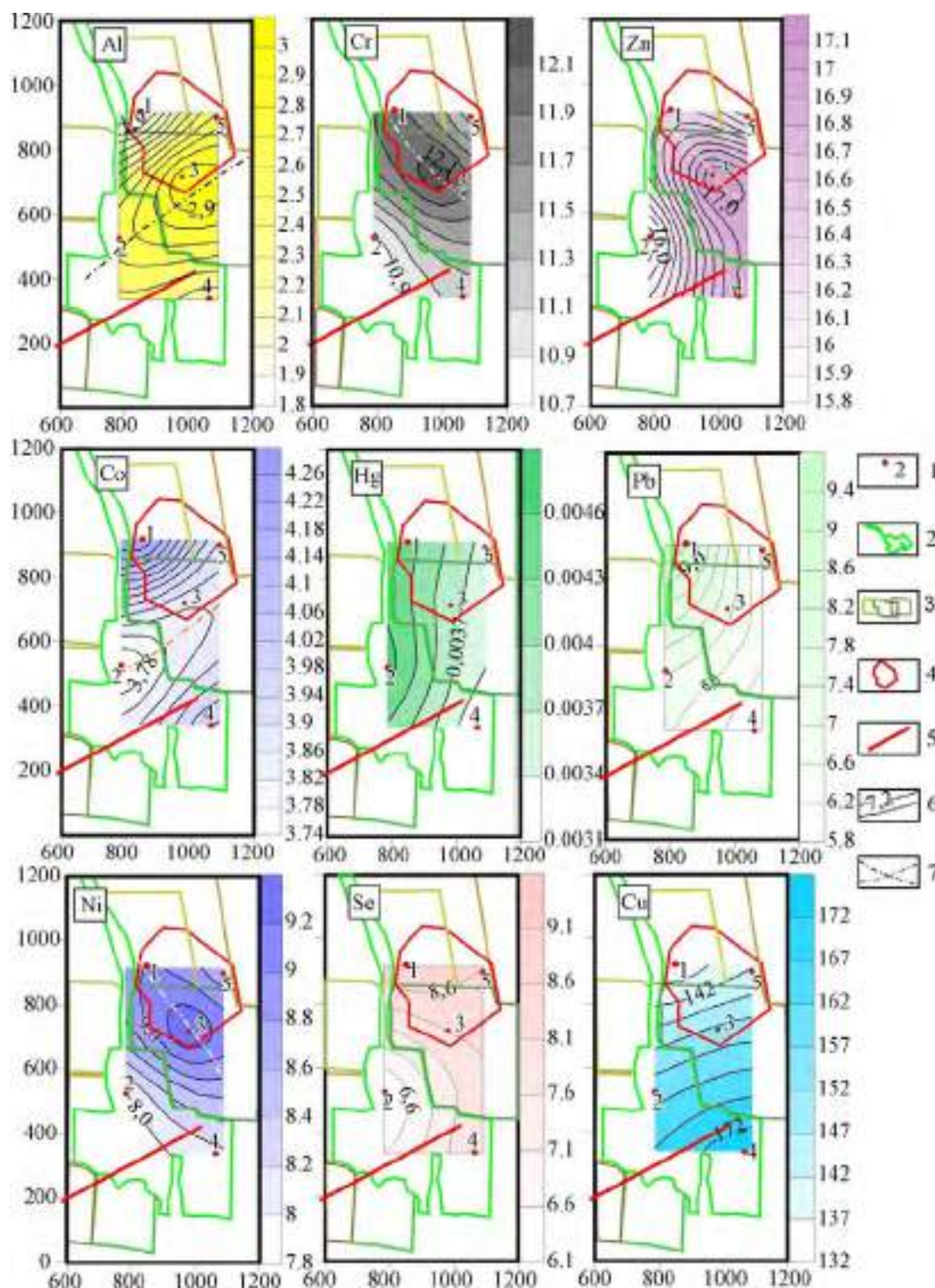


Рис. 2.15 - Візуалізація ореолів розповсюдження рухомих форм металів (Al, Cr, Co, Hg, Ni, Se, Zn, Pb, Cu) у вигляді ізолій в зоні дослідження з прив'язкою до місцевості та визначенням осей геохімічних ореолів.

1 – точки відбору проб, 2 – контур лісосмуги, 3 – контур сільськогосподарських земель, 4 – ліцензійний контур ділянки родовища, 5 – лінія розрізу з матеріалів [58], 6 - ізолії концентрацій ореолів рухомих форм металів, 7 – осі геохімічних ореолів.

З огляду на порівняно невелику потужність теригенних відкладів, що перекривають продуктивний горизонт, а також можливу зміну геохімічної обстановки безпосередньо в приповерхній зоні, нам видалося доцільним відпрацювати методику аналізу геохімічних ореолів розсіювання (здатність до процесів міграції в геологічному середовищі) за рахунок створення 2D моделей ореолів розповсюдження рухомих форм хімічних елементів – Al, Cr, Co, Hg, Ni, Se, Zn, Pb, Cu (рис. 2.15), Al, Cr, Co, Hg, Ni, Se, Zn, Pb, Cu).

При розрахунках використано метод лінійної інтерполяції між точками, та створення кореляційної матриці (табл. 2.3) з подальшим аналізом тісноти кореляційних зв'язків та візуалізації розповсюдження рухомих форм вищевказаних хімічних елементів.

Таблиця 2.3 - Кореляційна матриця рухомих форм хімічних елементів.

	Al	Cr (6.0)	Co (5.0)	Hg	Ni (4.0),	Se	Zn	Pb (32.0)	Cu
Al	1								
Cr (6.0)	-0.06831	1							
Co (5.0)	-0.87975	0.45828	1						
Hg	-0.16959	-0.04548	-0.10056	1					
Ni (4.0)	0.06618	0.95117	0.350289	-0.03972	1				
Se	-0.4527	0.63350	0.802305	-0.43234	0.659296	1			
Zn	0.12434	0.62705	0.236919	-0.66838	0.479683	0.43255	1		
Pb	-0.58112	0.55566	0.570802	0.68696	0.469031	0.26492	-0.12534	1	
Cu	0.33668	-0.47622	-0.46904	-0.4251	-0.62402	-0.55415	0.31807	-0.6699	1

Примітка: Cr (6.0) - Показник (ГДК, мг/кг)

Проби відбиралися з підґрунтових суглинків. Польові роботи з опису ґрунтового розрізу були проведені після значних злив (дощів) у регіоні. У пробах за стандартними методиками визначено рухомі форми хімічних елементів. Під час кореляційного аналізу було отримано такі показники: характерна кореляція (понад - 0.65) для нікель-хром, селен-хром-кобальт-нікель, цинк-хром, свинець-ртуть. Але існує й від'ємна кореляція, яка означає те, що із збільшенням однієї величини друга має тенденцію до зменшення. Це стосується наступних показників: характерна від'ємна кореляція (понад - 0.65) для кобальт-алюміній, цинк-ртуть та мідь-свинець.

У першому наближенні оцінити рівень місцевого геохімічного фону можна з аналізу мап розподілу вмісту елементів. Геохімічні пошуки проведено на досить невеликих площах, та область місцевого геохімічного фону характеризується переважанням відносно низьких, нестійких значень концентрацій елементів, окрім Cr, Co та Ni які перевищують ГДК. Наближено оцінивши величину вмісту кожного елемента на мапах, виділені найбільш контрастні геохімічні «аномалії» за рахунок накладання картограм геохімічних аномалій кожного елемента (комплексних геохімічних аномалій (КГА). Аналіз КГА дав змогу констатувати, що просторово збігаються одна з одною геохімічні аномалії кількох хімічних елементів: Al-Co, Cr-Zn-Ni. Це дає змогу припустити, що комплексні аномалії накладаються на рудопрояви району, тектонічні зони або зони вторинної зміни. В дослідженому випадку, вісь ореолу розповсюдження (ОР). Al та Co має не тільки однаковий напрямок (ПдЗ – ПнС) але співпадає просторово. При цьому, ОР мають різні характеристики за показником контрастності: ореол розподілу Al у зоні осі має максимальні значення та зменшується в напрямку віддалення від осі («позитивний показник контрастності»), а ореол розподілу Co у зоні осі має мінімальні значення та збільшується в напрямку віддалення від осі («негативний показник контрастності»).

Цей взаємозв'язок визначається від'ємною кореляцією зі значенням -0.87975 (табл.2.2). В той же час, осі ореолів розповсюдження Cr-Zn-Ni мають також однаковий напрямок (ПдС – ПнЗ), але протилежній по відношенню до вищезгаданих ореолів, співпадають просторово, виступають у вигляді «позитивних показників контрастності» та мають достатньо високі кореляційні зв'язки: Cr-Zn – 0.62705, Zn-Ni – 0.479683, Cr- Ni – 0.95117 (див. табл. 2.2). Розуміємо, що ореоли можуть мати різне походження. Вони можуть бути пов'язані з походженням родовища (первинні ореоли) або з подальшим руйнуванням під впливом надгенних агентів (вторинні ореоли). Основною особливістю будови первинних геохімічних ореолів є їхня зональність, що виявляється в закономірній зміні в просторі різних їхніх характеристик і параметрів [68].

В дослідженому випадку, осьова зональність проявляється в напрямі руху рудоносних розчинів та в разі крутопадаючих рудоносних зон збігається з вертикальною, що підтверджено в роботі. Залежно від особливостей залягання рудних тіл, поперечна зональність їхніх ореолів може бути симетричною й асиметричною. У нашому випадку має місце симетрична поперечна зональність, яка характеризує ореоли рудних тіл вертикального падіння. При цьому, виявлена поздовжня зональність первинних ореолів, у більшості випадків, належить до симетричних, можливо, відображаючи нахил рудних скупчень у площині рудної зони.

В роботі [67] автори прийшли до висновку, що високий показник кореляції (понад 0.65) характерний для літій-ніобій-фосфор тяжіє до сподуменових метасоматитів; для гранітів – літій-вісмут; для альбітитів – літій-галій-срібло; для пелітизованих порід – літій-мідь-молібден. В нашому випадку показники концентрацій цих елементів не визначалися. Тому, в дослідженні обрано метод оцінки місцевого геохімічного фону залежно від математичного закону, якому підпорядковано розподіл елементів. Виокремлення слабких, геохімічних аномалій вимагає більш точної оцінки місцевого геохімічного фону. В такому разі величина геохімічного фону визначається залежно від математичного закону, якому підпорядковано розподіл елементів у пробах [69]. Найчастіше зустрічається логарифмічно нормальний закон розподілу (ЛНЗР). ЛНЗ геохімічного фону згідно з даними розрахунків по профілю, який було орієнтовано вздовж простягання рудних покладів, за показниками коефіцієнту детермінації (R^2 більш 0.65) характерний для Zn, Ni, Se, Pb та Co (рис. 2.16).

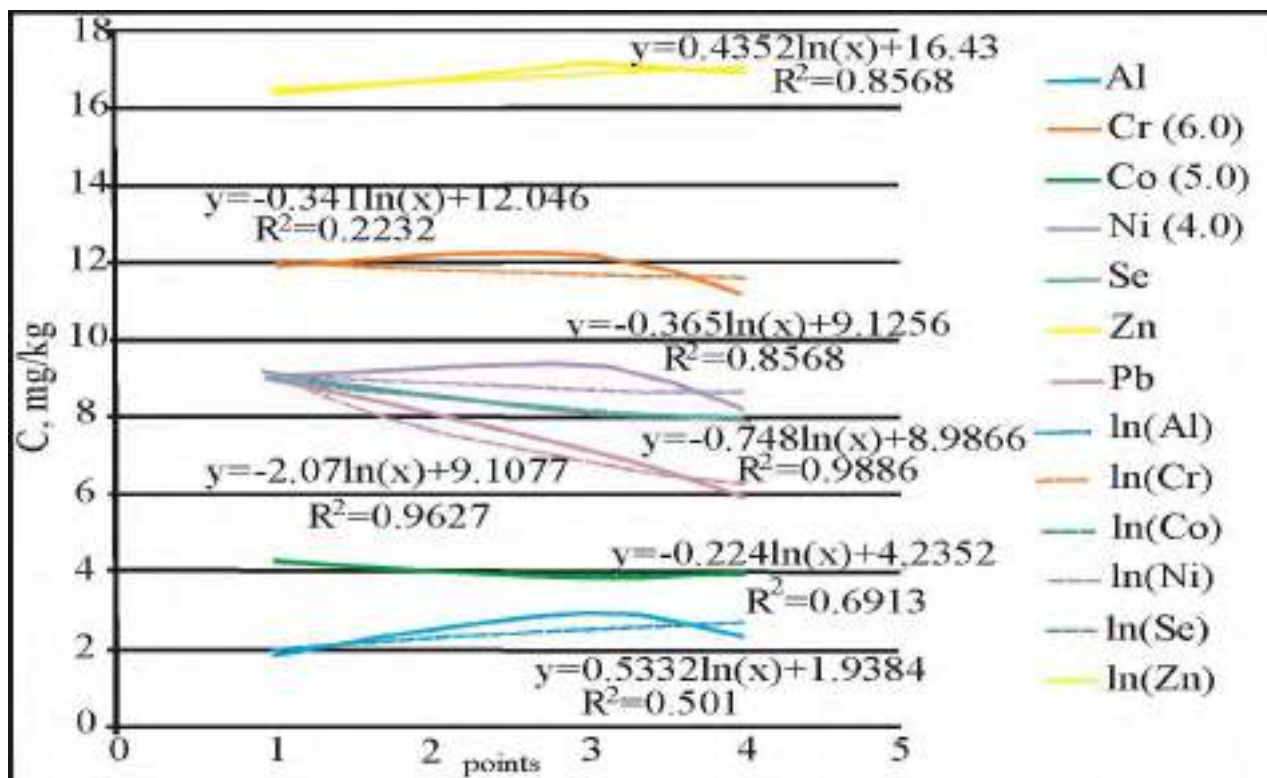


Рис. 2.16 - Визначення математичного закону, якому підпорядковано розподіл концентрації (C) елементів у пробах за допомогою підбору лінії тренду [61].

Необхідно зазначити, що основними типами обставин водної міграції за складом провідних мігрантів є Al та Cu, які показали відсутність підпорядкування логарифмічному закону розподілу. При цьому, максимальні значення концентрації Cu тяжіють до лісосмуги на великій відстані від ЛК. Таку поведінку показує й вміст та розподіл Hg та Pb на картограмах (див. рис. 2.15). Це може свідчити про те, що накопичення відбувається в яружно-балковій мережі, яка притаманна для цієї лісосмуги. Показники концентрацій цих елементів залежать від водної міграції. Валовий фоновий вміст металів може залежати від фізико-хімічних властивостей ґрунту (глина, гумус, тощо), ближнього та дальнього перенесення речовин [70]. Метали зв'язуються з органічними речовинами та мінералами ґрунту, що може призвести до їх накопичення. За результатами дослідження існують три основні метали в забруднених ґрунтах – це свинець, миш'як і кадмій. Миш'як може бути природно збагачений у фосфатах, що використовуються для добрив. Свинець може надходити в ґрунт з етилованого бензину, який використовували в сільському господарстві (наявність полів навколо ЛК). В нашому випадку концентрації

миш'яку і кадмію не визначалися.

Але, наявність сільськогосподарських земель навколо родовища можливо додала свій внесок в показники фонових концентрацій Pb на ділянці досліджень.

Підводячи підсумки, можна констатувати, що до початку промислового освоєння територія характеризується:

1. Перекриттям рудних тіл мезозой-кайнозойськими теригенними відкладами потужністю 60-90 м;
2. Розвитком кори вивітрювання (30-75 м) та відсутністю виходу пегматитів на денну поверхню.

Геохімічна спеціалізація родовища включає: Li, Rb, Cs, Nb, Ta, Sn, P, Be та рухомі форми F, Ca, Cu, Ni, Zn. Встановлені закономірності чітких геохімічних асоціацій Cr–Ni, Se–Co–Ni, Al–Co. Для Zn, Ni, Se, Pb, Co встановлено логнормальний закон розподілу, що дозволяє визначити природний фон як статистично обґрунтований.

