

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Яремій Сергій Олександрович

УДК 551.24:504

ВПЛИВ ТЕКТОНІЧНОЇ БУДОВИ ТЕРИТОРІЇ КРИВБАСУ НА ПРОЦЕСИ
ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ПІДТОПЛЕННЯ
(ЗА ГЕОФІЗИЧНИМИ ДАНИМИ)

Галузь знань 10 «Природничі науки»
Спеціальність 103 «Науки про Землю»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів має посилання на відповідне джерело

_____ С. О. Яремій

Науковий керівник Пігулевський П. Г., доктор геол. наук, с.н.с.

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Яремій С.О. Вплив тектонічної будови території Кривбасу на процеси природного та техногенного підтоплення (за геофізичними даними) – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за напрямом 10 Природничі науки спеціальність 103 «Науки про Землю» – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2026.

Представлена робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання — встановленню закономірностей формування та розвитку підтоплення, міграції підземних вод і сучасних геодинамічних процесів у межах південної частини Криворізького залізорудного басейну в умовах тривалого техногенного навантаження на основі комплексного застосування геофізичних методів.

Актуальність дослідження визначається високим рівнем промислового освоєння території Кривбасу, наявністю значної кількості техногенних об'єктів — кар'єрів, хвостосховищ, ставків-накопичувачів, відвалів гірських порід, виробничих майданчиків — та пов'язаними з ними змінами геологічного середовища. Тривала експлуатація гірничодобувних підприємств супроводжується порушенням природного режиму підземних і поверхневих вод, розвитком підтоплення, змінами фільтраційних властивостей порід та активізацією екзогенних геологічних процесів. У цих умовах виникає необхідність створення науково обґрунтованої системи геофізичного контролю та оцінки стану геологічного середовища.

Об'єктом дослідження є геологічне середовище південної частини Криворізького залізорудного басейну в умовах інтенсивного природного та техногенного навантаження.

Предметом дослідження є закономірності формування та розвитку процесів природного і техногенного підтоплення під впливом особливостей тектонічної будови території Південного Кривбасу.

Метою роботи є комплексне дослідження впливу тектонічної будови території південного Кривбасу на процеси природного та техногенного підтоплення. У роботі було застосовано цілий комплекс польових і камеральних методів: вертикальне електричне зондування, метод природного електричного поля, електротомографію, аналіз дистанційних матеріалів, цифрову обробку архівних матеріалів, геоінформаційне картографування та інтерпретацію геофізичних даних у поєднанні з геологічною і гідрогеологічною інформацією. У процесі дослідження узагальнено сучасний стан вивченості проблеми підтоплення та техногенної трансформації геологічного середовища Кривбасу. Проведено аналіз літературних, фондових та архівних матеріалів, що дозволило встановити основні напрями попередніх досліджень та визначити наукові питання, які потребують подальшого опрацювання. Наведено комплексну характеристику території досліджень, яка охоплює південну частину Криворізького басейну та включає ділянки розташування кар'єрів, хвостосховищ, відвалів порід та ставка накопичувача шахтних вод у балці Свистунова.

Показано, що особливості розвитку розривної тектоніки Криворізького геологічного району характеризуються складним взаємозв'язком гідродинамічних процесів у кристалічному фундаменті та осадовому чохлі, які суттєво впливають на сучасний стан гідрофільтраційних процесів. За результатами комплексної інтерпретації геофізичних матеріалів встановлено закономірності просторового розподілу геоелектричних параметрів, що пов'язані з техногенним водонасиченням і формуванням нових зон підтоплення. Виявлено ділянки підвищеної водопроникності, пов'язані з тектонічними порушеннями та техногенно зміненим середовищем.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в удосконаленні комплексного аналізу взаємозв'язку між тектонічними структурами, фільтраційними властивостями порід і зонами підтоплення для території Півдня Кривбасу. Було запропоновано новий підхід до виділення зон техногенного водонасичення на основі інтерпретації методів ВЕЗ та ПП.

Удосконалено методику інтерпретації геоелектричних даних для оцінки глибини та інтенсивності підтоплення. Встановлено геоелектричні критерії слабких тектонічних зон, які контролюють напрямки руху підземних вод на різних стратиграфічних горизонтах. Розроблено аналітичну модель тектонічно-індукованого підтоплення, що враховує сучасну геодинаміку району. Визначено, що розломні зони різних напрямів по різному впливають на основні шляхи циркуляції та міграції підземних вод між водоносними горизонтами.

Особливу роль у формуванні сучасного гідрогеологічного режиму на різних стратиграфічних рівнях території відіграють минулі та сучасні тектонічні процеси. Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом у межах Кривбасу формує у кристалічному фундаменті різнорангову систему розломів. Дрібні тектонічні порушення та пов'язані з ними зони підвищеної проникності впливають на формування і швидкість розвитку негативних геологічних та техногенних процесів – підтоплення, просідання ґрунтів, провалів і зсувів. Так, у верхній частині розрізу переважають розриви субширотного напрямку (Конкська система розломів); з глибин 25-30 метрів – діаганальні північно-західного простягання (Комісарівська система розломів) палеогенового етапу тектонічної активізації; а з глибин – 50-60 метрів докембрійського (верхньопротерозойського) тектогенезу.

Отримана інформація показує, що при розробці проєктів великих інженерно-техногенних споруд її потрібно враховувати, особливо при розробці різнорівневих дренажних систем навколо хвостеховищ.

Практичне значення полягає у можливості використання результатів під час організації геоєкологічного моніторингу, оцінки ризиків підтоплення, планування інженерного захисту територій та супроводу гірничопромислових об'єктів. Основні результати роботи можуть бути використані в практиці геофізичних та інженерно-геологічних досліджень промислових регіонів України.

Ключові слова: Український щит, Криворізьський залізорудний басейн (Кривбас), тектонічні порушення, зони тріщинуватості, підземні води, геофізичні методи, обробка та інтерпретація, диференційні характеристики, петрофізичні властивості, техногенне підтоплення.

ABSTRACT

S.O. Yaremii. The Influence of the Tectonic Structure of the Kryvbas Region on Natural and Anthropogenic Flooding Processes (Based on Geophysical Data) – Qualifying Research Thesis in the Form of a Manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of 10 Natural Sciences, specialty 103 “Earth Sciences” – Dnipro Polytechnic National Technical University, Dnipro, 2026.

This work is devoted to solving a pressing scientific and practical problem—establishing the patterns of formation and development of flooding, groundwater migration, and modern geodynamic processes within the southern part of the Kryvyi Rih iron ore basin under conditions of prolonged anthropogenic impact, based on the comprehensive application of geophysical methods.