2.2.3. Природний геохімічний фон як основа інтегральної оцінки екологічної рівноваги

Полохівське родовище розглядається не лише як об'єкт надрокористування, а як складна геолого-геохімічна система, в якій: тектоніка визначає шляхи міграції, геохімія формує природний фон, гідромережа контролює вторинний перерозподіл, морфологія рельєфу визначає локалізацію ореолів.

Саме ця система природних взаємозв'язків є вихідною моделлю екологічної рівноваги території до початку освоєння і становить наукову основу для побудови інтегрального показника екологічної збалансованості при виборі способу розробки родовища.

Методологічне значення виконаних досліджень, а саме: геоморфологічний аналіз, геохімічне картування, статистичне моделювання, кореляційний аналіз, просторове 2D моделювання ореолів є не лише описовими, а формують базову матрицю природного стану території, без якої неможливо розрахувати відхилення від фону. Без неї неможливо нормувати різноманітні показники (0–1) та визначити вагові коефіцієнти. А головне, неможливо обґрунтувати вибір шахтної системи

розробки як менш порушуючої природну рівновагу.

Визначення місцевого фону є принципово необхідним для розмежування природних і техногенних аномалій та побудови блоку K_{geo} в інтегральному критерії.

Встановлені в дослідженні закономірності впливу тектонічного контролю та первинних ендегенних процесів на геохімічний фон, який формується як результат взаємодії тектонічних та ендегенних процесів і гідрологічного режиму дозволяє зробити інтеграцію природно-геологічних параметрів у систему інтегрального показника екологічної рівноваги.

Отримані результати дозволяють сформувати блок природної складової інтегрального показника, де для Полохівського родовища ключовими будуть:

- коефіцієнт структурної проникності, що визначається густотою розломів, кутом падіння, наявністю квіткових структур, глибинними сейсмічними аномаліями;
- коефіцієнт геохімічної стабільності, який визначається кореляційною структурою, відсутністю хаотичних техногенних аномалій, рівнем контрастності ореолів та логнормальністю розподілу;
- гідрогеохімічний блок, який формується на основі напрямків стоку, товщі перекривних порід та гідродинамічної пов'язаності.

Висновки до розділу 2.

Вперше розроблено природно-геологічну модель екологічної рівноваги території Полохівського родовища, у якій тектонічна будова, геометрія крутопадаючих пегматитових тіл, геохімічна спеціалізація та гідрогеологічні умови розглядаються як єдина просторово взаємопов'язана система.

Вперше обґрунтовано роль глибинних розломів і зон концентрованих деформацій як факторів екологічної проникності середовища, що визначають потенційні канали міграції флюїдів і рухомих форм елементів та впливають на стійкість геоекологічної системи.

Вперше встановлено закономірності просторової організації природних геохімічних ореолів для Li-спеціалізованої пегматитової системи (осьова та

поперечна зональність, орієнтація за напрямками розломів), що дозволило сформувати базову модель доексплуатаційного стану території.

Вперше сформовано кількісну основу визначення місцевого геохімічного фону для родовища літію шляхом статистичного аналізу (логнормальний розподіл, кореляційні асоціації елементів), що забезпечує відокремлення природних аномалій від потенційних техногенних.

Удосконалено методичний підхід до інтеграції геолого-структурних і геохімічних чинників у систему екологічної оцінки території, де природні параметри (тектонічна проникність, фонові геохімічна структура, гідро-геоморфологічні особливості) формують базові коефіцієнти інтегрального показника екологічної збалансованості.

Удосконалено підхід до визначення структурно-тектонічного коефіцієнта стабільності та коефіцієнта геохімічної стійкості як складових інтегрального екологічного критерію, що враховують природні передумови трансформації території при освоєнні надр.

Набуло подальшого розвитку теоретичне положення про необхідність розгляду родовища як динамічної геолого-геохімічної системи, в якій екологічна рівновага визначається взаємодією тектонічного каркасу, літологічної будови, гідрогеологічного режиму та природного геохімічного фону.

Набуло подальшого розвитку концепція врахування природного стану території як базової точки відліку для прогнозування екологічних наслідків вибору способу розробки (шахтного, кар'єрного або комбінованого).

Удосконалено підхід до оцінки просторових екологічних обмежень при розробці крутопадаючих покладів залізистих кварцитів шляхом інтеграції геометричних параметрів кар'єру (глибина, кути укосу, протяжність покладу) з екологічними показниками порушення ландшафту та гідродинамічної рівноваги території.

Вперше для умов Гуляйпільського родовища виконано просторове (3D) моделювання кінцевого контуру кар'єру з урахуванням геолого-тектонічної будови та варіантів відкритої й комбінованої систем розробки, що дозволило кількісно

оцінити масштаб розширення поверхневого контуру відносно геологічно оконтурених рудних тіл.

Обґрунтовано екологічну доцільність переходу від повністю відкритої до комбінованої системи видобутку (відкритий спосіб до 400–500 м із подальшим переходом на підземний), що забезпечує зменшення площі порушених земель, скорочення депресійної лійки та зниження ризиків геомеханічної нестійкості бортів.

Уточнено вплив глибини кар'єру на масштаби просторової трансформації території, доведено, що при глибині 600 м збільшення довжини та ширини кар'єру по поверхні суттєво перевищує розміри оконтурених покладів, що формує непропорційно більший техногенний вплив порівняно з обсягами видобутку.

Розвинено методичний підхід до врахування гідрогеологічного фактору при виборі способу розробки родовища, зокрема через оцінку очікуваного водоприпливу, формування депресійної лійки та зміни напрямків підземного і поверхневого стоку.

Набуло подальшого розвитку положення про необхідність застосування інтегрованого геоекологічного аналізу на стадії проектування гірничих робіт, де 3D-моделювання розглядається як інструмент для подальшого прогнозування просторових екологічних наслідків.

Удосконалено методику оцінювання техногенно трансформованих ландшафтів шляхом поєднання морфометричних, гідрологічних, ґрунтових та біоіндикаторних параметрів у математичних моделях.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИЧНОГО ПІДХОДУ ДО КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТЕРИТОРІЙ РОДОВИЩ

3.1. Обґрунтування системи показників екологічної рівноваги в залежності від технології розробки (на прикладі Гуляйпільського та Полохівського родовищ)

Сучасний виклик у вирішенні питання видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища полягає у формуванні такої технологічної схеми освоєння надр, яка забезпечить мінімізацію трансформації природних геосистем, раціональне використання водних ресурсів та зниження площі техногенного порушення території. Вибір способу розробки (відкритий, підземний або комбінований) безпосередньо визначає масштаби ландшафтних змін, гідрогеологічні наслідки та інтенсивність антропогенного навантаження.

Система показників екологічної рівноваги для Гуляйпільського родовища повинна базуватися на: геометричних параметрах кінцевого контуру кар'єру; балансі підземних вод і коефіцієнті їх повторного використання; обсягах розкриття та техногенного навантаження і можливості поетапного переходу до підземної стадії. Але, обґрунтування екологічної рівноваги території при розробці залізистих кварцитів не може обмежуватися лише геометрією кар'єру та гідрогеологічними параметрами.

Екологічна рівновага гірничопромислової території формується як інтегрований результат взаємодії геометричних параметрів розробки, тектонічної структури масиву та геохімічної активності порід, а врахування цих чинників у виборі технології видобутку забезпечує підвищення інтегрального показника екологічної збалансованості на етапах експлуатації та рекультивації.

Для Полохівського родовища літєвих руд, яке розташоване в межах Інгульського мегаблоку УЩ та структурно пов'язане із зонами транслітосферних розломів та зсувних дислокацій, для якого передбачено виключно підземний (шахтний) спосіб розробки, тектонічна позиція родовища додатково підсилює роль

глибинної флюїдодинаміки.

В цьому випадку зникає поверхневий фактор масштабної деструкції (відсутність кар'єра). Для шахти немає великої депресійної лійки відкритого типу, мінімізується площа прямого контакту рудного тіла з атмосферою, відсутня повна деструкція кори вивітрювання та морфометричні зміни на поверхні втрачають домінуюче значення. Але, посилюється роль глибинної фільтрації, а саме: формується локальна депресійна лійка підземних вод; активуються зміни напружено-деформованого стану розломних каналів; змінюється гідрогеодинамічний режим тріщинних зон. Отже, зростає значущість гідрогеологічного показника, показника геодинамічної активності за рахунок наявності потенційних флюїдних каналів та показника тектонічної проникності. Тобто, система стає структурно-флюїдною, а не морфодинамічною.

Тому, для глибинних літєвих родовищ кристалічного фундаменту інтегральний критерій екологічної збалансованості повинен мати тектонічно-гідрогеохімічну домінанту, що принципово відрізняє їх від кар'єрних залізрудних об'єкт

3.2. Розробка інтегрального критерію екологічної збалансованості території для кар'єрної, шахтної та змішаної систем розробки

Інтегральний критерій — це узагальнений кількісний показник, який об'єднує декілька екологічних параметрів у єдину оцінку стану території. Тобто замість окремих категорій: концентрації забруднювачів, рівня підземних вод, площі деградованих земель, інтенсивності ерозії, втрати біорізноманіття, тектонічно-гідрогеохімічне різноманіття ми формуємо єдиний показник, який показує наскільки територія є екологічно збалансованою або дестабілізованою.

Система розробки родовища (кар'єр, шахта чи змішана схема) має фундаментальний вплив на формування екологічного стану гірничопромислової території. Цей вплив мультикомпонентний та охоплює площу просторового порушення; трансформацію гідрогеологічного режиму; геохімічні зміни середовища; біотичну відновлюваність; динаміку геомеханічної стабільності.

Інтегральний критерій екологічної збалансованості (IES) в нашому випадку повинен охоплювати кожен з цих складових у системі показників і дозволяти робити порівняння технологічних схем у єдиному вимірі. Одразу визначимось, що ми не будемо оцінювати біотичну відновлюваність, бо відсутність моніторингових спостережень за змінами цього показника за рахунок того, що ці родовища ще не розроблялися, не дозволяють нам провести будь-яку оцінку.

Під інтегральною оцінкою в дисертаційних дослідженнях ми розуміємо сумарний поширений індекс, який пов'язує екологічні показники стану довкілля, техногенні параметри виробничої діяльності та технологічні характеристики способу розробки.

Класичні підходи комплексних індексних систем в різних сферах діяльності були використані в численних дослідженнях [71]. В роботі [72] визначено, що загалом, індексні методи – це розрахункові, кількісні методи, пов'язані з визначенням одиничних індексів (коефіцієнтів) за ключовими показниками та аспектами діяльності та їх зведенням до інтегрального показника. Залежно від методики аналізу застосування цих методів можна передбачати як проведення досить складних розрахунків, так і простих математичних операцій. В той же час, інтегральний метод дозволяє отримати однозначні оцінки позицій; є досить простим і наочним, але не дає можливості для глибокого аналізу. Складні системи часто передбачають розбиття індивідуальних індикаторів на підгрупи для точнішого аналізу.

Базою для розробки показника інтегральної оцінки є екологічні показники розроблені Європейською Економічною Комісією ООН «Керівництво щодо застосування екологічних показників у країнах Східної Європи, Кавказу та Центральної Азії», «Директива Європейського парламенту та Ради Європейського Союзу № 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 року» (Водна рамкова директива ЄС), та положення чинного законодавства, нормативно-правових документів стосовно створення Державної системи моніторингу довкілля і затверджених порядків та положень щодо його проведення.

Основні підходи до інтегральної оцінки можуть включати різні коефіцієнти,

наприклад коефіцієнт екологічної стабільності [73]:

$$E_{\text{кес}} = \frac{\sum P_i B_i}{\sum P_i}$$

де: P_i – площа, B_i – бал стабільності.

Це може бути інтегральний показник стану довкілля ($\Pi_{\text{під}}$):

$$\Pi_{\text{під}} = \frac{P_{\text{вод}} + P_{\text{зем}} + P_{\text{атм}}}{3},$$

де: Π – індекси стану води, землі та атмосфери.

Як правило, інтегральний критерій для оцінки екологічної збалансованості території розглядають як адитивну модель з окремими складовими (в загальному вигляді):

$$I_{\text{ES}} = \omega_1 G + \omega_2 H + \omega_3 T + \omega_4 K_{\text{tect}} + \omega_5 K_{\text{geo}} \quad (1)$$

де: ***G*** — геоморфологічна стабільність;

H — гідрогеологічна стабільність;

T — техногенне навантаження;

K_{tect} — тектонічний параметр порушеності;

K_{geo} — геохімічний стабілізуючий показник;

ω_i — це вага показника i , яка визначає ступінь впливу цього показника на інтегральний результат.

Цей критерій розширює класичні підходи шляхом включення структурно-тектонічної та геохімічної компонент.

Методика нормування показників полягає в наступному. Щоб уникнути неоднорідності одиниць виміру, кожний показник нормується у діапазоні $[0; 1]$ за методом стимулюючих (чим більше — тим краще) та дестимулюючих (чим менше — тим краще) показників:

Стимулюючі показники:

$$X_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Дестимулюючі показники:

$$X_i = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

де: $X_{(\max - \min)}$ — показник площі порушень або засолення та ін.

Це стандартний підхід, що використовується в індексі екологічної ефективності (EPI - Environmental Performance Index) та багатьох міжнародних шкалах оцінки екологічних ризиків. Це метод кількісної оцінки та рейтингу, що базується на більш ніж 20 показниках, які вимірюють екологічний стан та ефективність державної екологічної політики країн світу. Його розробляють фахівці Єльського та Колумбійського університетів для оцінки здоров'я екосистем та кліматичної політики. Індекс публікується 1 раз на 2 роки [74].

Ваги (ω_i) визначаються методом попарних порівнянь, узгодженим із групою експертів з екології, гірничих технологій та гідрогеології.

Аналіз численних досліджень де порівнюються технологічні впливи на екологію у відкритих та підземних розробках, показав [75-77], що існують концептуальні відмінності технологічних систем видобування корисних копалин. Результати показують, що відкрита розробка родовищ має більш видимі наслідки (деградація ґрунтів і повітря), тоді як підземна розробка родовищ створює приховані, але більш токсичні наслідки (забруднення води та професійні ризики) (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 Концептуальні відмінності технологічних систем

Компонент критерію	Кар'єрна схема	Шахтна схема	Змішана схема
Площа поверхневого порушення	Найбільша	Мінімальна	Помірна
Зміна <i>гідрогеологічних умов</i>	Висока (велика депресійна лійка)	Специфічна, локальна депресійна лійка	Помірна депресійна лійка
Ризик геохімічної мобілізації	Високий	Середній (локальний)	Середній
Тектонічні ризики	Менш критичні	Найбільш значущі	Значущі
Економічна ефективність	Висока для неглибоких покладів	Вища при глибоких покладах	Оптимальна

Тому для досліджуваних в роботі родовищ маємо наступні особливості (см. гл.2):

1. Полохівське родовище. Тип розробки: шахта. Природна геохімічна аномальність: Cr–Ni–Zn (логнормальний розподіл, високі значення). Тектонічна

неоднорідність: «квіткові структури», багато вузлів перетину розломів. Біотична зона: нормальна аграрна екосистема, яка чутлива до міграційних потоків. Тобто, домінантною складовою є гідрогеологічний чинник та ризики вторинної мобілізації елементів що виражені у гідрохімічних ореолах. Структурно-тектонічні параметри будуть мати високий внесок у інтегральний критерій.

2. Гуляйпільське родовище. Передбачена розробка - кар'єр: пропонована технологія - змішана розробка (кар'єр до 400-500 м + шахта глибше). Морфометричні зміни поверхні рельєфу великі за рахунок контурів кар'єру (значно більший за рудні тіла). Структурно-тектонічні зони менш виражені, але вплив гідродинаміки доволі значущий. В цьому випадку, домінантною складовою буде комбінація великих морфометричних змін та гідрохімічних і гідрогеологічних ефектів. Змішана схема дозволить мінімізувати площу поверхневого порушення.

Для коректної оцінки екологічних наслідків розробки корисних копалин треба емпіричне обґрунтування екологічної доцільності комбінованого способу розробки для та Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів та Полохівського родовища петалітєвих руд.

3.3 Емпіричне обґрунтування екологічної доцільності комбінованого способу розробки Гуляйпільського родовища

3.3.1. Математична модель порівняння технологій розробки

В дисертаційному дослідженні нами зроблений формалізований розрахунок - математичну модель порівняння сценаріїв та інтеграцію в інтегральний критерій екологічної збалансованості для Гуляйпільського родовища у вигляді двох сценаріїв. Сценарій 1 – кар'єр до глибини 600 м. Сценарій 2 – комбінований варіант: до 400 м – кар'єр, 400+ м – підземна розробка (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Вихідні параметри (Гуляйпільське родовище)

Вихідні параметри	Показники
Площа родовища	936 га
Протяжність пласта	17 км
Глибина оцінки запасів	600 м
Середня потужність розкриву	120 м
Коефіцієнт розкриву	1,1 м ³ /м ³

Прогнозна глибина кар'єру (сценарій 1)	600 м
Комбінований варіант (сценарій 2)	до 400 м – кар'єр, 400+ м – підземна розробка

Сценарій 1 — повністю кар'єрна розробка до 600 м

Із геометрії відкритих гірничих виробок при розрахунку габаритів кар'єру у плані з урахуванням глибини та кута укосу бортів використовуються параметри кар'єру, які визначаються:

$$L_d = L_{dp} + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma$$

$$B_p = B_d + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma$$

де: L_d — довжина кар'єру по дну,

L_{dp} — довжина кар'єру по поверхні (або навпаки — залежить від прийнятої схеми),

B_p — ширина по поверхні,

B_d — ширина по дну,

H_k — глибина кар'єру, γ — кут укосу борту кар'єру.

$H_k = 600$ м, середній кут укосу для міцних порід при глибині >300 м: $\gamma \approx 45^\circ$
 $\rightarrow \operatorname{ctg} 45^\circ = 1$

Розрахунок збільшення габаритів:

$$\Delta L = 2 \times 600 \times 1 = 1200 \text{ м}$$

$$\Delta B = 2 \times 600 \times 1 = 1200 \text{ м}$$

Площа додаткового розширення:

$$\Delta S_1 \approx 1.2 \times 1.2 = 1.44 \text{ км}^2 = 144 \text{ га}$$

Сценарій 2 - комбінована схема (кар'єр до 400 м)

$$\Delta L = 2 \times 400 \times 1 = 800 \text{ м}$$

$$\Delta B = 2 \times 400 \times 1 = 800 \text{ м}$$

$$\Delta S_2 \approx 0.8 \times 0.8 = 0.64 \text{ км}^2 = 64 \text{ га}$$

Екологічний коефіцієнт економії площі буде мати наступний вигляд:

$$K_S = \frac{S_1 - S_2}{S_1}$$

$$K_S = \frac{144-64}{144} = 0.56$$

Тобто, зменшення площі порушених земель складає 56% в умовах 2 варіанту.

Розрахунок економії розкривних робіт залежить від об'єм розкриву, а саме:

$$V = S \times H_{cp}$$

де: H_{cp} – середня глибина розкриву,

S – площа розкриву,

V - об'єм розкриву.

Для спрощення беремо середню глибину для двох сценаріїв та розраховуємо об'єми розкриву (табл. 3.3.).

Таблиця 3.3 Об'єми розкриву для двох сценаріїв

Сценарій 1:	Сценарій 2:
Глибина 600 м	Глибина 400 м
$V_1 = 144 \text{ га} \times 600 \text{ м} \approx 86.4 \text{ млн м}^3$	$V_2 = 64 \text{ га} \times 400 \text{ м} \approx 25.6 \text{ млн м}^3$

Екологічний коефіцієнт економії розкриву буде мати наступний вигляд:

$$K_V = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

$$K_S = \frac{86.4 - 25.6}{86.4} = 0.70$$

Тобто, економія розкриву складає 70% в сценарії 2 відносно сценарію 1.

Оцінка зниження впливу на гідрогеологічний режим.

Радіус депресійної лійки (R)

$$R = \sqrt{H/I},$$

де I – гідрравлічний градієнт потоку ґрунтових вод; при $I \approx 0.001$

радіус депресійної лійки $R = \sqrt{H/I} = \sqrt{600/0.001} = 800 \text{ м.}$

$$R = \sqrt{H/I} = \sqrt{400/0.001} = 635 \text{ м.}$$

Тоді екологічний коефіцієнт економії радіусу депресійної лійки має вигляд:

$$K_R = \frac{R_1 - R_2}{R_1}$$

$$K_R = \frac{800 - 635}{800} = 0,20$$

При другому сценарію маємо зменшення радіуса впливу на 18–20%.

Формування інтегрального екологічного коефіцієнта економії Кесо.

У реальних системах оцінювання всі показники мають різну значимість. Наприклад, деградація ґрунту може мати менший вплив на екологічну стабільність, ніж кількість важких металів у водах. Або у водних екосистемах якість води може важити більше, ніж морфологічна стабільність схилів. Тому ваги (вагові коефіцієнти) дозволяють: відобразити експертну або нормативну значимість показника; інтегрувати різноманітні дані у єдину оцінку; уникнути ситуації, коли велике значення мало важливого показника «врівноважується» малим значенням важливішого показника [78].

Саме тому, припустимо введення вагових коефіцієнтів, які показують наскільки важливий кожен показник у загальній оцінці екологічного стану; як зміна одного показника впливає на інтегральний показник; що деякі показники можуть бути більш значущими (наприклад, забруднення води) порівняно з іншими (наприклад пилом). Наприклад:

1. площа порушення – 0.4
2. розкрив – 0.3
3. гідрогеологія – 0.2
4. викиди/пил – 0.1

Фактично, це стандартний елемент багатокритеріальної оцінки. Вагові коефіцієнти у формулі інтегрального показника були отримані методом попарних порівнянь (МПП) на основі експертних оцінок фахівців у галузі гірничої екології. Це дозволяє врахувати різну значущість окремих компонентів екологічного стану у загальному інтегральному критерії. У гірничо-екологічних системах якість води та гідрогеологічний стан критично впливають на екосистему, тоді як деякі морфологічні параметри можуть бути менш визначальними. Тому застосування методів МПП або експертних оцінок є більш обґрунтованим [79] .

$$K_{\text{есо}} = 0.4K_S + 0.3K_V + 0.2K_R + 0.1K_E$$

Приймаємо середнє зниження пилу 30% , тобто $K_E = 0.3$, тоді :

$$K_{eco} = 0.4 \times 0.56 + 0.3 \times 0.70 + 0.2 \times 0.18 + 0.1 \times 0.30 = 0.50$$

Екологічний коефіцієнт економії становить $K_{eco} = 0.50$. Отже, комбінована система зменшує сукупне екологічне навантаження приблизно на 50% порівняно з повністю кар'єрною схемою.

Наступний етап – це інтеграція в інтегральний критерій екологічної збалансованості. У роботі модель адаптована до умов гірничопромислових геосистем.

Базовий інтегральний критерій I_{ES} з класу адитивних інтегральних індексів з нормуванням відносно порогових (критичних) значень має вигляд:

$$I_{ES} = \sum \omega_i \frac{X_i}{X_{crit}}$$

де: X_i — фактичне значення;

X_{crit} — гранично допустиме або цільове значення;

ω_i — це вага показника i , яка визначає ступінь впливу цього показника на інтегральний результат.

Нормування виконано методом min–max.

Це стандартна форма побудови інтегральних показників в екологічній безпеці, сталому розвитку, техногенно-екологічному ризику, геоекологічній оцінці територій. Такий підхід широко використовується в екологічних індексах якості води (WQI), індексах техногенного навантаження, системах екологічного моніторингу. Пороговий підхід або використання X_{crit} дозволяє врахувати екологічні нормативи (ГДК, допустимі деформації тощо) та визначити межу переходу системи в нестійкий стан.

До критерію можуть входи наступні показники:

1. Гідрогеологічний блок - коефіцієнт зміни рівня підземних вод, мінералізація.
2. Гідрогеохімічний блок - наявність токсичних елементів за нормативами (ДСанПіН 2.2.4-171-10)

3. Геоморфологічний блок - коефіцієнт техногенної трансформації рельєфу, індекс ерозійної небезпеки.

4. Ґрунтовий блок - коефіцієнт деградації ґрунтів, рівень важких металів.

5. Біотичний блок - індекс біорізноманіття, площа порушених екосистем.

Тобто, ця система оцінки інтегрує різні екологічні параметри.

Для двох сценаріїв $I_{ES(1)}$ та $I_{ES(2)}$ маємо наступні показники:

$$I_{ES(1)} > 1$$

$$I_{ES(2)} \approx 0.5-0.7$$

де $I_{ES} < 0,7$ — екологічно допустимий рівень.

Таким чином, вперше для умов Гуляйпільського родовища розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності комбінованої системи розробки. Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри. Доведено, що перехід на змішану систему дозволяє зменшити сукупне екологічне навантаження на 50%. Слід зауважити, що інтегральний критерій дозволив кількісно оцінити екологічну ефективність технологічних схем 1 і 2 та показав, що перехід до змішаної системи розробки (другий сценарій) підвищує екологічну збалансованість території.

3.3.2. Геохімічні та тектонічні передумови формування екологічної рівноваги (на прикладі Гуляйпільського родовища)

Спираючись на отримані результати досліджень природно-геологічних та геоекологічних передумов формування еколого-збалансованої території при освоєнні родовищ корисних копалин (см. розд. 2), результати 3D моделювання кар'єрної [40] та шахтної [61] технологій розробки покладів, обґрунтування екологічної рівноваги території при розробці залізистих кварцитів не може обмежуватися лише геометрією кар'єру та гідрогеологічними параметрами.

Для умов глибокого залягання покладів, приурочених до синклінальних структур із крутим падінням крил (>1000 м), визначальну роль відіграють тектонічна будова та геохімічна специфіка масиву. Саме вони формують просторову неоднорідність фільтраційних властивостей, інтенсивність водоприпливів, міграцію хімічних елементів і вторинні геохімічні аномалії.

Інтеграція системи показників екологічної рівноваги з геохімічними та тектонічними чинниками враховує тектонічний фактор як детермінанту

екологічної стійкості.

Геолого-тектонічна будова родовища (круті крила синклінальної складки, система тріщинних зон) визначає наявність: інтенсивної фільтрації підземних вод, потенційні зони локалізації підвищених водоприпливів, ділянки ослаблених порід з меншими кутами укосу та ризик активізації зсувних процесів.

З позицій екологічної рівноваги додатково введемо тектонічний коефіцієнт дестабілізації K_{tect} :

$$K_{tect} = \frac{L_{tr}}{L_{zag}}$$

де: L_{tr} — сумарна довжина тектонічних порушень у межах контуру кар'єру,
 L_{zag} — загальна довжина борту.

Тоді зі зростанням K_{tect} підвищується проникність масиву, зростає ризик прориву підземних вод та знижується стійкість бортів. Але перехід до комбінованої схеми дозволить обмежити площу перетину активних тектонічних зон відкритим контуром, зменшуючи вплив на геодинамічну рівновагу.

Гуляйпільському родовищу притаманна наявність зон тектонічної тріщинуватості та розломних структур, які формують підвищену проникність масиву, визначають напрямки підземного водообміну, локалізують зони потенційних водоприпливів та впливають на стійкість бортів кар'єру.

У межах кінцевого контуру відкритої розробки перетин активних тріщинних зон спричинить зростання коефіцієнта фільтрації (до 10,87 м/добу в окремих інтервалах) [40], що спричинить формування депресійної лійки значної площі та підвищення ризику гідродинамічних проривів.

Для кількісної оцінки впливу тектонічного чинника можна та доцільно використовувати також коефіцієнт тектонічної порушеності K_{tect} у вигляді:

$$K_{tect} = \frac{S_{tr}}{S_{кар}}$$

де: S_{tr} - площа (або довжина) тектонічних зон у межах кар'єру,
 $S_{кар}$ - площа кінцевого контуру.

В таких розрахунках на відміну від попередніх ми зможемо використовувати

площу контуру кар'єру (в залежності від того, які моніторингові фактичні данні будуть закладені в аналіз при видобуванні корисних копалин). В останньому прикладі розуміємо, що зі збільшенням Ktect зростає геодинамічна нестійкість території та інтенсивність в тому числі гідрогеологічної трансформації.

Але, комбінована схема розробки (відкрита до 400 м, глибше - підземна) дозволить нам обмежити площу перетину тектонічних структур відкритими гірничими виробками, що буде сприяти стабілізації геомеханічного стану масиву.

Окреме питання – це геохімічний блок показників, які також впливають на формування екологічної рівноваги. Мінералогічний склад залізистих кварцитів характеризується високим вмістом оксидів заліза (30–40 % і більше), а також наявністю супутніх компонентів (Mn, Ti, V) [40, 53, 80]. У зонах тектонічної активізації можуть траплятися сульфідні мінерали, здатні до інтенсивного окиснення при розкритті. У процесі відкритої розробки активізуються процеси окиснення піриту, формуються кислі дренажні води, мобілізується кількість важких металів у водному середовищі. Значні водоприпливи (1100–1500 м³/год з урахуванням опадів) будуть сприяти прискоренню геохімічної міграції елементів та зміні природного гідрохімічного фону.

Тому, для оцінки геохімічної стабільності пропонується індекс геохімічної рівноваги Kgeo:

$$K_{geo} = 1 - \frac{C_{факт}}{C_{ГДК}}$$

де: $C_{факт}$ — фактична концентрація рухомих форм металів у дренажних водах;

$C_{ГДК}$ — гранично допустима концентрація.

Для відкритої розробки площа контакту «порода–атмосфера–вода» завжди буде максимальна, що обов'язково підвищить ризик геохімічної дестабілізації. У комбінованій схемі глибші горизонти ізолюються, зменшується площа окиснювального фронту, що стабілізує Kgeo. Зменшення Kgeo буде свідчити про втрату екологічної рівноваги. Перехід до підземної стадії видобутку знижує площу контакту окиснювального фронту з атмосферою, що обмежує масштаб вторинних геохімічних процесів.

Оцінку взаємозв'язку гідрогеохімії та технології видобування можна

зробити завдяки індексу гідрогеохімічної трансформації K_{hg} :

$$K_{hg} = \frac{\Delta M}{M_{\text{фон}}}$$

де: ΔM — приріст мінералізації або концентрації металів,

$M_{\text{фон}}$ — фонові величини.

Запропонована система замкненого водообігу водозбірник - хвостосховище - оборотне водопостачання [54] знижує значення K_{hg} , локалізуючи циркуляцію техногенних вод у межах виробництва.

З огляду на вищезначене та інтеграція геохімічних і тектонічних чинників у систему екологічної оцінки з урахуванням геометричних, гідрогеологічних, геохімічних і тектонічних параметрів інтегральний критерій екологічної збалансованості з урахуванням формули 1 набуває наступного вигляду:

$$I_{EC}^* = \omega_1 K_S + \omega_2 K_W + \omega_3 K_R + \omega_4 (1 - K_T) + \omega_5 (1 - K_{tect}) + \omega_6 K_{geo} \quad (2)$$

де: ω_i — вагові коефіцієнти ($\sum \omega_i = 1$);

K_S — коефіцієнт стійкості бортів;

K_W — гідрогеологічне навантаження;

K_R — порушення земельних ресурсів;

K_T — технологічна керованість;

K_{tect} — тектонічна порушеність;

K_{geo} — геохімічний ризик;

Якщо геомеханічний параметр (K_S) взяти 120 м (глибина кар'єру), кут укосу $\gamma = 45^\circ$, $FS = 1.35$ (Розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості борту кар'єру, норматив (FS_n) приблизно 1.2), тоді

$$K_S = \frac{FS_n}{FS} = 0.89$$

При глибині 400 м напружений стан масиву зростає, зменшується коефіцієнт запасу стійкості. Для глибоких кар'єрів 350–450 м типовий FS має величину $FS = 1.15–1.25$.

Прийmemo консервативно $FS = 1.18$ при нормативному $FS_n = 1.2$, тоді

$$K_S = 1.2 / 1.18 = 1.017$$

Оскільки K_S не може перевищувати 1 (це граничний стан), приймаємо

$KS = 1.00$. В такому випадку, геомеханічний стан вже критично наближений до граничного. Тобто глибина кар'єру не повинна бути більшою ніж 400 м.

Збільшення глибини розробки призводить до зростання водоприпливів. Оскільки прогнозний водоприплив рахувався в обсязі 850 м³/год при 120 м глибини та 1600 м³/год при 400 м глибини, але критичний (проектний граничний) може бути максимальний до 1800 м³/год, тоді $K_W = 850/1800 = 0.47$ при 120 м глибини, та $K_W = 1600/1800 = 0.89$ при 400 м глибини.