The *relevance* of this study stems from the high level of industrial development in the Kryvbas region, the presence of a significant number of man-made facilities—quarries, tailings ponds, storage ponds, rock dumps, and production sites—and the associated changes in the geological environment. The long-term operation of mining enterprises is accompanied by disruptions to the natural regime of groundwater and surface water, the development of flooding, changes in the filtration properties of rocks, and the intensification of exogenous geological processes. Under these conditions, there is a need to establish a scientifically sound system for geophysical monitoring and assessment of the state of the geological environment.

The *object* of the study is the geological environment of the southern part of the Kryvyi Rih iron ore basin under conditions of intense natural and anthropogenic stress.

The *subject* of the study is the patterns of formation and development of natural and anthropogenic flooding processes under the influence of the tectonic structure of the Southern Kryvbas region.

The *aim* of this study is to conduct a comprehensive investigation of the influence of the tectonic structure of the southern Kryvbas region on the processes of natural and anthropogenic flooding. A comprehensive set of field and laboratory methods was applied in this study: vertical electrical sounding, the natural electric field method, electrical tomography, analysis of remote sensing data, digital processing of archival materials, geoinformation mapping, and interpretation of geophysical data in combination with geological and hydrogeological information. The study summarizes the current state of research on the problem of flooding and anthropogenic transformation of the geological environment in the Kryvbas region. An analysis of literature, reference, and archival materials was conducted, which made it possible to identify the main directions of previous research and determine scientific questions requiring further study. A comprehensive description of the study area is provided, covering the southern part of the Kryvyi Rih Basin and including sites of open-pit mines, tailings ponds, rock dumps, and a mine water storage pond in the Svistunova ravine.

It is shown that the characteristics of the development of rift tectonics in the Kryvyi Rih geological region are defined by a complex interplay of hydrodynamic processes in the crystalline basement and the sedimentary cover, which significantly influence the current state of hydrofiltration processes. Based on the results of a comprehensive interpretation of geophysical data, patterns in the spatial distribution of geoelectric parameters associated with anthropogenic water saturation and the formation of new areas of flooding have been identified. Areas of increased water permeability associated with tectonic disturbances and an anthropogenically altered environment have been identified.

The *scientific novelty* of this dissertation lies in the refinement of a comprehensive analysis of the relationship between tectonic structures, the filtration properties of rocks, and areas of waterlogging in the southern Kryvbas region. A new approach to identifying areas of anthropogenic water saturation was proposed, based on the interpretation of VES and PP methods. The methodology for interpreting geoelectric data to assess the depth and intensity of waterlogging has been refined.

Geoelectric criteria for weak tectonic zones that control the flow directions of groundwater at various stratigraphic horizons have been established. An analytical model of tectonically induced groundwater inflow has been developed, taking into account the current geodynamics of the region. It has been determined that fault zones of different orientations have varying effects on the main pathways of groundwater circulation and migration between aquifers. Past and present tectonic processes play a particularly important role in shaping the current hydrogeological regime at various stratigraphic levels of the territory. The transregional Kryvyi Rih deep fault within the Kryvbas region forms a multi-level fault system in the crystalline basement. Minor tectonic disturbances and the associated zones of increased permeability influence the formation and rate of development of adverse geological and anthropogenic processes—flooding, soil subsidence, sinkholes, and landslides. Thus, in the upper part of the section, sublatitudinal faults predominate (the Konk Fault System); at depths of 25–30 meters—diagonal faults trending northwest (the Komissarivska fault system) from the Paleogene stage of tectonic activation; and at depths of 50–60 meters—from the Precambrian (Upper Proterozoic) tectogenesis.

The information obtained indicates that it must be taken into account when designing large-scale engineering and man-made structures, particularly when developing multi-level drainage systems around tailings ponds.

The *practical significance* lies in the possibility of using these results in organizing geoecological monitoring, assessing flood risks, planning engineering protection of territories, and providing support for mining facilities. The main results

of this work can be applied in the practice of geophysical and engineering-geological studies of industrial regions in Ukraine.

Keywords: Ukrainian Shield, Kryvyi Rih Iron Ore Basin (Kryvbas), tectonic disturbances, fracture zones, groundwater, geophysical methods, data processing and interpretation, differential characteristics, petrophysical properties, anthropogenic flooding.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ (особистий внесок здобувача наведено після бібліографічних даних)

Наукові статті у вітчизняних фахових виданнях за спеціальністю, що
обліковуються науковими базами даних Scopus

1. Logvin V. M., Pigulevskiy P. G., Yaremii S. O. Application of differential characteristics in the analysis of vertical electrical sounding data. *Geofizychnyi Zhurnal*. 2025. Vol. 47, No. 2. P. 251–256. DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322547> (фахове видання кат. А).

Наукові статті у фахових виданнях

2. Pihulevskiy P., Yaremii S. On the study of the mechanism of excess surface water discharge using geophysical observations. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*. 2026. No. 1 (9). P. 106–113. DOI: <http://doi.org/10.15407/Meteorology2026.09.106> (фахове видання кат. Б).

3. Логвін В. М., Пігулевський П. Г., Яремій С. О. Застосування диференційних характеристик при аналізі даних вертикального електричного зондування. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2025. № 82.С. 120–128. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.120> (фахове видання кат. Б).

4. Використання радіологічної та тектонічної інформації в системі комплексного екологічного моніторингу техногенно навантажених регіонів південного сходу України / П. Г. Пігулевський, О. К. Тяпкін, Ю. В. Лісовий, В. М. Логвін, С. О. Яремій. *Геохімія техногенезу*. 2023. № 37. С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.32782/geotech2023.37.05> (фахове видання кат. Б).

5. Застосування дистанційних методів при дослідженні впливу техногенних споруд на поверхневі та підземні води (на прикладі південного Кривбасу) / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, Г. І. Єременко, С. О. Яремій. *Гірничий вісник*. 2023. Вип. 111. С. 139–144. DOI: [doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110](https://doi.org/10.31721/2306-5435-2022-1-110) (фахове видання кат. Б).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Яремій С. О. До питання впливу неотектонічного стану геологічного середовища території Кривбасу на процеси техногенного підтоплення. *Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології : зб. матеріалів VI Міжнар. наук. конф. (Київ, 17–18 листоп. 2025 р.)* / ДУ НЦ ГГГРІ НАН України. Київ, 2025. С. 87–91. DOI: <https://doi.org/10.59911/conf.mpmgg.2025.s19>.

7. Яремій С. О. Результати повторних досліджень механізму відведення надлишкових поверхневих вод (на прикладі кар'єру в Кривбасі). Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (Дніпро, 12–14 листопада 2025 року) : у 3 т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2025. Т. 1. С. 296–297.