Стосовно порушення земель, маємо площа кар'єру + відвалів приблизно 62 га. Гранично допустима для території 80 га. Тоді $K_R = 62/80 = 0.78$ (для 120 м глибини) та при збільшенні глибини до 400 м контур кар'єру також збільшується (технологічний чинник).

Для $H = 400$ м площа збільшується приблизно в 1.8–2.2 рази. Приблизно вона буде 120 га (62 га*2), але збільшиться і гранично-допустима площа до 150 га.

Тоді $K_R = 120/150 = 0.8$ (для 400 м глибини показник зростає).

Наступний показник - технологічна керованість.

Для кар'єрної системи (регульовані укоси, дренаж, моніторинг) приймаємо $K_T = 0.7$ (120 м) та $K_T = 0.82$ (400 м глибини).

За структурною позицією тектонічна порушеність району характеризується як помірна розломна дислокованість), тому приймаємо $K_{tect} = 0.65$.

З точки зору геохімічного фактору - нормований індекс потенційного вилуговування рідкісних елементів приймаємо $K_{geo} = 0.7$.

Для технології кар'єрної системи розробки з врахуванням пріоритету гідрогеології та геомеханіки вагові коефіцієнти мають приблизно наступний вигляд (табл. 3.4)

Таблиця 3.4 Вагові коефіцієнти показників

Показник	Вага
ω_1 (геомеханіка)	0.20
ω_2 (гідрогеологія)	0.25
ω_3 (землекористування)	0.15
ω_4 (технологія)	0.15
ω_5 (тектоніка)	0.15
ω_6 (геохімія)	0.10

Примітка: сума = 1.00

Тоді

$$I_{ES}^* = 0.20 \cdot 1.00 + 0.25 \cdot 0.89 + 0.15 \cdot 0.80 + 0.15 \cdot (1 - 0.70) + 0.1 \cdot 5(1 - 0.65) + 0.10 \cdot 0.70 = 0.71$$

Тобто за рахунок введених показників I_{ES} для кар'єру збільшився з 0,5 до 0,71, що характеризує стан як нестійкий, наближений до критичного.

При цьому, збільшення глибини кар'єру з 120 м до 400 м підвищує інтегральний критерій I_{ES}^* з 0,61 до 0,71 (приблизно на 16%, що свідчить про нелінійне зростання екологічного навантаження при переході до глибокої кар'єрної розробки).

При шахтному способі зміна глибини не так прямо впливає на поверхневі показники, але ми оцінюємо екологічний критерій як практично стабільний, оскільки шахтна система мінімізує поверхневі порушення, але не усуває гідродинамічні ризики.

Розрахунки I_{ES} для кар'єрної схеми розробки Гуляйпільського родовища показали, що показник зростає з глибиною передбачуваного, кар'єру. Нижче ~300 м стан ще помірний, але на глибині ~ 400 м показник переходить у зону нестабільності (≈ 0.71). Тому максимальна глибина розробки сягає ~ 400 м.

Резюмуємо отриманий результат;

1. Кар'єрна розробка для глибин ≥ 400 м створює високий екологічний ризик, що дестабілізує територію.

2. Шахтна схема показує кращу екологічну збалансованість при тих самих глибинах.

3. Змішана схема (кар'єр + шахта) могла б бути компромісом порівняно з повністю відкритою розробкою: показник I_{ES}^* також має значення ≈ 0.71 але до глибин розробки більш ніж 600 м. Що вже можна оцінювати як гарний та екологічно обґрунтований результат, який враховує ступень просторової трансформації ландшафту, інтенсивність водовідбору, техногенне навантаження, тектонічну порушеність масиву та геохімічну стабільності середовища. Таким чином, екологічну рівновагу території можна визначити як функцію

вищезначених, яка враховує змінних.

3.4. Розрахунок інтегрального критерію екологічної рівноваги для Полохівського родовища.

3.4.1. Особливість розрахунку для Полохівського родовища

Особливість розрахунку інтегрального критерію екологічної рівноваги саме для Полохівського родовища враховує специфіку шахтного способу розробки. На відміну від Гуляйпільського залізорудного родовища, родовище літєвих руд мають вже зафіксований природний геохімічний фон який містить перевищення Cr, Ni, Co. Доведений основний екологічний ризик [61] – тектонічно контрольована міграція через квіткові структури. Додатково: рудні тіла не виходять на поверхню, потужність покривних відкладів обмежує прямий контакт з атмосферою.

Тому екологічна рівновага тут визначається не площею порушення (як для кар'єру), а: стабільністю розломних зон; контрольованістю дренажу та збереженням природного фону.

Вихідні умовні дані (наближені до реальних параметрів) мають наступний вигляд:

1. Геометрія ліцензійного контуру. Площа контуру $S = 4,5 \text{ км}^2$, сумарна довжина розломів у межах контуру $L_{\text{faul}} = 2,1 \text{ км}$, кількість вузлів перетину розломів $n = 6$. Середній кут схилу $\alpha = 3^\circ$. Потужність покривних відкладів $H = 75 \text{ м}$, коефіцієнт фільтрації тріщинних зон $K_f = 0,4 \text{ м/добу}$

2. Параметри геохімічних даних, окрім літію (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 Параметри геохімічних даних

Елемент	$C_{\text{ф}}$ (мг/кг)	$C_{\text{фон}}$ (мг/кг)	σ
Cr	110	70	15
Ni	95	60	12
Zn	80	65	10
Pb	28	20	6

Примітка: $C_{\text{ф}}$ – фактична концентрація хімічного елементу, σ — це стандартне відхилення фонового розподілу концентрацій, $C_{\text{фон}}$ - фонові концентрації хімічного елементу (природний геохімічний фон), яка формується літологією материнських порід, тектонічною позицією, глибинними флюїдами

потоками, регіональною металогенічною спеціалізацією.

Для родовищ літію типу Полохівського (граніт-пегматитовий тип) фонові значення Li, Rb, Cs можуть бути вищими за середньокларкові по платформі.

Слід зауважити, що при оцінці забруднення використовується критерій Z , який дозволяє відокремити геохімічний фон від аномалій [81]:

$$Z = \frac{C_{\text{ф}} - C_{\text{фон}}}{\sigma}$$

Це дозволяє врахувати природну мінливість геохімічного фону, відокремити техногенну аномалію від природної, уникнути помилки при роботі в металогенічно збагачених зонах. Z — це нормоване відхилення, яке визначає, наскільки дане значення виходить за межі типових коливань. Інтерпретація Z -показника (тобто стандартного відхилення як нормалізатору геохімічних концентрацій) додана в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 Інтерпретація Z -показника

Z	Інтерпретація
0-1	природна варіація
1-2	слабка аномалія
2-3	контрастна природна геохімічна аномалія
> 3	стійка техногенна аномалія

Розуміємо, що при шахтній розробці корисних копалин відвали формуються з глибинних порід. Дренажні води, в такому випадку, контактують з первинно мінералізованими зонами. Може статися вилуговування Li, Rb, Cs, F. Тому без використання описаних вище показників, ми можемо помилково трактувати природну геохімічну ситуацію як забруднення.

3.4.2. Розрахунок показників

Для шахти Полохівського родовища немає великої депресійної чаші відкритого типу та відсутня повна деструкція кори вивітрювання. Тобто морфометричний показник K_{relief} втрачає домінуюче значення.

Але посилюється роль глибинної фільтрації: формується локальна

депресійна воронка, активуються розломних канали, змінюється гідродинамічний режим тріщинних зон. Отже, зростає значущість тектонічного фактору (K_{tect}).

Розрахунок коефіцієнта тектонічної проникності показав середній рівень структурної порушеності:

$$K_{tect} = 2.1/4.5 = 47 \text{ км/км}^2$$

Розрахунок індексу геодинамічної активності за рахунок наявності підвищеної концентрації вузлів (потенційні флюїдні канали) має наступний вигляд:

$$K_{geo} = 6/4.5 = 1.33 \text{ вузли/км}^2$$

Для обчислення індексу комплексної геохімічної аномалії спочатку обчислюємо Z-показники:

$$Z_{Cr} = (110-70)/15 = 2.67$$

$$Z_{Ni} = (95-60)/12 = 2.92$$

$$Z_{Zn} = (80-65)/10 = 1.5$$

$$Z_{Pb} = (28-20)/6 = 1.33$$

Тобто, середнє значення :

$$K_{ga} = (2.67+2.92+1.5+1.33)/4 = 2.11$$

Тобто, ми маємо контрастну природну геохімічну аномалію.

Морфометричний показник свідчить про низький ризик поверхневої міграції за рахунок нерозчленованого рельєфу:

$$K_{relief} = \tan 3 = 0.052$$

Розрахунок гідрогеологічного показнику (відносно захищений горизонт):

$$K_{gidro} = 75/0.4 = 187.5$$

Для інтегрального критерію нормуємо:

$$K_{gidro}^* = 187.5/200 = 0.94$$

Для зручності нормуємо всі отримані показники у межах 0–1 (табл. 3.7), тому що в нашій моделі одночасно враховуються різні данні з різними одиницями виміру (концентрації елементів (мг/кг), водоприплив (м³/год), площа порушених земель (га), коефіцієнт стійкості бортів (безрозмірний) та ін.). Тому застосовується перехід

до безрозмірної шкали. Такий підхід є загальноприйнятим у системах інтегральної екологічної оцінки та відповідає сучасним методикам агрегування показників [82].

Таблиця 3.7 Нормування отриманих показників

Показник	Значення	Нормоване
Ktect	0.47	0.78
Kgeo	1.33	0.67
Kga	2.11	0.84
Krelief	0.052	0.20
Kgidro	0.94	0.94

Оскільки основний ризик — тектонічно-геохімічний, приймаємо для літійового родовища вагові коефіцієнти: ω_1 (тектоніка) = 0.3, ω_2 (геодинаміка) = 0.25, ω_3 (геохімія) = 0.25, ω_4 (рельєф) = 0.05, ω_5 (гідрогеологія) = 0.15 з розрахунку, що $\Sigma\omega = 1$.

Таким чином, наша система стає структурно-флюїдною, а не морфодинамічною.

Для розрахунку інтегральний критерій екологічної збалансованості беремо наші попередні нормовані значення (табл. 3.5) та формулу 2, отримаємо:

$$I_{ES} = 0.30 \cdot 0.78 + 0.25 \cdot 0.67 + 0.25 \cdot 0.84 + 0.05 \cdot 0.20 + 0.15 \cdot 0.94 = 0.763$$

Для інтерпретації результату приймаємо оціночну шкалу:

0–0.4 — нестійка система,

0.4–0.7 — умовно збалансована,

0.7–1.0 — структурно стабілізована система.

Отримане значення показує, що територія перебуває у стані відносної екологічної стабільності, але з підвищеним геохімічним та тектонічним потенціалом дестабілізації.

Для шахти існує накопичувальний ефект зміни гідродинаміки, тобто інтегральний показник має часову чутливість. Наприклад, через 10–15 років експлуатації можливе збільшення коефіцієнта фільтрації у розломах, або підвищення концентрації водно-міграційних елементів (Pb, Hg), тим самим

локальне зниження показника до 0.68–0.70. Цей ефект можна врахувати в наступних дослідженнях з точки зору застосування показників накопичування процесів (базова логіка часової моделі).

Зазвичай, найбільш інтенсивні зміни відбуваються у перші 5-8 років з моменту початку експлуатації родовища, та вже після 12-15 років, система переходить у квазістаціонарний режим.

Окремо зауважимо, що у сучасній геоекологічній практиці розроблено значну кількість методичних підходів до оцінки екологічної рівноваги територій, на яких здійснюється видобуток корисних копалин. Зокрема, застосовуються інтегральні коефіцієнти еколого-технологічної ситуації, методики оцінки вторинного забруднення, підходи до аналізу трансформацій гідрогеологічного режиму, геохімічні індекси техногенного навантаження, показники накопичення токсикантів у трофічних ланцюгах.

Зазначені методичні прийоми були апробовані автором у дослідженнях територій, що перебували у стадії тривалої промислової експлуатації, зокрема:

- при оцінці інтегральної еколого-технологічної ситуації (м. Солотвино) [83];
- при аналізі трансформаційної зміни гідрогеологічного режиму Новоукраїнського родовища гранітів [84];
- при дослідженні процесів вторинного забруднення в системі «Каховське водосховище – Чорне море» [85].

У всіх наведених випадках родовища вже експлуатувалися, а оцінка здійснювалася на основі фактичних багаторічних даних моніторингу, зокрема: динаміки геохімічних показників підземних і поверхневих вод, змін коефіцієнтів фільтрації та параметрів водообміну, концентрацій токсикантів у донних відкладах, характеристик осідань, підтоплення та деформацій земної поверхні а також показників вторинного перерозподілу хімічних елементів.

У досліджуваному випадку аналізовані родовища знаходяться на етапі проєктування, тому відсутній довгостроковий моніторинг, що унеможливорює визначення трендів зміни гідрогеологічного режиму, розрахунок реальних коефіцієнтів техногенної трансформації, побудову регресійних або часових

моделей забруднення, оцінку вторинного геохімічного перерозподілу елементів.

Відсутність аналізу кумулятивного ефекту багаторічної експлуатації (без фактичних часових рядів застосування моніторингово-орієнтованих індексів) призведе до методологічної некоректності та використанню припущень замість емпіричних даних.

Таким чином, для родовищ, що не перебувають у стадії тривалої промислової експлуатації та не мають багаторічного гідрогеохімічного моніторингу доцільним є використання прогностично-нормативного підходу, заснованого на геологічних і тектонічних передумовах, природному геохімічному фоні, проєктних параметрах гірничої системи, розрахункових гідрогеологічних характеристик, нормуванні показників до безрозмірної шкали (0–1).

Саме це обґрунтовує розробку інтегрального критерію екологічної збалансованості як прогностичного інструменту, а не інструменту постфактум-аналізу.

Висновки до розділу 3.

Обґрунтовано концепцію екологічної рівноваги гірничопромислової території як функції тектонічної порушеності масиву та геохімічної активності порід, що дозволяє перейти від статичної оцінки впливу до структурно-динамічної моделі формування техногенно змінених геосистем.

Запропоновано кількісні індикатори тектонічної та геохімічної дестабілізації, зокрема: коефіцієнт тектонічної порушеності, індекс геохімічної рівноваги, індекс гідрогеохімічної трансформації, які інтегруються до загального інтегрального критерію екологічної збалансованості гірничого підприємства.

Розроблено підхід до врахування тектонічних структур у виборі технології розробки (відкрита / комбінована схема) шляхом оцінки просторового перетину активних зон з кінцевим контуром кар'єру, що дозволяє мінімізувати гідродинамічну та геохімічну дестабілізацію території.

Удосконалено методологію оцінювання екологічної збалансованості гірничодобувних територій за рахунок включення параметрів структурної неоднорідності масиву, показників міграційної здатності хімічних елементів,

взаємозв'язку між коефіцієнтом фільтрації тріщинних зон та масштабами депресійної лійки.

Створений в дисертаційному дослідженні підхід до прогнозування гідрохімічних змін шляхом поєднання водного балансу кар'єру з геохімічними показниками масиву, може дозволити оцінити ризик формування вторинних аномалій у постмайнінговий період.

Набуло подальшого розвитку теоретичне положення про залежність рівня екологічної рівноваги від глибини розробки в умовах складчастих структур із крутим падінням крил.

Набуло подальшого розвитку обґрунтування доцільності комбінованої схеми «кар'єр + шахта» як механізму зменшення площі перетину тектонічно активних зон, площі контакту окиснювального фронту, інтенсивності гідрогеохімічної трансформації.

Доведено, що екологічна рівновага гірничопромислової території формується як інтегрований результат взаємодії геометричних параметрів розробки, тектонічної структури масиву та геохімічної активності порід, а врахування цих чинників у виборі технології видобутку забезпечує підвищення інтегрального показника екологічної збалансованості на етапах експлуатації та рекультивації.

Доведено, що для глибинних літєвих родовищ кристалічного фундаменту інтегральний критерій екологічної збалансованості повинен мати тектонічно-гідрогеохімічну домінанту, що принципово відрізняє їх від кар'єрних залізрудних об'єктів.

Вперше для умов Гуляйпільського родовища розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності комбінованої системи розробки. Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри. Доведено, що перехід на змішану систему дозволяє зменшити сукупне екологічне навантаження на 50%. Слід зауважити, що інтегральний критерій дозволив кількісно оцінити екологічну ефективність технологічних схем 1 і 2 та показав, що перехід до змішаної системи розробки

(другий сценарій) підвищує екологічну збалансованість території.

Вперше для умов Полохівського родовища розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності шахтної системи розробки та визначено, що територія розробки буде мати показник інтегрального критерію екологічної збалансованості на рівні 0.763, що характеризує відносну екологічну стабільність але з підвищеним геохімічним та тектонічним потенціалом дестабілізації.

Вперше визначено, що територія розробки Гуляйпільського родовища при впровадженні технології комбінованої системи розробки буде мати показник інтегрального критерію екологічної збалансованості на рівні 0,71 при глибині кар'єру до 400 м та глибше шахтна розробка.

-

РОЗДІЛ 4. ФОРМУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ РІВНОВАГИ У ПОСТМАЙНІНГОВИЙ ПЕРІОД

4.1. Розробка організаційно-технологічної моделі управління екологічною стабільністю

Постмайнінгові території (ПМТ) — це простори, що сформувалися формуються внаслідок завершення або скорочення гірничодобувної діяльності та характеризуються суттєво трансформованими природними компонентами. До їх складу належать кар'єри, терикони, відвали, хвостосховища, шахтні поля та об'єкти інфраструктури, що втратили виробниче призначення.

Для таких територій характерна сукупність взаємопов'язаних екологічних проблем, що мають довготривалий характер. Порушення екологічної рівноваги зумовлене не лише безпосереднім вилученням мінеральних ресурсів, а й тривалим техногенним впливом, який зберігається навіть після завершення експлуатації родовищ.

Постмайнінговий період є завершальною фазою життєвого циклу гірничого об'єкта, проте з позиції екологічної безпеки саме він визначає довгострокову стійкість території і просторово-часову безпеку життєдіяльності в її межах. Проведені у попередніх розділах дослідження показали, що природно-геологічні параметри (тектонічна проникність, геохімічний фон, гідрогеологічна структура) формують базову екологічну матрицю території. Відповідно механізм забезпечення екологічної рівноваги має бути інтегрований із цією природною моделлю.

Організаційно-технологічна модель управління екологічною стабільністю повинна базуватися на наступних принципах:

1. Превентивність (планування закриття ще на стадії проектування).
2. Адаптивність (коригування заходів за результатами моніторингу).
3. Інтеграція природних чинників (наприклад, врахування K_{tect} , K_{geo} та ін.).
4. Поєднання технічної та біологічної рекультивації.
5. Фінансова гарантованість.

ПМТ мають багато проблем, вирішення яких потребує не тільки часу, але й грошей. Однією з найгостріших проблем ПМТ є руйнування ґрунтового покриву. У процесі відкритих і підземних гірничих робіт родючий шар повністю знімається або знищується, а на поверхні залишаються відвали з материнських порід, що часто мають несприятливі фізико-хімічні властивості. Тому встає проблема деградації рельєфу та ґрунтів. Серед основних чинників деградації слід виділити:

- Кислотне дронування. Наявність сульфідних мінералів (зокрема піриту) у відходах спричиняє утворення сірчаної кислоти під час контакту з водою та киснем. У результаті відбувається вимивання важких металів (свинцю, кадмію, цинку), що формує токсичне середовище та ускладнює біологічну рекультивацію.

- Нестабільність техногенного рельєфу. Відвали й терикони схильні до ерозії, зсувів та пиління. Це перешкоджає закріпленню рослинності та створює додаткові ризики для навколишніх територій.

- Нестача поживних елементів. Техногенні ґрунти практично позбавлені гумусу й біологічної активності, що істотно обмежує можливість природного відновлення рослинного покриву та біорізноманіття.

Тобто, рекультивація потребує не лише технічного вирівнювання території, а й цілеспрямованого відновлення ґрунтових функцій.

Наступна проблема ПМТ - порушення гідрогеологічного балансу. Вона є одним із найбільш тривалих екологічних наслідків гірничодобувної діяльності. Відкачування шахтних вод, інфільтрація дренажних вод та контакт атмосферних опадів із відходами спричиняють міграцію забруднювачів у підземні й поверхневі води. В цьому випадку основні загрози полягають в наступному:

- Контамінація водних об'єктів. Шахтні та дренажні води можуть містити підвищені концентрації сульфатів, хлоридів, солей, радіонуклідів і токсичних металів, які поширюються за межі ПМТ.

- Небезпека зберігання відходів у хвостосховищах. Сховища рідких і пастоподібних відходів є потенційними джерелами масштабних аварій. Порушення цілісності дамб може призвести до катастрофічного забруднення значних площ поверхневих та підземних вод.

- Пиління та газові викиди. Незарекультивовані ділянки, особливо сухі хвостосховища, активно продукують пил, що погіршує якість повітря. У випадку вугільних відвалів можливе самозаймання з викидом парникових газів і токсичних сполук.

Отже, екологічний стан ПМТ характеризується не одноразовим порушенням, а системою довготривалих процесів, що потребують постійного контролю та стратегічного управління.

Слід врахувати, що гірничодобувна діяльність спричиняє не лише фізичні й хімічні зміни середовища, а й глибоку трансформацію екосистем. Знищення природних біотопів (лісів, луків, водно-болотних угідь) веде до втрати місць існування багатьох видів, включно з рідкісними та ендемічними. Негативний вплив проявляється у повній втраті середовищ існування. Будівництво кар'єрів і відвалів зумовлює зникнення локальних екосистем. Великі промислові об'єкти розділяють природні території, ізолюючи популяції та ускладнюючи міграцію. Хімічне навантаження призводить до спрощення видового складу й домінування найбільш стійких видів.

Світова практика показує різні підходи до управління відновленням ПМТ, які можуть бути адаптовані для України. Наприклад у Німеччині (Рурський басейн) вугледобувний регіон пройшов комплексну трансформацію: держава інвестувала у диверсифікацію економіки, створення індустріальних парків, рекреаційних зон та наукових центрів на місці колишніх шахт [86]. Важливу роль відіграли регіональні агентства розвитку та спеціалізовані компанії, що забезпечували комплексну рекультивацію за участі державних та приватних коштів. Канада та Австралія демонструє важливість законодавчої чіткості, фінансових гарантій і інноваційного планування: у Канаді - фінансові гарантії (обов'язкове забезпечення повного покриття витрат на рекультивацію до початку видобутку), прогресивна рекультивація (відновлення територій поетапно під час роботи на окремих ділянках), наукова підтримка (використання наукових стандартів відновлення біорізноманіття та контролю водних ресурсів). В Австралії на шахті Sullivan (Британська Колумбія) після 92 років видобутку компанія Teck Resources провела

повну рекультивацію території видобування, перетворивши промисловий об'єкт на сонячну електростанцію та рекреаційну зону за рахунок існуючих програм стимулювання промисловості до того, щоб вона приділяла пріоритетну увагу рекультивації [87].

Спираючись на вищенаведене, за нашою думкою, структура організаційно-технологічної моделі управління екологічною стабільністю повинна включати чотири взаємопов'язані блоки (рис. 4.1).



Рис. 4.1 - Структура організаційно-технологічної моделі управління екологічною стабільністю

Аргументація до запропонованої організаційно-технологічної моделі управління екологічною стабільністю базується на найгостріших проблемах ПМП та системному поєднанні геоекологічних закономірностей, результатів проведеного нами інтегрального оцінювання IES (див. розд. 3) та принципів адаптивного управління техногенно трансформованими територіями.

Дотримуючись такої точки зору в дисертаційних дослідженнях запропоновано комплексну систему аргументації до запропонованої організаційно-технологічної моделі управління екологічною стабільністю, а саме:

1. **Системна аргументація.** Територія родовища після завершення видобутку функціонує як відкрита геосистема, у якій взаємодіють: геологічне середовище, гідрогеологічний режим, техногенні порушення та ландшафтні компоненти. Більш того, екологічна стабільність не є статичною величиною - вона формується у часі. Різні способи розробки (шахтний, кар'єрний, комбінований) формують різні стартові значення IES*, а отже - потребують різних механізмів управління.

2. **Геоекологічна аргументація** (специфічність родовища). Наприклад, для Полохівського родовища характерна висока тектонічна проникність, значна глибина гірничих робіт, довготривала депресійна лійка, ризик гідрогеохімічної міграції елементів. Це обґрунтовує необхідність постійного гідродинамічного контролю, поетапного затоплення виробок, тривалого моніторингу підземних вод. Тобто модель управління повинна бути гідрогеологічно орієнтованою.

Для Гуляйпільського родовища характерна менша глибина, помірна структурна порушеність, більша площа поверхневого впливу при кар'єрній технології розробки. Тоді ключовими стають: рекультивація, відновлення ґрунтового покриву, ландшафтна оптимізація. Отже, модель управління має ландшафтно-рекультиваційний характер.

3. **Технологічна аргументація.** Кожна технологічна операція (водовідлив, відвалоутворення, закладка виробок, затоплення) безпосередньо змінює компоненти K_{tect} , K_{hydro} , K_{ga} та ін. (в залежності від їх врахування).

Але, інтегральний критерій IES виступає в ролі кількісного індикатора

ефективності управлінських рішень або інструментом порівняння альтернатив. Він також може бути основою для сценарного прогнозування. Тобто, організаційно-технологічна модель дозволяє перейти від пасивного усунення наслідків до превентивного управління ризиками.

4. **Організаційна аргументація.** Створена в дисертаційному дослідженні модель передбачає поетапність управління (експлуатація - консервація - стабілізація – рекультивація), а також інтеграцію гірничих, екологічних та моніторингових служб. Залежно від динаміки I_{ES} можна створювати адаптивне коригування заходів. Таким чином, управління здійснюється не за формальною схемою, а на основі кількісного екологічного показника.

5. **Економіко-екологічна аргументація.** Ранні управлінські втручання зберігають вищий рівень I_{ES}^* та скорочують термін постмайнінгової стабілізації. Наприклад, підтримання інтегрального показника I_{ES}^* вище критичного рівня (0.6) мінімізує ризик вторинного забруднення, деградацію водоносних горизонтів, соціально-екологічні конфлікти. Таким чином, модель має не лише екологічне, а й економічне обґрунтування.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що аргументація до організаційно-технологічної моделі управління екологічною стабільністю ґрунтується на встановленій залежності інтегрального критерію I_{ES} від геолого-структурних, гідрогеологічних та ландшафтних чинників, а також на доведеній необхідності специфічного для родовища підходу до постмайнінгового відновлення території. Модель забезпечує кількісне обґрунтування управлінських рішень і в подальшому дозволить прогнозувати динаміку екологічної рівноваги в часі.

Такий підхід дозволяє поєднати інженерну безпеку з відновленням екосистемних функцій.

Кінцевою метою управління постмайнінговими територіями є не лише відтворення природного середовища, а й їхнє повторне залучення до господарського обігу - редевелопмент. Відновлені землі можуть суттєво зростати у вартості порівняно з деградованими промисловими площами. Сучасний підхід

передбачає поєднання економічної доцільності з екологічною відповідальністю. «Зелений редевелопмент» базується на принципах ESG та орієнтований на довгострокову стійкість.

Його інструменти включають біоінженерні технології, зокрема фіторемедіацію для очищення ґрунтів. Відновлення екосистемних послуг (регулювання водного балансу, очищення повітря), які мають економічно вимірювану цінність. Важливою умовою успіху є раннє планування: концепція подальшого використання території повинна закладатися ще на стадії проектування видобутку. Такий підхід знижує витрати на завершальну рекультивацію та підвищує ефективність інвестицій.

Отже, ефективний редевелопмент ПМТ здатний трансформувати екологічний виклик у ресурс сталого регіонального розвитку, поєднуючи екологічну безпеку з економічною вигодою.

Для успішного відновлення постмайнінгових територій (ПМТ) необхідно впроваджувати комплексні управлінські підходи, які передбачають координацію дій різних зацікавлених сторін і чітке розмежування обов'язків. Організаційно-управлінські моделі визначають, як планується, фінансується та реалізується процес відновлення, а також забезпечують довгострокову ефективність екологічних і соціальних результатів.

Держава відіграє центральну роль у створенні законодавчої бази та стратегічному плануванні відновлення ПМТ. Основні функції включають законодавче регулювання - встановлення обов'язкових норм рекультивації, стандартів якості довкілля та процедур отримання дозволів на видобуток із включенням умов подальшого відновлення; контроль та нагляд - перевірка дотримання екологічних вимог і виконання рекультиваційних планів гірничодобувними підприємствами; стратегічне планування - визначення пріоритетних ПМТ для відновлення, залучення інвестицій у масштабні проєкти, створення державних програм підтримки; фонди рекультивації - формування спеціальних фондів за рахунок відрахувань гірничодобувних компаній для гарантії наявності фінансування навіть у випадку банкрутства; координація - співпраця між

міністерствами (екології, енергетики, регіонального розвитку), науковими установами та громадськими організаціями; фінансові стимули - надання податкових пільг та підтримка компаній, що впроваджують «зелені» технології і повну рекультивацію.

Без достатнього фінансового забезпечення організаційні моделі відновлення не будуть ефективними. Економічні інструменти стимулюють гірничодобувні компанії до відповідальної поведінки та гарантують стаке фінансування рекультиваційних робіт. В ролі економічних інструментів виступають екологічні податки, «зелені» облігації та фонди рекультивації.

Наприклад, фонди рекультивації (ФР) можуть сконцентрувати обов'язкові внески компаній у спеціальні фонди для покриття витрат на відновлення після закриття об'єкта. В такому випадку, повинна бути гарантія фінансування (навіть у випадку банкрутства підприємства), що особливо актуально для старих ПМТ.

Екологічні податки (оплата за викиди, скиди та відходи) повинні стимулювати інвестиції у чисті технології та мінімізацію впливу на довкілля.

«Зелені» облігації (залучення капіталу для фінансування екологічних проєктів, зокрема рекультивації ПМТ) повинні використовувати приватні і державні інвестиції для створення індустріальних, аграрних або рекреаційних зон.

Існує багато міжнародних фінансових інституцій (ЄБРР, Світовий банк, ЄІБ) які треба залучати до інвестування. Вони завжди вимагають дотримання ESG-стандартів, що стимулює прозорість і застосування НДТ.

Окреме направлення в інвестуванні – це механізми державно-приватного партнерства, які дозволяють ефективно вирішувати проблему занедбаних ПМТ. Це може бути передача ПМТ для відновлення. В такому випадку приватні інвестори отримують право на економічне використання території після повної рекультивації. Можна використовувати економічний стимул, наприклад, витрати на рекультивацію покриваються майбутньою вигодою від використання землі. Ще один дієвий спосіб залучення інвестицій - спільні проєкти з точки зору поєднання екологічного відновлення з регіональним розвитком та соціальною інфраструктурою. Тобто, впровадження економічних та фінансових механізмів

перетворює екологічні зобов'язання на інвестиції у майбутнє використання територій.

Дуже важливою складовою в питанні постмайнінгу є місцеве населення, яке безпосередньо зацікавлене в результатах рекультивації. Тому його участь критично важлива у залучення до планування і обговоренні планів відновлення та визначення майбутнього використання територій (сільське господарство, рекреація, лісові насадження). Окрема складова - громадський контроль та моніторинг виконання робіт та дотримання екологічних стандартів.

Саме тому, особливу роль слід надати адвокації, тобто представленні інтересів населення (вимога компенсацій за збитки та забезпечення якісного відновлення).

4.2. Роль адвокації у формуванні екологічно стабільних постмайнінгових територій

У межах спеціальності 183 адвокація розглядається не як політичний інструмент, а як організаційно-управлінський механізм забезпечення екологічної безпеки та впровадження науково обґрунтованих технологій відновлення. Саме тому, адвокація у постмайнінгу – це системна діяльність заінтересованих сторін (громади, науковців, органів влади, підприємств), яка спрямована на забезпечення дотримання екологічного законодавства, впровадження технологій мінімізації негативного впливу, формування довгострокової стратегії відновлення території, контроль виконання програм ліквідації та рекультивації.