8. On the Results of Repeated Studies of the Mechanism of Discharging Excessive Surface Water (using the Example of a Quarry in Kryvbas) / P. Pigulevskiy, V. Svistun, S. Yaremii, L. Anisimova. *5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities (Kyiv, 15–18 September 2025)*. Kyiv, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520021>.

9. Pihulevskiy P., Svistun V., Yaremii S., Anisimova L. On the spatial positioning features of the first aquifer in the south of Kryvbas // *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment : Proceedings of*

the 18th International Conference (Kyiv, 14–17 April 2025). Kyiv, 2025. Vol. 2025. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510161>.

10. Пігулевський П. Г., Яремій С. О. Геофізичні дослідження механізму природнього розвантаження надмерних поверхневих вод (на прикладі кар'єру в Кривбасі). Сучасні проблеми гірничої геології та геоecології (Modern Problems of Mining Geology and Geoecology): *матеріали V Міжнародної наукової конференції (Київ, 26 – 27 листопада 2024 р.)*. Київ, 2024. С. 99-103. DOI: <https://doi.org/10.59911/conf.mpmgg.2024.21>.

11. Яремій С. О. Шляхи удосконалення геолого-екологічних досліджень в Кривбасі. *Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Дніпро, 13–15 листопада 2024 року)* / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2024. Т. 1. С. 280-281.

12. Petrophysical features of the main rock formations of Kryvyi Rih ore basin. P. Pihulevskyi, S. Yaremii, O. Tiapkin, V. Logvin, L. Anisimova. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024» (Lviv, 7–9 October 2024)*. Lviv, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510092>.

13. Яремій С. О., Пігулевський П. Г., Логвін В. М. До питання встановлення кореляційної залежності між геоелектричними і гідрогеологічними параметрами. *Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 27–29 березня 2024 року* / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. С. 65-66.

14. Яремій С. О., Пігулевський П. Г., Логвін В. М. Використання експрес трансформацій електромагнітного поля для оконтурювання геоелектричних неоднорідностей. *Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова Весна» (Дніпро, 27–29 березня 2024 року)* / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2024. С. 63-64.

15. The use of geoelectric data to create geological-tectonic basis for hydrogeological block of environmental monitoring system for mining regions (on the example of southern Kryvbas) / P. Pihulevskyi, O. Tiapkin, S. Yaremii. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023» (Lviv, 2–4 October 2023). Lviv, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510086>.

16. P. Pihulevskyi, S. Yaremii. Geophysical research of the mechanism of natural discharge of excessive surface waters (on the example of a career in Kryvbas).

4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities (Lviv, 18–21 September 2023). Lviv, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500021>.

17. Пігулевський П. Г., Яремій С. О. До питання впливу сучасної геодинаміки та гідрогеодинаміки на землетруси в Кривбасі. *Modern problems of science, education and society : proceedings of III International Scientific and Practical Conference* (Kyiv, 22–24 May 2023). Kyiv, 2023. С. 573-577. <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modernproblems-of-science-education-and-society-22-24-05-2023-kiyiv-ukrayina-arhiv/>.

18. Яремій С. О. До питання вивчення стану підтоплення території криворізького регіону. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Дніпро, 1–3 березня 2023 року)* / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2023. С. 66-68.

19. Яремій С. О. До питання будови Криворізько-Кременчуцького розлому. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Дніпро, 1–3 березня 2023 року)* / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2023. С. 68-70.

20. Яремій С. О., Пігулевський П. Г., Довбніч М. М. Застосування різночасової електрометричної зйомки для оцінки геодинамічних змін при інженерно-геологічному районуванні (на прикладі Кривбасу). *Молодь: наука*

та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Дніпро, 23–25 листопада 2022 року) / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2022. С. 212–214.

21. Яремій С. О., Тяпкін О. К., Пігулевський П. Г. Вплив тектонічного чинника на використання ресурсних потенціалів природних об'єктів. Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології : матеріали III Міжнародної наукової конференції (Київ, 29 – 30 листопада 2022 р.) / ДУ «Науковий центр гірничої геології, геоекології та розвитку інфраструктури» НАН України. Київ, 2022. С. 141–145.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	15
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	22
1.1 Огляд сучасних розробок та результатів досліджень вітчизняних авторів	23
1.2 Огляд сучасних зарубіжних досліджень за темою дисертаційної роботи	26
1.3 Аналіз попередніх геолого-екологічних та гідрогеологічних досліджень Кривбасу	37
1.4 Шляхи удосконалення геолого-екологічних досліджень в Кривбасі	46
1.5 Висновки до розділу	50
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНИХ ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	53
2.1 Огляд геофізичних методів, використаних у дисертаційному дослідженні.....	53
2.2 Теоретико-методичні передумови використання геоелектричних методів та електричні властивості порід в геологічних умовах Кривбасу.....	58
2.3 Методичні особливості виконання польових електророзвідувальних робіт території південного Кривбасу.....	64
2.4 Методичні основи застосування диференційних характеристик при інтерпретації кривих ВЕЗ.....	68
2.5 Використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).....	73
2.6 Цифрова обробка архівних матеріалів	75
2.7 Висновки до розділу	77
РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ	80
3.1 Вибір території комплексних досліджень	80
3.2 Геофізичні характеристика території	82
3.3 Тектонічні та структурно-геологічні умови формування території досліджень.....	88
3.4 Гідрогеологічна характеристика території.....	95
3.5 Геодинамічні процеси території досліджень	101
3.6 Висновки до розділу	112
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	114
4.1 Дослідження механізму розвантаження надмірних поверхневих вод на території Кривбасу за результатами повторних геофізичних спостережень	114
4.2 Результати застосування диференційних характеристик при інтерпретації кривих ВЕЗ	114
4.3 Дослідження тектонічних процесів на техногенно обумовлені зміни на території Південного Кривбасу	128
4.4 Визначення особливостей розташування першого від поверхні водоносного горизонту на півдні Кривбасу	133
4.5 Механізми сучасного впливу природного та техногенного підтоплення на геологічне середовище території Півдня Кривбасу	137
4.6 Висновки до розділу	141
ВИСНОВКИ.....	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	145
ДОДАТОК А	158

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ДГЕ – Дніпропетровська геофізична експедиція;

Криворізька ГРЕ – Криворізька геологорозвідувальна експедиція
(частина ДП «Укрпівденгеологія»);

ЗСТА – зона сучасної тектонічної активності;

ВЕЗ – вертикальне електричне зондування;

ВЧР – верхня частина розрізу;

ЕГП – екзогенні геологічні процеси;

ГМК – гірничо-металургійний комплекс;

ПП – метод природного електричного поля;

ERM (Electrical Resistivity Method) – метод питомого електричного опору;

TDEM (Time-Domain Electromagnetic) – тимчасовий електромагнітний метод;

УЩ – Український щит;

КПГР – Криворізькій природно-господарській район;

ГІС – геоінформаційні системи;

GPR (Ground Penetrating Radar) – Георадар.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю глибокого розуміння просторових закономірностей впливу природного та техногенного підтоплення на навколишнє геологічне середовище, що дозволить розробити ефективну систему прогнозування та моніторингу підтоплених територій, забезпечити стабільність промислової та міської інфраструктури. Криворізький залізорудний басейн (Кривбас) є одним із найпотужніших гірничопромислових регіонів України, у межах якого впродовж понад століття здійснюється інтенсивна видобувна діяльність. Розробка залізорудних покладів відкритим і підземним способами, будівництво гідротехнічних споруд, хвостосховищ, відвалів і шахтних полів призвели до суттєвих змін у геологічному середовищі, що супроводжується порушенням природного гідрогеологічного балансу. Одним із найнебезпечніших проявів цих змін є підтоплення територій — як природного, так і техногенного характеру. Підтоплення спричиняє деградацію інженерно-геологічних умов, просідання ґрунтів, підтоплення житлових і промислових об'єктів, активізацію зсувних процесів і забруднення підземних вод. Водночас, територія Кривбасу є складно тектонічно розчленованою з активними тектонічними рухами, які суттєво впливають на фільтраційні властивості гірських порід. Саме поєднання тектонічних деформацій і техногенного навантаження створює складну гідрогеодинамічну систему, дослідження якої є важливим як у науковому, так і в практичному аспектах.

Об'єкт дослідження — геологічне середовище південної частини Криворізького залізорудного басейну в умовах інтенсивного природного та техногенного навантаження.

Предмет дослідження — закономірності формування та розвитку процесів природного і техногенного підтоплення під впливом особливостей тектонічної будови території Південного Кривбасу.

Метою та завданням дисертаційної роботи є комплексне дослідження впливу тектонічної будови території південного Кривбасу на процеси природного та техногенного підтоплення.

Для досягнення поставленої *мети* вирішувалися такі основні завдання:

- Проаналізувати сучасний стан досліджень процесів природного та техногенного підтоплення, роль тектонічної будови у формуванні гідрогеологічних умов та оцінити існуючі методичні підходи до їх вивчення;
- Охарактеризувати геологічну, тектонічну, гідрогеологічну та геоморфологічну будову південної частини Криворізького басейну як основу розвитку процесів підтоплення;
- Виконати комплексне дослідження та інтерпретацію результатів геофізичних досліджень (вертикального електричного зондування, методу природного електричного поля, електротомографії) у поєднанні з матеріалами дистанційного зондування Землі, фондовими та архівними даними;
- Встановити закономірності просторового розподілу геоелектричних параметрів і визначити їх зв'язок із тектонічною будовою, гідрогеологічними умовами та процесами природного і техногенного підтоплення;
- Виявити ділянки підвищеної водопроникності та шляхи міграції підземних вод, пов'язані з тектонічними порушеннями і техногенно зміненим геологічним середовищем;
- Обґрунтувати практичні підходи до прогнозування розвитку процесів підтоплення та використання результатів комплексних геофізичних досліджень для геоекологічного моніторингу техногенно навантажених територій.

Методи дослідження в дисертаційній роботі:

- Аналіз, узагальнення та систематизація літературних, фондових, архівних і картографічних матеріалів;
- Геофізичні методи: вертикальне електричне зондування (ВЕЗ) та метод природного електричного поля (ПП);

- Польові геофізичні дослідження та повторні моніторингові спостереження;
- Геологічний і гідрогеологічний аналіз умов формування та розвитку процесів природного і техногенного підтоплення;
- Камеральна обробка, інтерпретація та комплексний аналіз геофізичних даних; порівняльний аналіз результатів повторних геофізичних спостережень для оцінки просторово-часових змін геоелектричних і гідрогеологічних параметрів;
- Геоінформаційний аналіз і картографування результатів досліджень;
- Методи геофізичного моделювання для побудови моделі розвитку процесів підтоплення першого від поверхні водоносного горизонту.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає:

По-перше, в удосконаленні комплексного аналізу взаємозв'язку між тектонічними структурами, фільтраційними властивостями порід і зонами підтоплення для території Півдня Кривбасу. Було запропоновано новий підхід до виділення зон техногенного водонасичення на основі застосування диференціальних рівнянь при обробці та інтерпретації метода ВЕЗ. Обґрунтовано можливість застосування еквівалентних глибин для оцінки глибини поверхні підтоплення.

По-друге, у встановленні геоелектричних критеріїв слабких тектонічних зон, які контролюють напрямки руху підземних вод на різних стратиграфічних горизонтах та розроблено аналітичну модель тектонічно-індукованого підтоплення, що враховує сучасну геодинаміку району. Визначено, що різноспрямовані розломні зони, різного часу закладення, по-різному впливають на гідродинаміку та міграцію підземних вод між водоносними горизонтами як по латералі, так і на глибину.

По-третьє, особливу роль у формуванні сучасного гідрогеологічного режиму на різних стратиграфічних рівнях території відіграють минулі та сучасні тектонічні процеси. Встановлено, що у формуванні сучасного

гідрогеологічного режиму на різних стратиграфічних рівнях території досліджень відіграють минули та сучасні геодинамічні процеси. Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом у межах Кривбасу формує у кристалічному фундаменті різнорангову, переважно субмеридіальну систему розломів. У верхній частині розрізу переважають розриви субширотного напрямку (четвертинний етап розвитку Причорноморського схилу); з глибин 25-30 метрів – палеогеновий.

Дрібні тектонічні порушення та пов'язані з ними зони підвищеної проникності впливають на формування і швидкість розвитку негативних геологічних та техногенних процесів – підтоплення, просідання ґрунтів, провалів і зсувів визначають швидкість перетікання підземних вод між горизонтами.

Отримана інформація показує, що при розробці проєктів великих інженерно-техногенних споруд цю інформацію потрібно враховувати.