Аргументація ролі адвокації базується на чинному законодавстві України, як нормативно-правової основи. Це ЗУ «Про охорону навколишнього природного середовища» (ст. 9 – право громадян на участь у прийнятті екологічно значущих рішень), [88], ЗУ «Про оцінку впливу на довкілля» (обов'язкові громадські обговорення, публічність матеріалів) [89], ЗУ «Про стратегічну екологічну оцінку» (оцінка програм розвитку територій, включаючи постмайнінгові) [90], Кодекс України про надра (ст. 24 – обов'язок надрокористувача щодо рекультивації земель) [91], Гірничий закон України (ліквідація гірничих підприємств, екологічна безпека) [92], Земельний кодекс України (земельне та рекультиваційне регулювання) [93], Постанова КМУ № 35 «Про затвердження Порядку консервації

земель» [94, 95]. Ці документи визначають обов'язковість рекультивації та можливість громадського контролю.

Спираючись на ЗУ, саме адвокація виступає як інструмент екологічної стабілізації та в умовах постмайнінгу виконує превентивну, контрольну та інтеграційну функції. Превентивна функція, в дисертаційному дослідженні стосується впливу на вибір технології розробки (шахтна, кар'єрна, комбінована), обґрунтування вимог до проєктів ліквідації та наполягання на впровадженні прогресивної рекультивації. Це безпосередньо впливає на стартове значення інтегрального критерію IES*.

Контрольна функція – це моніторинг виконання умов оцінки впливу на довкілля (ОВД), контроль водовідливу або якості підземних вод, контроль формування відвалів та техногенного рельєфу. Для територій з високою гідрогеологічною чутливістю (зокрема Полохівське родовище) контрольна роль адвокації є критичною.

Інтеграційна функція - забезпечення координації між надрокористувачем, органами місцевого самоврядування, екологічними службами та науковими установами. Для територій із переважно ландшафтною трансформацією (наприклад Гуляйпільське родовище) це дозволяє формувати альтернативні сценарії постмайнінгового використання.

Таким чином, адвокація у постмайнінгу виступає інституційним механізмом реалізації екологічного законодавства. Більш того, це інструмент підвищення екологічної відповідальності надрокористувача та фактор стабілізації геоекологічної системи через вплив на технологічні та управлінські рішення. Адвокація є засобом забезпечення прозорості та довгострокового моніторингу відновлення території. Саме тому, у межах спеціальності 183– «Технології захисту навколишнього середовища», роль адвокації полягає у забезпеченні впровадження технологій екологічного захисту та підтриманні інтегрального показника екологічної стабільності на рівні, що гарантує безпечне функціонування постмайнінгової території.

4.3. Механізм моніторингу та прогнозування змін екосистем у постмайнінговий період

Постмайнінг розглядається як завершальний, але довготривалий етап життєвого циклу родовища, що охоплює ліквідацію гірничих виробок, рекультивацію, відновлення гідрогеологічного режиму, соціально-економічну трансформацію території та моніторинг екологічної стабільності. У зв'язку з цим формується необхідність створення інтегрованого механізму моніторингу та прогнозування змін екосистем, який забезпечує контроль динаміки природно-техногенної системи та підтримання інтегрального показника екологічної збалансованості I_{ES} .

Механізм моніторингу базується на вимогах ЗУ «Про охорону навколишнього природного середовища» (ст. 22 – державний моніторинг довкілля) [88], ЗУ «Про оцінку впливу на довкілля» (післяпроектний моніторинг) [89], Кодексу України про надра (обов'язок ліквідації та екологічної безпеки) [91], Постанови КМУ № 391 «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» [95]. Тобто, моніторинг у постмайнінговий період є не рекомендаційним, а обов'язковим елементом управління територією.

Особливу увагу необхідно приділяти структурі механізму моніторингу, який, в дисертаційних дослідженнях, складається з п'яти функціональних блоків:

1. Геологічний та геодинамічний моніторинг - контроль стану виробок; осідання земної поверхні; стабільність бортів кар'єрів; активність тектонічних порушень.
2. Гідрогеологічний моніторинг - рівні підземних вод; радіус депресійної лійки; мінералізація та хімічний склад вод; міграція літію та супутніх елементів.
3. Ґрунтово-ландшафтний моніторинг - якість рекультивованих ґрунтів; ступінь ерозійних процесів; формування техногенного рельєфу.
4. Біоекологічний моніторинг - відновлення рослинності; індекси біорізноманіття; інвазійні види.
5. Соціально-екологічний моніторинг - якість питної води; санітарний стан території; екологічні ризики для населення.

Моніторингові показники нормуються в інтервалі 0–1 та можуть бути інтегровані в узагальнений критерій I_{ES} з врахуванням часу. Таким чином, моніторинг переходить від фрагментарного спостереження до кількісної оцінки стану екосистеми. Вони можуть бути задіяні в прогнозуванні змін екосистем. Результати прогнозування вже інтегруються в систему управління за принципом зворотного зв'язку, тобто, виявлення відхилень показників або коригування технологічних рішень. В таких випадках доцільним буде повторна оцінка інтегрального критерію I_{ES} або оновлення сценарію розвитку території. Такий підхід відповідає сучасній концепції адаптивного екологічного менеджменту.

Запропонований механізм моніторингу та прогнозування з врахуванням отриманих під час моніторингу даних, забезпечує системний контроль трансформації екосистем у постмайнінговий період, дозволяє кількісно оцінювати рівень екологічної стабільності, інтегрує правові вимоги, технологічні рішення та наукове моделювання, формує основу для довгострокового екологічно безпечного розвитку території.

Висновок до розділу 4

У розділі обґрунтовано, що постмайнінг є не завершенням впливу гірничодобувної діяльності, а фазою довготривалої трансформації природно-техногенної системи, у межах якої формується новий стан екологічної рівноваги. Екологічна стабільність території визначається поєднанням геолого-структурних, гідрогеологічних, геохімічних та ландшафтних чинників, встановлених у попередніх розділах дослідження.

Розроблено організаційно-технологічну модель управління екологічною стабільністю ПМТ, що базується на принципах превентивності, адаптивності, інтеграції природних параметрів, поєднання технічної й біологічної рекультивації та фінансової гарантованості. Доведено, що управління повинно здійснюватися з урахуванням специфіки родовища та способу його розробки, оскільки стартові значення інтегрального критерію I_{ES}^* формують різні сценарії постмайнінгової стабілізації.

Показано, що геоекологічні особливості конкретних об'єктів зумовлюють диференційований характер управління:

- для Полохівського родовища – гідрогеологічно орієнтована модель з акцентом на контроль депресійної лійки, поетапне затоплення та довготривалий моніторинг підземних вод;
- для Гуляйпільського родовища – ландшафтно-рекультивацийна модель з пріоритетом відновлення ґрунтів, стабілізації техногенного рельєфу та біоекологічної реконструкції.

Інтегральний критерій екологічної стабільності I_{ES} обґрунтовано як кількісний індикатор ефективності управлінських рішень. Його використання дозволяє порівнювати альтернативні технологічні сценарії, оцінювати динаміку стабілізації території, визначати критичні порогові значення, формувати адаптивну модель управління на основі зворотного зв'язку.

Встановлено, що екологічні проблеми ПМТ мають системний характер і охоплюють деградацію ґрунтів, порушення гідрогеологічного балансу, техногенну трансформацію ландшафтів, втрату біорізноманіття та соціально-екологічні ризики. Їх подолання можливе лише за умови комплексного поєднання інженерних, біологічних, організаційних та економічних механізмів.

Доведено, що адвокація виступає інституційним елементом забезпечення екологічної стабільності, виконуючи превентивну, контрольну та інтеграційну функції. У межах спеціальності 183 – «Технології захисту навколишнього середовища», вона розглядається як управлінський механізм реалізації екологічного законодавства та впровадження науково обґрунтованих технологій рекультивациі, що сприяє підтриманню інтегрального показника I_{ES} на безпечному рівні.

Запропоновано механізм моніторингу та прогнозування змін екосистем, який включає п'ять функціональних блоків (геологічний, гідрогеологічний, ґрунтово-ландшафтний, біоекологічний, соціально-екологічний) та інтегрується з кількісною оцінкою екологічної стабільності. Такий підхід забезпечує перехід від фрагментарного контролю до системного управління природно-техногенною

системою.

Обґрунтовано доцільність впровадження економічних інструментів (фонди рекультивації, екологічні податки, «зелені» облігації, державно-приватне партнерство), які трансформують екологічні зобов'язання у довгострокові інвестиції та сприяють реалізації концепції «зеленого редевелопменту».

Узагальнено, що запропонований механізм забезпечення екологічної рівноваги у постмайнінговий період дозволяє інтегрувати природні передумови території з технологічними рішеннями; мінімізувати довгострокові екологічні ризики; підвищити економічну ефективність відновлення; забезпечити науково обґрунтоване прогнозування динаміки екосистем.

Отже, сформована в розділі концепція постмайнінгового управління є системною моделлю забезпечення екологічної рівноваги, що поєднує геоекологічний аналіз, інтегральне оцінювання, адаптивний моніторинг та економіко-організаційні механізми, забезпечуючи довгострокову стабілізацію техногенно трансформованих територій.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене вирішення наукової задачі розроблення науково обґрунтованого механізму формування та управління екологічною збалансованістю територій при розробці родовищ корисних копалин (шахтною, кар'єрною та змішаною технологіями розробки) і в постмайнінговий період на основі інтегрального критерію екологічної стабільності з урахуванням геометричних, гідрогеологічних, геохімічних та тектонічних чинників (на прикладі Полохівського та Гуляйпільського родовищ літію). Сформульовано наукову проблему, яка полягає у створенні комплексної системи формування еколого-збалансованої території в умовах розробки родовищ корисних копалин із застосуванням інноваційних технологій екологізації виробництва.

За результатами проведеного дослідження

Вперше:

- розроблено природно-геологічну модель екологічної рівноваги території Полохівського родовища, у якій тектонічна будова, геометрія крутопадаючих пегматитових тіл, геохімічна спеціалізація та гідрогеологічні умови розглядаються як єдина просторово взаємопов'язана система.

- обґрунтовано роль глибинних розломів і зон концентрованих деформацій як факторів екологічної проникності середовища, що визначають потенційні канали міграції флюїдів і рухомих форм елементів та впливають на стійкість геоекологічної системи.

- встановлено закономірності просторової організації природних геохімічних ореолів для Li-спеціалізованої пегматитової системи (осьова та поперечна зональність, орієнтація за напрямками розломів), що дозволило сформувати базову модель доексплуатаційного стану території.

- сформовано кількісну основу визначення місцевого геохімічного фону для родовища літію шляхом статистичного аналізу (логнормальний розподіл, кореляційні асоціації елементів), що забезпечує відокремлення природних аномалій від потенційних техногенних.

- для умов Гуляйпільського родовища виконано просторове (3D) моделювання кінцевого контуру кар'єру з урахуванням геолого-тектонічної будови та варіантів відкритої й комбінованої систем розробки, що дозволило кількісно оцінити масштаб техногенного навантаження та екологічну стабільність.

- обґрунтовано концепцію екологічної рівноваги гірничопромислової території як функції тектонічної порушеності масиву та геохімічної активності порід, що дозволяє перейти від статичної оцінки впливу до структурно-динамічної моделі формування техногенно змінених геосистем.

- запропоновано кількісні індикатори тектонічної та геохімічної дестабілізації, зокрема: коефіцієнт тектонічної порушеності, індекс геохімічної рівноваги, індекс гідрогеохімічної трансформації, які інтегруються до загального інтегрального критерію екологічної збалансованості гірничого підприємства.

- розроблено підхід до врахування тектонічних структур у виборі технології розробки (відкрита / комбінована схема) шляхом оцінки просторового перетину активних зон з кінцевим контуром кар'єру, що дозволяє мінімізувати гідродинамічну та геохімічну дестабілізацію території.

- для умов Гуляйпільського родовища розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності комбінованої системи розробки. Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри. Доведено, що перехід на змішану систему дозволяє зменшити сукупне екологічне навантаження на 50%. Слід зауважити, що інтегральний критерій дозволив кількісно оцінити екологічну ефективність технологічних схем 1 і 2 та показав, що перехід до змішаної системи розробки (другий сценарій) підвищує екологічну збалансованість території.

- для умов Полохівського родовища розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності шахтної системи розробки та визначено, що територія розробки буде мати показник інтегрального критерію екологічної збалансованості на рівні 0.763, що характеризує відносну екологічну стабільність але з підвищеним геохімічним та тектонічним потенціалом дестабілізації.

- визначено, що територія розробки Гуляйпільського родовища при

впровадженні технології комбінованої системи розробки буде мати показник інтегрального критерію екологічної збалансованості на рівні 0,71 при глибині кар'єру до 400 м та глибше шахтна розробка.

- показано, що геоекологічні особливості конкретних об'єктів зумовлюють диференційований характер управління:

- для Полохівського родовища – гідрогеологічно орієнтована модель з акцентом на контроль депресійної лійки, поетапне затоплення та довготривалий моніторинг підземних вод;

- для Гуляйпільського родовища – ландшафтно-рекультивацийна модель з пріоритетом відновлення ґрунтів, стабілізації техногенного рельєфу та біоекологічної реконструкції.

- інтегральний критерій екологічної стабільності I_{ES} обґрунтовано як кількісний індикатор ефективності управлінських рішень. Його використання дозволяє порівнювати альтернативні технологічні сценарії, оцінювати динаміку стабілізації території, визначати критичні порогові значення, формувати адаптивну модель управління на основі зворотного зв'язку.

Удосконалено:

- методичний підхід до інтеграції геолого-структурних і геохімічних чинників у систему екологічної оцінки території, де природні параметри (тектонічна проникність, фонові геохімічна структура, гідрогеоморфологічні особливості) формують базові коефіцієнти інтегрального показника екологічної збалансованості.

- підхід до визначення структурно-тектонічного коефіцієнта стабільності та коефіцієнта геохімічної стійкості як складових інтегрального екологічного критерію, що враховують природні передумови трансформації території при освоєнні надр.

- підхід до оцінки просторових екологічних обмежень при розробці крутопадаючих покладів залізистих кварцитів шляхом інтеграції геометричних параметрів кар'єру (глибина, кути укосу, протяжність покладу) з екологічними

показниками порушення ландшафту та гідродинамічної рівноваги території.

- методику оцінювання техногенно трансформованих ландшафтів шляхом поєднання морфометричних, гідрологічних, ґрунтових та біоіндикаторних параметрів у математичних моделях.

- методологію оцінювання екологічної збалансованості гірничодобувних територій за рахунок включення параметрів структурної неоднорідності масиву, показників міграційної здатності хімічних елементів, взаємозв'язку між коефіцієнтом фільтрації тріщинних зон та масштабами депресійної лійки.

- що запропонований механізм забезпечення екологічної рівноваги у постмайнінговий період дозволяє інтегрувати природні передумови території з технологічними рішеннями; мінімізувати довгострокові екологічні ризики; підвищити економічну ефективність відновлення; забезпечити науково обґрунтоване прогнозування динаміки екосистем.

Набули подальшого розвитку:

- теоретичне положення про необхідність розгляду родовища як динамічної геолого-геохімічної системи, в якій екологічна рівновага визначається взаємодією тектонічного каркасу, літологічної будови, гідрогеологічного режиму та природного геохімічного фону.

- концепція врахування природного стану території як базової точки відліку для прогнозування екологічних наслідків вибору способу розробки (шахтного, кар'єрного або комбінованого).

- положення про необхідність застосування інтегрованого геоекологічного аналізу на стадії проектування гірничих робіт, де 3D-моделювання розглядається як інструмент для подальшого прогнозування просторових екологічних наслідків.

- теоретичне положення про залежність рівня екологічної рівноваги від глибини розробки в умовах складчастих структур із крутим падінням крил.

- обґрунтування доцільності комбінованої схеми «кар'єр + шахта» як механізму зменшення площі перетину тектонічно активних зон, площі контакту окиснювального фронту, інтенсивності гідрогеохімічної трансформації.

- методичний підхід до врахування гідрогеологічного фактору при виборі

способу розробки родовища, зокрема через оцінку очікуваного водоприпливу, формування депресійної лійки та зміни напрямків підземного і поверхневого стоку.

Доведено:

- що технологія розробки родовища визначає масштаби та інтенсивність екологічного навантаження.

- що існуючі технологічні та природоохоронні рішення спрямовані переважно на мінімізацію окремих видів впливу (мають переважно компонентний характер) та не забезпечують комплексного управління екосистемною трансформацією територій.

- відсутність інтегрованої методики просторово-часової оцінки екологічного стану території родовища з урахуванням інженерно-технологічних параметрів видобутку.

- вплив глибини кар'єру на масштаби просторової трансформації території, доведено, що при глибині 600 м збільшення довжини та ширини кар'єру по поверхні суттєво перевищує розміри оконтурених покладів, що формує непропорційно більший техногенний вплив порівняно з обсягами видобутку.

- що екологічна рівновага гірничопромислової території формується як інтегрований результат взаємодії геометричних параметрів розробки, тектонічної структури масиву та геохімічної активності порід, а врахування цих чинників у виборі технології видобутку забезпечує підвищення інтегрального показника екологічної збалансованості на етапах експлуатації та рекультивації.

- що для глибинних літєвих родовищ кристалічного фундаменту інтегральний критерій екологічної збалансованості повинен мати тектонічно-гідрогеохімічну домінанту, що принципово відрізняє їх від кар'єрних залізрудних об'єктів.

- що адвокація виступає інституційним елементом забезпечення екологічної стабільності, виконуючи превентивну, контрольну та інтеграційну функції. У межах спеціальності 183 – «Технології захисту навколишнього середовища», вона розглядається як управлінський механізм реалізації екологічного законодавства та впровадження науково обґрунтованих технологій рекультивації, що сприяє

підтриманню інтегрального показника I_{ES} на безпечному рівні.

Обґрунтовано:

- необхідність формування інтегрального підходу до оцінювання екологічної збалансованості території, де просторово-часове моделювання виступає інструментом кількісного аналізу та прогнозування змін геосистем.

- екологічну доцільність переходу від повністю відкритої до комбінованої системи видобутку (відкритий спосіб до 400–500 м із подальшим переходом на підземний), що забезпечує зменшення площі порушених земель, скорочення депресійної лійки та зниження ризиків геомеханічної нестійкості бортів.

- що постмайнінг є не завершенням впливу гірничодобувної діяльності, а фазою довготривалої трансформації природно-техногенної системи, у межах якої формується новий стан екологічної рівноваги. Екологічна стабільність території визначається поєднанням геолого-структурних, гідрогеологічних, геохімічних та ландшафтних чинників, встановлених у попередніх розділах дослідження.

- що екологічні проблеми ПМТ мають системний характер і охоплюють деградацію ґрунтів, порушення гідрогеологічного балансу, техногенну трансформацію ландшафтів, втрату біорізноманіття та соціально-екологічні ризики. Їх подолання можливе лише за умови комплексного поєднання інженерних, біологічних, організаційних та економічних механізмів.

- доцільність впровадження економічних інструментів (фонди рекультивації, екологічні податки, «зелені» облігації, державно-приватне партнерство), які трансформують екологічні зобов'язання у довгострокові інвестиції та сприяють реалізації концепції «зеленого редевелопменту».

Запропоновано:

- механізм моніторингу та прогнозування змін екосистем, який включає п'ять функціональних блоків (геологічний, гідрогеологічний, ґрунтово-ландшафтний, біоекологічний, соціально-екологічний) та інтегрується з кількісною оцінкою екологічної стабільності. Такий підхід забезпечує перехід від фрагментарного контролю до системного управління природно-техногенною системою.

- організаційно-технологічну модель управління екологічною стабільністю

ПМТ, що базується на принципах превентивності, адаптивності, інтеграції природних параметрів, поєднання технічної й біологічної рекультивації та фінансової гарантованості. Доведено, що управління повинно здійснюватися з урахуванням специфіки родовища та способу його розробки, оскільки стартові значення інтегрального критерію I_{ES}^* формують різні сценарії постмайнінгової стабілізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Uzair Akbar Khan, Katharina Kujala, Soile P. Nieminen, Marja Lisa Räisänen, Anna Kaisa Ronkanen Arsenic, antimony, and nickel leaching from northern peatlands treating mining influenced water in cold climate. Science of The Total Environment, V. 657, 2019. – P. 1161-1172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.455>
2. Kauppila, Tommi & Kauppila, Päivi & Räisänen, M.L. & Makkonen. Summary: Good practices in assessment of the environmental impacts of mining projects. Espoo 2015. – 141 p
3. Дриженко А.Ю. Відкриті гірничі роботи. М-во освіти і науки України, Нац. гірничий унт – Д.: НГУ, 2014. – 590 с.
4. Коржнев М.М., Міщенко В.С., Шестопапов В.М., Яковлев Є.О. Концептуальні основи поліпшення стану довкілля гірничовидобувних регіонів України. Київ: РВПС України, 2000. – 75 с
5. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Касьяненко Д.Л. Визначення впливу ймовірного технологічного чиннику видобування залізрудних покладів на зміни еколого-гідрологічного середовища. Екологічна безпека та технології захисту довкілля, № 6, 2024 – С. 38-49. <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-05>
6. Рудько Г.І, Бондар О.І. Макроекологія України. Монографія. Київ-Черновці: «Букрек», 2020. – 520 с
7. Іванов Є.А., Сивий М. Я. Проблеми раціонального використання гірничопромислових відходів у контексті сталого розвитку регіонів України. Дорожня карта реалізації Закону України «Про управління відходами» : збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Київ, 24 – 25 листопада 2022 рік р.). – К. : Центр екологічної освіти та інформація, 2022. – С. 158-162.
8. Евтехов В. Д., Техногенные месторождения: от использования имеющихся – к созданию более совершенных. Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету. – 2001

9. Зигун А.Ю. Використання світового досвіду системи управління відходами / А. Ю. Зигун // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 697

10. Державна служба статистики України. Статистичний щорічник України за 2018 рік. Електронний ресурс URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/11/zb_yearbook_2018.pdf

11. Бітюцька Л.М., Остафійчук Н.М. Огляд світової практики з архітектурно-планувальної організації рекреаційних просторів на територіях порушених гірничими виробками. Матеріали Всеукраїнської наукової on-line конференції «Сучасні проблеми екології» ДУ «Житомирська політехніка», 2023. 228 с. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/hirnytstvo.pdf>

12. Кучеров К.І., Овчиннікова Н.Б. Сучасні проблеми екологічної безпеки функціонування гірничо-збагачувальних комбінатів та їх впливу на оточуюче природне середовище. Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, 2009, № 849. – С.90-96

13. Ремизов В.И., Касьяненко В.В. Особливості екологічної ситуації Криворізького району Дніпропетровської області. Екологія, техногенна безпека і соціальний прогрес. Вісник ХІСП, 2001. – вип. 1. – С. 151-156

14. Назаренко І.І., Польчина С.М., Нікорич В.А. Грунтознавство. – Чернівці: Книги – ХХІ, 2008. – 400 с.

15. Рудько Г.І., Бондар О.І. Макроекологія України. Київ-Чернівці: Букрек, 2020. – 520 с

16. Олейніков Л.М. Геоморфологічні наслідки гірничодобувної діяльності. Науковий вісник географії, 12(3), 2013, С. 45–58.

17. Трубчанінов О.В., Коваленко І.С., Бондар О.І. Ерозійні процеси на техногенних схилах гірничих регіонів України. Географія та екологія, 20(4), 2018, С. 78–92.

18. Яковлев В.М. Техногенні форми рельєфу та їх морфометричні характеристики. Вісник геології та гірництва, 8(1), 2016, С102–114.

19. Рудько Г.І. Вплив кар'єрного видобутку на ландшафтні системи України:

монографія. Київ: Наукова думка, 2019

20. Міжнародна рада з гірничодобувної промисловості та металургії (ICMM). Stakeholder Newsletter: April 2023. URL: <https://www.icmm.com/en-gb/news/2023/newsletter-april>

21. Малишева Л.Л., Шищенко П.Г., Потапенко В.Г. Принципи і методи геоекологічного районування території України. Вісник Київського ун-ту. Серія Географія. – 1995. – вип.41, С. 3-13

22. Гродзинський М.Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. – К.: Лікей, 1995. – 223 с

23. Бондар О.І., Унгурян П.Я., Сухіна О.М., Улицький О.А. Екологізація гірничодобувного виробництва: рентні відносини: монографія. Одеса: «Олді-Плюс», 2025. – 300 с.

24. Адаменко О.М. Наш майбутній дім – Екоєвропа. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2007. – 428 с.

25. Боков В.А., Лущик А.В. Основи екологічної безпеки: навч. посібник (для студентів вищих навчальних закладів). Симферопіль: Сонат, 1998. – 224 с

26. Палієнко В.П. Барщевський М.Є., Вахрушев Б.О., Кравчук Я.С. та ін. Загальне геоморфологічне районування території України. Український географічний журнал, №1, 2004.– С. 3-11.

27. Міллер Г.П. Ландшафтознавство: теорія і практика /Г.П. Міллер, В.М. Петлін, А.В. Мельник. – Львів: видавнич. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2002. – 172 с.,

28. Гуцуляк В.М. Ландшафтно-геохімічна екологія: навчальний посібник [для студ. вищих навч. закл.]. Чернівці: Рута, 1995. – 317 с

29. Шкатула Ю.М., Кравчук Г.І. Практикум з ландшафтної екології. – Вінниця: ОЦ ВНАУ, - 2012. – 125 с.

30. ЗУ «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» ВВР, 2019, № 16, ст.70 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>

31. Peter Morris, Riki Therivel, Riki Therivel, Graham Wood. Methods of Environmental and Social Impact Assessment, 4th Edition, 2017. Pub. Location New York. 740 p. URL: <https://doi.org/10.4324/9781315626932>
32. Chang J., Hu T., Liu X., Ren X.. Construction of green infrastructure in coal-resource based city: a case study in Xuzhou urban area. Int J Coal Sci Technol, 2018. № 5(1). P.92–104, URL: <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0191-8>,
33. Lèbre Glen É., Corder D., Golev A. Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. Minerals Engineering, 2017. V. 107. P. 34-42
34. Karlheinz Spitz, John Trudinger. Mining and the environment: from ore to metal. 2nd edition. CRC Press: London, 2019. 812 p URL: <https://doi.org/10.1201/9781351183666>
35. A survey perspective – prominent hill mine. 2011. – 19 p. URL: https://www.minesurveyors.com.au/files/2011Conference/A_Survey_Perspective-Prominent_Hill_Mine.pdf
36. Vale Base metals complete Voisey's Bay transition to underground mining. 2024. URL: <https://vale.com/w/vale-base-metals-complete-voisey-s-bay-transition-to-underground-mining>
37. Хоменко О.Є., Кононенко М.М., Савченко М.В. Технологія підземної розробки рудних родовищ: підручник. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 450 с.
38. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Письменний С.В., Федько М.Б., О.В. Калініченко. Розкриття, підготовка та комбінована розробка родовищ: підручник. Кривий Ріг : Сінельников Д.А., 2018. 135 с
39. Касьяненко Д.Л., Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Роль технологічних чинників видобування залізрудних покладів на зміни еколого-гідрогеологічного середовища. Матеріали 9 міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». м. Львів, 7-11 жовтня 2024 р. С. 463-468. https://conf.dkz.gov.ua/files/2024_materials_net.pdf

40. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Касьяненко Д.Л. Збалансований підхід до видобутку залізних руд Гуляйпільського родовища в сучасних умовах. Екологічні науки, 5(50), 2023. С. 54-60. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.8>

41. Stakeholder Newsletter: April 2023. URL: <https://www.icmm.com/en-gb/news/2023/newsletter-april>

42. ДНВП «Геоінформ України»

43. Рішення Ради національної безпеки і оборони України «Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави» від 16 липня 2021 року. № 306/2021. Введений в дію 27.07.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0046525-21#Text>.

44. Kryl A. The future of trade of Ukraine and the European Union opportunities and prospects. Ukraine's Future Summit, 18 april 2024. URL: <https://ebsummits.eu/our-summits/future-of-ukraine/2024/programme/>

45. Бернська конвенція про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Конвенція_про_охорону_дикої_флори_та_фауни_і_природних_середовищ_існування_в_Європі

46. Офіційний сайт «Мапа Смарагдової мережі» [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL <http://emerald.net.ua/>.

47. Peter Morris, Riki Therivel, Riki Therivel, Graham Wood. Methods of Environmental and Social Impact Assessment, 4th Edition, 2017. Pub. Location New York. 740 p. <https://doi.org/10.4324/9781315626932>

48. Report. Polokhivske JORC Resource Estimate Limited Liability Company Ukritithiummining. AMC Progject, 2021. 92 p.

49. Офіційний сайт Державної служби геології та надр України. Гуляйпільське родовище. URL: <https://surl.li/oehfcl>

50. Каталенец А.И., Пирогова В.В. О метасоматозе на Гуляйпольском месторождении. В кн. Минералогия рудных месторождений Украины. К.: Наук. думка, 1984. С. 149-159

51. Каталенец О.І., Качанов Є.М., Кривонос В.П., Могилевец І.І. Структури залізорудних полів та родовищ Приазов'я. Изв. вищ. навч. закладів. Геологія та розвідка. 1986. № 12. С. 28-39
52. Кочанов Є.М., Крилов О.М. Звіт про детальну розвідку Західного крила Гуляйпільського родовища залістистих кварцитів, 1981-1985 рр. Кн.1-3. Білозерська ГРЕ ВГО «Південьгеологія. 707 с.
53. Мусін О.Р. Цифрові моделі для ГІС. Інформаційний бюлетень ГІС-Асоціація. 1998. № 4 (16). С. 3
54. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Касьяненко Д.Л. Впливу технологічних чинників видобутку залізної руди на гідрологічні та екологічні умови. Екологічна безпека та технології захисту довкілля, № 6, 2024 – С. 38-49.
<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-05>
55. Ulf Linder. Mining and Construction - Special Innovations: RCS, Atlas Copco Rock Drills AB, SE-701 91 Örebro, Sweden. – 2011 - №1, - С. 20-22
56. Geo-kraton limited Liability Company, (2020), Report on the results of exploration within the Polokhiv petalite lithium ores deposit in the Mala Vyska district, Kirovohrad region for 2019-2020, translated from Ukrainian, 225 p
57. Калашник А.А. Глибинні чинники формування великих промислових родовищ літію у рідкіснометальних пегматитах Шполян-Ташлицького рудного району Українського щита. Стаття 1. Основні фізико-хімічні властивості елементів парагенези руд у редкометальних пегматитах Шполян-Ташлицького рудного району та геохімічна характеристика метасоматитів. Мінеральні ресурси України, № 2, 2015. С. 13-21.
58. Stepchenko V. N., Rodna V. A., Bagryantsev V. A., Shel V.A., Komsulov H. B. The use of the method of radio-thermal imaging technology to search for lithium ore deposits. S World Journal, Issue 9, Part 1 P. 143-153. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-09-01-006
59. Bakarzhiev A. Kh., Makivchuk O.F., Popov N.I. Creation of the uranium mineral resource base in Ukraine. Exploration and protection of mineral resources. 2005, №10, P. 50-58

60. Report. Polokhivske JORC Resource Estimate Limited Liability Company Ukritithiummining. AMC Progect, 2021. 92 p

61. Ulytsky O., Diachenko N., Bezruchko K., Prikhodchenko S., Kasyanenko D. Evaluating the current state of the geological and geochemical system at the Polokhivsk lithium field. VI International Conference "Essays of Mining Science and Practice" (RMGET 2024). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1491 (2025) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012018>

62. Старостенко В.І., Казанський В.І., Попов М.І, Дрогицька Г.М та інші. Від поверхневих структур до інтегральної глибинної моделі Кіровоградського рудного району (УЩ). II. Геофізичний журнал № 5, Т.33 2011. – С. 3-16

63. Барташук О.В. Геодинамічні умови нафтогазоносності Дніпровсько-Донецького палеорифту. Дис. на здобут. наук. ступ. д. геол. н., спеціальність 04.00.01. – ХНУ ім. В. Н. Каразіна МОН України; ІГН НАНУ. – Київ, 2021. 291 с.