Практичне значення полягає у можливості використання результатів під час організації геоecологічного моніторингу, оцінки ризиків підтоплення, планування інженерного захисту територій та супроводу гірничопромислових об'єктів. Основні результати роботи можуть бути використані в практиці геофізичних та інженерно-геологічних досліджень промислових регіонів України.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені у виробничу діяльність Придніпровської геофізичної розвідувальної експедиції ДГП «Укргеофізика» та будуть використовуватися під час виконання геофізичних робіт, оцінки гідрогеологічних умов і прогнозування процесів природного та техногенного підтоплення, що підтверджується актом впровадження (додаток А).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, висновки та наукова новизна, викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. У одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі, в працях, опублікованих у співавторстві з

П.Г. Пігулевським, В.М. Логвіним, О.К. Тяпкіним, Ю.В. Лісовім, В.К. Свистуном та Л.Б. Анісімовою.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, зокрема: III Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології», м. Київ (2022); X Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації», м. Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка» (2022); XIII Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка» (2023); III International Scientific and Practical Conference «Modern problems of science, education and society», м. Київ (2023); 4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, м. Львів (2023); International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023», м. Львів (2023); XIV Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», м. Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка» (2024); XII Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка» (2024); V Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології», м. Київ (2024); International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024», м. Львів (2024); Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: Proceedings of the 18th International Conference, м. Київ (2025); 5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, м. Київ (2025); VI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології», м. Київ (2025); XV Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», м. Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка» (2025); XIII Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації», м. Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка» (2025).

Публікації. Основні результати дослідження викладено у 21 публікаціях, з яких: 1 стаття у фаховому виданні, що індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus; 4 статті у фахових виданнях за спеціальністю, що затверджені МОН; 5 доповідей на міжнародних наукових конференціях та 11 публікацій в українських виданнях та конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (93 найменувань літератури), містить 38 рисунків і 4 таблиці та 1 додаток (Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження). Загальний обсяг роботи – 158 стор. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі геофізичних методів розвідки НТУ «Дніпровська політехніка» під науковим керівництвом доктора геологічних наук П.Г. Пігулевським. Автор щиро вдячний науковому керівнику за наукові консультації, практичну допомогу, всебічну підтримку на всіх етапах підготовки дисертаційної роботи. За критичні зауваження та цінні поради автор висловлює вдячність викладачам кафедри Логвіну В.М., Тяпкіну О.К., Довбнічу М.М., Лозовому А.Л..

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Район досліджень розташований у межах Криворізького залізорудного басейну (Кривбасу), який є одним із найбільших гірничопромислових регіонів України. Територія характеризується тривалим та інтенсивним техногенним навантаженням, пов'язаним із видобуванням і переробкою залізних руд, функціонуванням кар'єрів, шахт, хвостосховищ та відвалів. Тривала гірничодобувна діяльність у межах Криворізького залізорудного басейну спричинила зміни геолого-гідрогеологічних умов, серед яких особливої актуальності набули процеси, пов'язані з підтопленням. Масштаби негативного впливу цього явища настільки великі, що вже на даному етапі виникла необхідність створення системи контролю, прогнозування, управління гідрогеологічними та інженерно-геологічними процесами на підтоплених так і на потенційно підтоплюваних територіях.

Аналіз результатів виконуваних різними організаціями робіт з оцінки підтоплюваності територій показав, що у всіх випадках відчувався явний недолік вихідної гідрогеологічної інформації – головним чином через брак свердловин, якими є можливість фіксування стану та змін режиму підземних вод. Цей дефіцит певною мірою може бути ліквідований шляхом розширення режимної спостережної мережі, проте вирішення проблеми слід шукати у розробці та застосуванні наземних методів, що забезпечують оперативне отримання вихідної інформації з необхідним ступенем діяльності при мінімальній кількості опорних (параметричних) спостережних режимних свердловин. Як перспективний у цьому плані розглядається комплекс геофізичних методів з інтерпретацією результатів на основі їх спільного аналізу з відповідною інформацією, отриманою традиційними методами.

Для більш глибокого розуміння проблематики дослідження та пошуку шляхів вирішення поставлених задач було проаналізовано праці вітчизняних і зарубіжних досліджень.

1.1 Огляд сучасних розробок та результатів досліджень вітчизняних авторів

У своєму циклі статей, присвячених дослідженню геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південного Кривбасу [4-9], Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилюк О. С. та ін. [3] розглянули фізико-геологічні передумови застосування цих методів для вивчення територій, що зазнають інтенсивного техногенного навантаження та вплив сучасних тектонічних процесів.

У роботах авторів наведено результати використання геоелектричних методів [62] під час обстеження ділянок підтоплення, що дало змогу визначити просторову будову водоносних горизонтів, встановити глибину рівня підземних вод і виявити зони підвищеної провідності, пов'язані з техногенним перезволоженням та структурно ослабленими ділянками.

Окрему увагу приділено використанню геоелектричних методів для вирішення інженерно-геологічних завдань, зокрема для диференціації літологічних різновидів порід, виявлення зон тріщинуватості, зниженого ущільнення та техногенно порушених товщ, що суттєво впливають на фільтраційні властивості й формування підтоплених ділянок.

Автором було розглянуто можливості використання потенціальних полів для вивчення сучасної тектоніки [40; 46; 56], що дозволило виділити тектонічно активні зони, визначити їх внесок у перерозподіл напружено-деформаційного стану масиву порід та оцінити їх вплив на циркуляцію підземних вод.

У статті П. Г. Пігулевського, В. К. Свистуна та О. С. Кирилюка [41] було проаналізовано можливості ефективного використання геоелектричних методів [62] для комплексного вивчення впливу техносфери на геологічне середовище Кривбасу з метою підвищення рівня екологічної безпеки. Як приклад наведено результати робіт, виконаних геоелектричними методами

ДГЕ «Дніпрогеофізика» при дослідженні інженерно-геологічних і насамперед гідрогеологічних умов південної частини Криворізького басейну.

Аналіз петрофізичних [63] та інженерно-гідрогеологічних матеріалів дав змогу обґрунтувати вибір оптимальних параметрів установок вертикального електричного зондування (ВЕЗ) і природного поля (ПП) для оцінки гідрогеологічних умов.

Тут сказано, що досліджувана ділянка сильно навантажена людьми і піддається природним процесам – карстовим утворенням [25], сучасній землетрусній активності та появі тріщин, які контролюють розподіл води на поверхні і під землею. Дослідження важливе та показує, що геоелектричні методи [55; 57; 59] допомагають визначити рівень підземних вод і оцінити, скільки вологи в верхніх шарах порід. Геоелектричні методи мають важливе значення для моніторингу і прогнозу підйому води [88-91].

Мені здається, що екологічний стан Кривбасу [13; 14] формують природні та людські фактори. Головний промисловий центр – місто Кривий Ріг, потужний гірничо-промисловий центр Дніпропетровської області і України. Стаціонарні джерела забруднення – це промислові підприємства, в основному гірничодобувна і переробна галузі чорної металургії (у Кривому Розі), а також сільськогосподарські і комунальні підприємства. Всього з початку промислового освоєння надр Кривбасу добули 5,5 мільярда тонн залізної сировини. З 2003 року щороку добувають близько 50 мільйонів тонн, і 37 мільйонів тонн добувають відкритим способом. Майбутнє басейну полягає в розширенні виробництва залізної руди за рахунок збагачених окисдованих залізистих кварцитів і в значному збільшенні видобутку магнетитових кварцитів підземним способом. Загальна площа гірничого відводу діючих шахт – понад 7,8 тис. га, на площі близько 3,3 тис. га спостерігаються екзогенні геологічні процеси у вигляді зсувів гірських порід над відпрацьованим простором. У зонах зсуву утворюються відкриті лійки, тріщини, просідання, терасоподібні уступи та плавні зміщення земної поверхні, що свідчить про

невідкладне вирішення проблеми закладення відпрацьованого простору діючих та закритих шахт.

Згідно з дослідженням Остапчука І. О. [41] всі промислові підприємства Криворізького природно-господарського району (КПГР) поділяються на 2 групи: мало- та сильно забруднюючих: до мало забруднюючих відносяться всі підприємства із об'ємом викидів забруднюючих речовин до 66 тис. т/рік, це майже всі невеликі підприємства району; сильно забруднюючими є підприємства із викидами 100 тис. т/рік і більше, до них відносяться: Південний гірничо-збагачувальний комбінат, металургійний комбінат “ArcelorMittalKrivoyRog”, Новокриворізький гірничо-збагачувальний комбінат. Значним є вплив на геоекологічний стан [60; 61] промислових об'єктів, таких як кар'єри, відвали, хвостосховища.

Тому на сьогодні однією з основних проблем техногенної безпеки усього Кривбасу є наслідки гірничо-геологічних умов експлуатації залізрудного родовища [74], які залежать від тектонічних порушень і розущільнених зон тектонічного і літологічного характеру, зміни режимів підземних вод, пов'язаних з діяльністю великих техногенних об'єктів (хвостосховищ, водосховищ, відвалів кристалічних та осадових порід, рис. 1.1 (згідно досліджень Остапчука І. О. [41])).

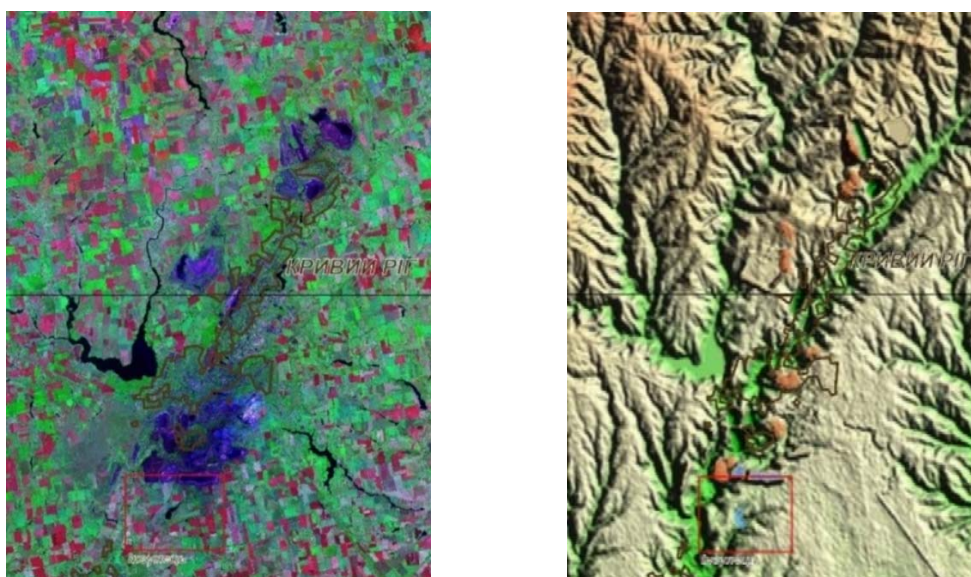


Рис. 1.1. Космічний Landsat 7 (ETM+) та радарний знімки Криворізької агломерації М 1:500 000 (Інтернет ресурс) з площею досліджень (згідно з дослідженнями Пігулевського П. Г. [49])

До найбільш суттєвих проблем міста потрібно віднести зміни гідрогеологічного режиму території (поверхневий і підземний водний розподіл) [13-21] та просідання земної поверхні або, навіть, провали, що провокуються старими покинутими шахтними виробками [23]. Раптові утворення воронок і провалів можуть становити небезпеку як для ведення гірських робіт у кар'єрах, так і для проживання населення міської агломерації.

Провали поверхні починають формуватися досить швидко після вироблення гірського простору. Тому для прийняття різних заходів безпеки потрібно визначити (локалізувати) місця можливого розвитку воронок та передбачити умови їхнього утворення [20,21]. Зрушення і деформації порід в гірських масивах також призводять до пошкоджень різних промислових об'єктів, які викликають додаткові зміни гідрогеологічного режиму поверхневих і ґрунтових вод, формують зсувні процеси і т.п.

1.2 Огляд сучасних зарубіжних досліджень за темою дисертаційної роботи

Автори *Mohd Talha Anees, K. Abdullah, M. N. M. Nawawi, Nik Norulaini Nik Ab Rahman, Abd. Rahni Mt. Piaah, M. I. Syakir, A. K. Mohd. Omar and Kaizar Hossain* у статті [79] розглядають проблему повеней. Проблема повеней поширена і постійна, особливо в регіонах Азії та Африці. Екстремальні дощі, форма річок, динаміка осадів і швидкі зміни землекористування часто викликають руйнівні повені. Основна проблема полягає у тому, що точне моделювання та прогнозування ризику повеней часто підбиваються поганим просторовим та часовим представленням ключових гідрологічних параметрів. Опади, інфільтрація, вологість ґрунту, стік, геометрія річок, зміни земного покриву та інші фактори демонструють сильну мінливість.

Ця відсутність точних даних робить моделі невизначеними. Відсутність даних створює помилки в оцінці ризику повені і ускладнює планування захисту. Тому треба отримати правильну детальну інформацію про поверхню

і підземні умови. Правильна інформація підвищить точність аналізу повеней, навіть коли даних мало.

Для вирішення цієї проблеми був запропонований інтегрований (комплексний) підхід, який поєднує дистанційне зондування, гідрологію та геофізичні методи. Спостереження з супутника і ГІС важливі на початку, коли треба швидко охопити велику ділянку. Спостереження з супутника і ГІС дозволяють подивитися на басейни, зміну землі, розрізи річок і зміни поверхні в часі. Але спостереження з супутника показують лише те, що на поверхні. Спостереження з супутника не розповідає про те, що під землею, а це важливо для інфільтрації, взаємодії з ґрунтовими водами і підземних потоків. Ці фактори є важливими для розуміння справжньої поведінки повеней, особливо на складних урбанізованих територіях.