64. Осьмачко Л.С., Студзінська А.О., Уварова Т.В. Про структурну позицію рудних покладів Інгульського мегаблоку Українського щита. Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. - К. : ІГНС, 2016. – Вип. 26. - С. 129-140

65. Привалов В.О., Осьмачко Л.С., Пономаренко О.М. Геодинамічні умови формування структурно-речовинних комплексів докембрію Українського щита [моногр.]. - К. : Наукова думка, 2020. - 174 с

66. Нечаєв С. В., Гінтов О. Б., Мичак С. В. Про зв'язок рідкісноземельної, рідкіснометальної та золоторудної мінералізації з розломно-блоковою тектонікою Українського щита. Геофізичний журнал № 1, Т. 41, 2019. - С. 3-32. doi: 10.24028/gzh .0203-3100.v41il.20 19).1588.61

67. Жовинський Е.Я., Жук Є.А., Криченко Н.О., Бугаєнко В.М. Геохімічні асоціації хімічних елементів та їх пошукове значення (на прикладі Полохівського родовища літію). Пошукова та екологічна геохімія. № 1 (9), 2009 - С. 5-9

68. Kuzvart M., Bohmtr M. (1986). Geochemical prospecting methods. Developments in Economic Geology. V.21, P. 147-186 <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-99515-5.50013-2>

69. Hawkes H.E. (1957) Principles of geochemical prospecting. U.S. Government Printing Office. 136 p
70. Жовинський Е.Я., Курасва І.В. Геохімія важких металів у ґрунтах України. К.: Наукова думка, 2002. - 213 с
71. Жовинский Э.Я., Жук Е.А., Криченко Н.О., Бугаенко В.Н. Геохимические ассоциации химических элементов и их поисковое значение (на примере Полоховского месторождения лития). Пошукова та екологічна геохімія. № 1 (9), 2009 – С. 5-9
72. Єгоров І. Комплексні індикатори у соціально-економічних дослідженнях: переваги і недоліки. Університетські наукові записки, № 1-2 (85-86), 2022. С. 195-205. DOI 10.37491/UNZ.85-86.16
73. Кваско, А.В. Аналіз методів оцінки конкурентоспроможності підприємства. Наукові записки [Української академії друкарства], № 1(54), 2017.– С. 111–118. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23737>
74. Попова В.Л. Екодіагностика природно-господарської організації України: агроландшафтний аспект. Економіка і прогнозування. № 3, 2012. С. 92-101
75. Hsu, A., L.A. Johnson, and A. Lloyd. 2013. Measuring Progress: A Practical Guide From the Developers of the Environmental Performance Index (EPI). New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy. – 80 p. http://www.epi.yale.edu/sites/default/files/downloads/YCELP_Measuring_Progress_Manual.pdf
76. Emekwisia, Chukwudubem C., Ogunsiji, Taiwo O., Bauna, Faith K., Otsabomhe, Godfrey O., Akinbamilowo, Oladimeji O., Olagunju, Adewale R., Akagu, Emmanuel E. (2025).
77. Comparative Analysis of Environmental Impacts Associated with Surface and Underground Mining Operations. South Asian Res J Eng Tech, 7(4): 121-125 DOI: <https://doi.org/10.36346/sarjet.2025.v07i04.005>
78. Stupnik M., Kalinichenko V., Kalinichenko O., Shepel O, and Pochtarev A. Improvement of the transitional technology from open pit to underground mining of

magnetite quartzite. E3S Web of Conferences 526, 01026 (2024), SEP 2024. – 12 p.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601026>

79. Alina Kabata-Pendias. Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition 3rd Edition. CRC Press, 2000. 331 p
<https://dl.icdst.org/pdfs/files3/284d873749e377558208bca765468ffd.pdf>

80. Atul Singh, Siddhartha Agarwal, Aniket Prabhat. A multi-criteria decision framework to evaluate sustainable alternatives for repurposing of abandoned or closed surface coal mines. Frontiers in Earth Science, V. 12, 2024. – 14 p.
<https://doi.org/10.3389/feart.2024.1330217>

81. Каталенець А.І., Пирогова В.В. Про метасоматоз на Гуляйпільському родовищі. У кн. Мінералогія рудних родовищ України. К.: Наук. думка, 1984. С. 149-159

82. Webster R. and Oliver M.A. Statistical methods in soil and land resource survey. New York: Oxford University Press, 1990. 316 p.

83. Черняк О. М., Сороколат Н. А. Оцінювання якості об'єктів кваліметрії з застосуванням інформаційних технологій. Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, Харків - 25-26 січня 2022 року. Харків: УІПА, 2022. - с. 54

84. Д'яченко Н.О., Яловчак Т.М, Касьяненко Д.Л. Оцінка інтегральної еколого-технологічної ситуації (м. Солотвино). Гірнича геологія та геоecологія, 2023. № 1 (6) С. 35-56 [https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2023.1\(6\).287848](https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2023.1(6).287848)

85. Улицький О.А., Бойко К.Є., Касьяненко Д.Л. Атрибутивний чинник трансформаційної зміни гідрогеологічного режиму розробки Новоукраїнського родовища гранітів. Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». м. Львів, 6-10 жовтня 2025 р. С. 580-587. https://conf.dkz.gov.ua/files/2025_materials_net.pdf

86. Д'яченко Н.О., Касьяненко Д.Л., Улицький А.О. Оцінка небезпеки накопичення токсикантів у трофічних ланцюгах морської екосистеми та вторинне забруднення донних відкладів «Каховське водосховище – Чорне море». Збірник тез

XII Міжнародної науково-практичної конференції «ВОДА ДЛЯ МИРУ», присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів. Київ, 2024. – С. 97-101

87. Schrimpf P., Rupp J., Tönjes B. Verantwortung übernehmen. Essen-Kettwig: WOESTE DRUCK + VERLAG GmbH & Co KG, 2018. 34 p.
https://www.rag.de/fileadmin/user_upload/01_Unternehmen/02_Verantwortung/22493-1_RAG_Nachhaltigkeit_gesamt_WEB.pdf

88. Alberta Energy Regulator. CARL: Incentivizing industry to prioritize reclamation, 2025. <https://www.aer.ca/about-aer/media-centre/stories/carl-incentivizing-industry-prioritize-reclamation#>

89. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Савлучинський О.М, Гайовий О.В. Оцінка потенційного впливу промислового видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища на довкілля. Гірнича геологія та геоекологія, 2021. № 2 (3). С. 43-64,

90. Karlheinz Spitz, John Trudinger. Mining and the environment: from ore to metal. 2nd edition. CRC Press: London, 2019. 812 p
<https://doi.org/10.1201/9781351183666>

91. 3У «Про охорону навколишнього природного середовища» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1991, № 41, ст.546. зі змінами № 4017-IX від 10.10.2024 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>

92. 3У «Про оцінку впливу на довкілля». ВВР, 2017, № 29, ст.315 зі змінами № 4017-IX від 10.10.2024, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>

93. 3У «Про стратегічну екологічну оцінку». ВВР, 2018, № 16, ст.138 зі змінами № 4510-IX від 19.06.2025. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text>

94. Кодекс України про надра. ВВР, 1994, № 36, ст.340 із змінами № 4154-IX від 18.12.2024. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-%D0%B2%D1%80#Text>

95. Гірничий закон України. ВВР, 1999, № 50, ст.433 із змінами № 2805-IX від 01.12.2022. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-14#Text>

96. Земельний кодекс України. ВВР, 2002, № 3-4, ст.27 із змінами № 4751-IX від 13.01.2026. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>

97. Постанова КМУ «Про затвердження Порядку консервації земель» від 19 січня 2022 р. № 35 із змінами № 235 від 01.03.2024.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/35-2022-%D0%BF#Text>

ДОДАТКИ



ПРАВНИЧЕ ПАРТНЕРСТВО УКРАЇНИ

LEGAL PARTNERSHIP OF UKRAINE

Місто Київ, вул. Володимирська 40/2 офіс 24

АКТ

впровадження результатів наукового дослідження у діяльність громадської організації

Цим актом підтверджується, що результати наукового дослідження **Касьяненка Дмитрия Леонідовича**, отримані у межах підготовки дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 — Технології захисту навколишнього середовища, на тему: «Формування еколого-збалансованої території в умовах розробки родовищ корисних копалин шляхом впровадження новітніх технологій для екологізації виробництва» використовуються та впроваджуються у діяльність Громадської організації «Правниче партнерство України» під час здійснення експертної, правопросвітницької, аналітичної та науково-практичної діяльності.

У процесі реалізації статутних завдань організації окремі положення, наукові висновки та аналітичні підходи, сформульовані у дисертаційній роботі, застосовуються як методологічна основа для підготовки та проведення майбутніх наукових, освітніх та експертно-аналітичних заходів, спрямованих на дослідження проблем екологічної безпеки, сталого розвитку територій та правового регулювання діяльності у сфері надрокористування.



Зокрема, результати дисертаційного дослідження використовуються при:

— підготовці науково-практичних конференцій, круглих столів та експертних дискусій, присвячених питанням екологічної безпеки, раціонального використання природних ресурсів та сталого розвитку гірничих територій;

— розробці аналітичних матеріалів, експертних висновків та рекомендацій, що стосуються удосконалення правового регулювання у сфері природокористування, екологічної безпеки та управління природними ресурсами;

— підготовці інформаційно-аналітичних досліджень, спрямованих на виявлення системних проблем у сфері використання надр, управління природними ресурсами та формування еколого-збалансованих територій;

— формуванні експертних пропозицій щодо вдосконалення законодавства України у сфері екологічної політики, надрокористування та відновлення порушених територій;

— проведенні правопросвітницьких заходів та освітніх програм, спрямованих на поширення сучасних наукових знань щодо екологічно безпечного використання природних ресурсів та мінімізації техногенного навантаження на довкілля.

Наукові результати дисертаційної роботи також використовуються у діяльності організації як аналітична база для підготовки пропозицій щодо формування державної та регіональної екологічної політики, розвитку механізмів громадського контролю у сфері природокористування, а також підготовки рекомендацій щодо впровадження сучасних технологічних підходів до зменшення негативного впливу гірничодобувної діяльності на довкілля.

Використання результатів дослідження сприятиме: формуванню сучасних експертних підходів до оцінки екологічних ризиків у процесі розробки родовищ корисних копалин; розвитку



науково-обґрунтованих підходів до формування еколого-збалансованих територій та відновлення порушених екосистем; інтеграції сучасних інженерно-технологічних та аналітичних рішень у процес екологічного управління територіями; підвищенню ефективності громадського та експертного обговорення проблем екологічної безпеки та сталого природокористування.

Таким чином, результати дисертаційного дослідження **Касьяненко Дмитра Леонідовича** мають наукову, прикладну та суспільну цінність і використовуються у діяльності ГО «Правниче партнерство України» як науково-аналітична база для проведення майбутніх експертних, освітніх та науково-практичних заходів організації.

Цим актом підтверджується впровадження та використання результатів зазначеного наукового дослідження у діяльності громадської організації.

Члени громадської організації:

Голова екологічної платформи

Друзенко Владислав Юрійович

Члени:

Бовдуй Світлана Геннадіївна

Халабузар Еліна Володимирівна

Мальованна Анастасія Олегівна

Ліпич Олександр Валентинович

Секретар ГО:
Григорук В.М.



[Handwritten signature of Vladislav Yurievich Druzenko]

[Handwritten signatures of other members: Svitlana Hennadiivna Boviduy, Elina Volodimirovna Halabuzar, Anastasiia Olegivna Malovanna, and Oлександр Valentynovich Lipych]



**НАЦІОНАЛЬНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
З ПИТАНЬ ВИЯВЛЕННЯ, РОЗШУКУ ТА УПРАВЛІННЯ АКТИВАМИ,
ОДЕРЖАНИМИ ВІД КОРУПЦІЙНИХ ТА ІНШИХ ЗЛОЧИНІВ
(АГЕНТСТВО З РОЗШУКУ ТА МЕНЕДЖМЕНТУ АКТИВІВ, АРМА)
ДЕПАРТАМЕНТ ВИЯВЛЕННЯ, РОЗШУКУ
ФІНАНСОВИХ ТА ІНШИХ АКТИВІВ**

вул. Бориса Грінченка, 1, м. Київ, 01001, тел. (044) 299-01-27

E-mail: info@artma.gov.ua, сайт: artma.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 41037901

від 16.03.2026 20 __ р. № _____ На № _____ від _____ 20 __ р.

АКТ

**впровадження результатів наукового дослідження, результатів
докторської дисертаційної роботи Д.Л.Касьяненко «Формування еколого-
збалансованої території в умовах розробки родовищ корисних копалин
шляхом впровадження новітніх технологій для екологізації
виробництва» у практичну діяльність**

м. Київ

11.03.2026 року

Результати наукового дослідження Касьяненко Дмитра Леонідовича, виконані у межах підготовки дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 — Технології захисту навколишнього середовища на тему: «Формування еколого-збалансованої території в умовах розробки родовищ корисних копалин шляхом впровадження новітніх технологій для екологізації виробництва» використано у практичній діяльності Національного агентства України з питань виявлення, розшуку та управління активами, одержаними від корупційних та інших злочинів (АРМА) у процесі виконання функцій щодо виявлення, аналізу та розшуку активів, що можуть бути пов'язані із кримінальними правопорушеннями.

У ході впровадження використано наукові та методичні підходи, розроблені Касьяненко Д.Л., зокрема, впровадження результатів дослідження дозволило:

1. підвищити ефективність виявлення активів, пов'язаних із природними ресурсами та об'єктами видобувної діяльності;
2. удосконалити аналітичні інструменти пошуку активів, що можуть перебувати у прихованому або замаскованому користуванні;

3. забезпечити використання геоекологічних методів аналізу територій у процесі розшуку майна, що має економічну та екологічну цінність;
4. підвищити якість інформаційно-аналітичного супроводу кримінальних проваджень, у межах яких здійснюється розшук активів.

Отримані результати мають практичне значення для розвитку інструментів аналітичного розшуку активів у сфері природокористування, надрокористування та інфраструктури видобувної галузі, а також можуть бути використані для подальшого вдосконалення методик виявлення та аналізу майна, що підлягає арешту або управлінню відповідно до законодавства України.

Цим актом підтверджується, що результати наукової роботи **Касьяненка Дмитра Леонідовича** впроваджено у практичну діяльність та можуть використовуватися у подальшій роботі з виявлення, аналізу та розшуку активів, що відповідає завданням та функціям АРМА.

Директор Департаменту виявлення,
розшуку фінансових та інших активів
центрального апарату
Національного агентства України
з питань виявлення, розшуку та
управління активами,
одержаними від корупційних
та інших злочинів, д.е.н., професор



Віталій ЧУБАЄВСЬКИЙ

CERTIFICATE OF IMPLEMENTATION OF RESEARCH RESULTS INTO PRACTICAL BUSINESS ACTIVITIES

City of Kyiv, Ukraine

Date: 20.02.2026

This Certificate confirms that the research findings developed by Dmytro Leonidovych Kasyanenko as part of his doctoral (PhD) dissertation in the field of Environmental Protection Technologies (Specialty 183) entitled:

"Formation of Environmentally Balanced Territories under Conditions of Mineral Deposits Development through the Implementation of Innovative Technologies for Production Greening"

have been reviewed and adopted for practical application within the operational and strategic activities of Trans Commodities Ukraine.

The scientific concepts, analytical conclusions, and methodological approaches presented in the dissertation are considered relevant to the company's long-term business planning and are incorporated into internal analytical frameworks used in the development and evaluation of prospective commercial and industrial projects.

In particular, the results of the research are taken into account in the following areas:

- strategic planning of projects related to natural resource utilization and environmentally responsible industrial development;
- assessment of environmental and technological factors during the preparation and evaluation of future investment initiatives;
- integration of sustainability principles and environmental risk considerations into corporate planning processes;
- preparation of internal analytical materials concerning environmental impact management and responsible resource use;
- development of approaches aimed at aligning business operations with modern environmental standards and sustainable development principles.

The application of the above-mentioned research outcomes contributes to strengthening the analytical basis for future project planning, improving environmental risk awareness in corporate decision-making, and supporting the implementation of modern sustainability-oriented business practices.

Based on the foregoing, Trans Commodities Ukraine confirms that the scientific results obtained by Dmytro L. Kasyanenko are recognized as having practical relevance and may be utilized within the company's future project development and strategic planning activities.

This Certificate is issued to confirm the implementation and use of the aforementioned research results within the company's professional activities.

Director

D. Kasyanenko