З цієї причини автори підкреслюють, що геофізичні методи дуже важливі. Вони особливо цінують вимірювання електричного опору і метод TEM. Серед усіх геофізичних методів TEM і візуалізація електричного опору (ЕРО) – це найкращі варіанти для гідрології. ЕРО включає вертикальне електричне зондування (ВЕЗ) і електричну томографію опору (ЕРТ). TEM проникає глибоко під землю, чутливий до вологих ділянок і при цьому недорогий і простий у використанні в полі. Це особливо корисно для визначення властивостей водоносного горизонту, глибини залягання ґрунтових вод, а також вивчення фільтраційних властивостей ґрунтів. Методи вимірювання електричного опору вибрали, бо методи показують маленькі і середні глибини з чітким зображенням. Методи добре працюють для створення карт вологості ґрунту, тріщин, розломів і взаємодії ґрунтових вод з неглибокими поверхнями. При одночасному використанні методи дозволяють дослідникам точно визначати підземні структури, які впливають на просочування, збір води і поширення повені.

Геофізичні методи мають явні плюси. TEM проникає глибше, ніж більшість інших методів, і бачить зміни в осадових шарах. Метод вимірювання опору показує детальну картину поверхневих відкладів. Його можна

поєднувати з іншими методами, щоб отримати точні зображення властивостей ґрунту і глибоких геологічних шарів. Але у кожного методу є недоліки. Дослідження геоелектричного опору потребують хорошого контакту електродів і залежать від рельєфу. ТЕМ іноді втрачає сигнал на ранніх етапах, що знижує роздільну здатність у тонких верхніх шарах. Георадар часто застосовують в інших випадках, але георадар не справляється з дослідженням товщини високопровідних відкладів у заплавах річок. Сейсмічні методи можуть показати шарування і рівень підземних вод, проте сейсмічні методи дорожчі і складніші для розгортання на великих площах. Автори стверджують, що один метод не достатній; натомість поєднання кількох геофізичних методів забезпечує найповніший і найнадійніший опис гідрогеології досліджуваної території.

Автори зробили висновки, що у найнадійнішому підході для точної оцінки повеней полягає в комплексному поєднанні дистанційного зондування, аналізу гідрологічних параметрів та геофізичних досліджень. Дистанційне зондування та ГІС надають необхідні просторові дані для картографування заплав та характеристики водозбору; гідрологічний аналіз уточнює роль опадів, інфільтрації та стоку; а геофізичні методи, такі як ТЕМ та методи вимірювання геоелектричного опору, надають критично важливу інформацію про підземні шари, необхідну для дослідження цих параметрів.

Інтеграція всіх трьох областей значно підвищує якість геогідрологічних моделей. Інтеграція зменшує неясність у прогнозі повеней і дає кращі рішення.

Також було проаналізовано статтю, яку написали автори *Hani Al-Amoush, Abdel Rahman Al-Shabeeb, Rida Al-Adamat, A'kif Al-Fugara, Saad Al Ayyash, Akram Shdeifat, Eid Al-Tarazi and Jafar Abu Rajab* [92]. У статті дослідники розглядають серйозну і часту проблему повеней біля міста Мафрак на півночі Йорданії. За останні двадцять років швидка індустріалізація міста різко змінила природний водний режим регіону. Території, які колись були вкриті рослинністю, були замінені на асфальтобетонне покриття, що значно зменшує здатність землі поглинати опади.

Зливові стоки швидко збираються і протікають через Ваді-Аль-Мафрак і Ваді-Аль-Хуссейн. Через це виникають локальні повені. Повені руйнують будинки. Повені затоплюють головні дороги і тунелі. Повені порушують життя людей у місті. Русло р. Ваді продовжує розширюватися. Розширення русла р. Ваді підвищує ризик повеней у центральній і західній частинах міста. Тому потрібні точні стратегії боротьби з повенями. Потрібна достовірна наукова інформація про те, де будувати водозбірні дамби. Водозбірні дамби можуть зменшити пікові потоки паводків. Водозбірні дамби працюють, доки паводки не досягнуть міста.

Для вирішення цієї проблеми автори також застосували комплексний підхід з використанням геоінформаційних систем (ГІС) та геофізичних досліджень. Для визначення потенційних місць для будівництва водозбірної греблі в межах водозбору р. Ваді-Аль-Мафрак були використані геоінформаційні методи (ГІС). Процес вибору спирався на п'ять ключових фізичних критеріїв, які впливають на накопичення вод та поведінку стоку: кількість опадів, нахил, щільність дренажу, склад ґрунту та зони аерації. Ці параметри були оброблені за допомогою методу зваженої лінійної комбінації (WLC). Цей метод присвоює вагу кожному фактору та інтегрує їх в єдину карту придатності. Цей підхід дозволив авторам визначити просторові зони, класифіковані як низька, помірна, висока та дуже висока придатність для збору води. Західна частина водозбору, особливо вздовж головного русла р. Ваді, стала найперспективнішою ділянкою для будівництва греблі.

Однак, самих лише ГІС недостатньо і треба дослідити підземні умови, критично важливі для оцінки геологічної стабільності на місці будівництва греблі. З цієї причини автори провели детальні геофізичні дослідження за допомогою методу часової електромагнітної спектроскопії (TDEM), бо він дуже ефективний для гідрогеологічних досліджень. Метод проникає глибоко, до 130 м у цьому дослідженні. Метод чутливий до змін електричного опору. Може виявляти провідні шари, які пов'язані з насиченими зонами або тріщинуватою корою вивітрювання. Метод добре працює в посушливих і

напівпосушливих місцях, де георадар не працює через високий вміст глини і погане проникнення сигналу. Метод не потребує прямого контакту з ґрунтом, тому швидко отримується дані на шорстких або сухих поверхнях.

Незважаючи на свої переваги, цей метод має і недоліки: він пропонує обмежену роздільну здатність на дуже малих глибинах, його результати вимагають ретельної інверсії та калібрування, метод менш ефективний поблизу ліній електропередач. У цьому дослідженні метод виявився надійним. На запропонованому місці будівництва дамби було отримано вісім точок зондувань з використанням петлі передавача 50×50 м.

У процесі інтерпретації виявили від трьох до чотирьох різних геоелектричних шарів, що дозволило авторам побудувати 2D поперечні перерізи питомого опору вздовж та поперек р. Ваді.

Найвищий шар, потужністю 10–25 м, складається з мулистій глини з низькими значеннями питомого опору (20–40 Ом·м), що вказує на переважно непроникний матеріал. Під ним лежить високоомне утворення (150–>200 Ом·м) товщиною 20–60 м, яке інтерпретують як масивний тріщинуватий вапняк або палео-русліві відкладення, що складаються з вапнякових уламків і гравію. Глибше шар із проміжним опором (40–140 Ом·м) простягається приблизно до 140 м і є вапняком, який переходить у мергелистого вапняк. Моделі TDEM показали великі розломи і тріщини. Ці розломи і тріщини важливі, бо вони впливають на рух підземної води, на можливі шляхи фільтрації і на те, чи підходить ділянка для будівництва дамби.

До завершення аналізу, вибору ділянки будівництва на основі ГІС та геофізичного методу TDEM, дозволила визначити та охарактеризувати найбільш підходяще місце для водозбірної дамби для зменшення небезпеки повеней у місті Мафрак.

GIS-аналіз звузив пошук до західної частини басейну. Геофізичні дослідження показали, що під землею переважають чіткі геологічні шари, зокрема тріщинуватий вапняк, який добре пропускає воду. Поєднання просторового аналізу і гідрогеології та геофізичних досліджень дають

надійний, науковий план для боротьби з повенями і при будівництві техногенних об'єктів.

Польські автори *Tomisław Gołębiowski, Bogdan Piwakowski and Michał Świklik* [84] розглядають критичну проблему, пов'язану з безпекою дамб проти паводків поблизу м. Кракова, де багато цих споруд мають вік понад 50 – 100 років.

Під час повені 2010 року частини дамби Вавженчице були зруйновані, через неущільнені та погано ущільнені зони всередині тіла дамби та її надр. Ці зони діють як шляхи інфільтрації для води, спричиняючи протікання, внутрішню ерозію та структурне руйнування. Оскільки лише візуального огляду недостатньо для виявлення слабких зон, автори поставили за мету розробити комплексну геофізичну методологію, здатну виявляти неущільнені, проникні або структурно порушені ділянки всередині дамби.

Щоб вирішити проблему, дослідники використовували електричні, електромагнітні і сейсмічні методи. Серед методів — георадар (GPR), електрична томографія (ERT), ємнісний зв'язаний опір (CCR) і, вперше в Польщі, сейсмічне відбиття з високою роздільністю (HRSR) для огляду дамб. Методи виглядають ефективними. Ці методи доповнюють один одного. Метод GPR показує чітке зображення поверхневих внутрішніх структур. Метод ERT створює глибші карти опору, які допомагають знайти насичені чи глинисті ділянки. Метод CCR швидко мапує опір біля поверхні без електродів. Метод HRSR робить детальні сейсмічні картинки, які допомагають знайти глибші межі і можливо слабкі ділянки. Перевага цієї комбінації багатьох методів в тому, що комбінація зменшує плутанину в розумінні: там, де один метод має проблеми (наприклад, мало проникає в глибину автори помітили, що у GPR висока вологість знижує сигнал. Інший метод може підхопити цю інформацію, наприклад, ERT показує глибші горизонти. Але кожен метод має свої недоліки і обмеження. Метод GPR втрачає сигнал у вологих, глиняних ґрунтах. Стандартна антена не бачить глибокі аномалії. Але ERT добре проникає в глибину і точно визначає насичені ділянки. Проте ERT не дає

високої деталізації і треба ставити електроди. CCR вимірює дуже швидко, проте вертикальна деталізація погана і межі виглядають розмитими. HRSR забезпечує чудову латеральну роздільну здатність, але вимагає складнішого збору та обробки даних.

На мій погляд, поєднання всіх методів допомогло авторам знайти кілька нерозчленованих, напівщільних або вологих зон у тілі та в основі дамби. Автори виявили, що дамба збудована на піску і гравію, які дуже пропускають воду, і в багатьох місцях цей матеріал пухкий або напівщільний — умови ідеальні для внутрішнього розмивання під час затоплення. Глибші шари глини утримують воду, але над глиною розташовані водоносні піщані шари і слабкі ділянки в тілі дамби, які створюють небезпечні шляхи руху підземної води.

Георадар (особливо з орієнтацією антени з перехресними стовпами та торцевим вогнем) виявив неглибокі неконсолідовані зони та внутрішні водні шляхи; ERT виявив глибші водонасичені шари та сухі піски з аномально високим опором, що корелюють з витоком; CCR підтримував картографування, але був менш надійним для детальної геологічної інтерпретації; HRSR ефективно візуалізував ключові структурні маркери та допоміг підтвердити безперервність та глибину проблемних зон. На завершення, інтегрований геофізичний підхід виявився ефективним у виявленні схильних до ризику неконсолідованих ділянок у будові дамби.

Автори показали, що витік і внутрішня ерозія пов'язані з дуже проникаючими шарами піску і гравію, які є всередині дамби і під нею. Дослідження радить продовжувати геофізичний моніторинг і відновлювати найвразливіші частини дамби. Нова методика, зокрема високочастотне радіолокаційне сканування (HRSR) і багатокутний георадар (GPR), підвищує точність визначення можливих зон руйнування і може широко використовуватись для активного моніторингу ризику повені.

Автори *Akhtar Izzaty Riwayat a Mohd Ariff Ahmad Nazri, Mohd Hazreek Zainal Abidin* [78] піднімають головну проблему, з якою стикаються багато інженерів і гідрогеологів. Основна проблема буріння — це невизначеність

розташування водоснох горизонтів. Традиційний спосіб буріння дає лише точкову інформацію середовища, є дорогим, порушую природню цілісність. Інженери часто не можуть точно сказати, на якій глибині, яку товщину і скільки простягаються водоносні горизонти, особливо коли місце складне або важкодоступне. Це важливе зауваження, бо без точних даних важко планувати проекти. У статті це розглядається як практична проблема в дослідженні підземних вод, моніторингу навколишнього середовища та характеристики підземних вод.

Щоб подолати ці обмеження, автори зосереджуються на методі електричного опору (ERM). Цей метод вимірює електричний опір підземних вод шляхом введення струму в землю та запису результуючої напруги.

Коли відома відстань між електродами і підставляються геометричні коефіцієнти, розраховуються видимий питомий опір. Потім інвертується цей опір і будуються 2D або 3D картину розподілу підземного опору. Підземна вода, насичені шари, глина, тріщинуваті породи і забруднені ділянки мають різний питомий опір, тому ERM не пошкоджує середовище і показує геологічні структури і стан підземних вод. Цей метод дає реальні переваги порівняно з бурінням під час дослідження підземних вод. ERM може охоплювати набагато більші площі за менших витрат, а збір даних відбувається швидко та підходить навіть для складної місцевості, де буріння свердловин може бути неможливим. Він надає справжні дво- або тривимірні зображення, а не точкову інформацію, що дозволяє інженерам картографувати межі водоносного горизонту, глибину до корінних порід та зони забруднення або солоності.

Резистивна візуалізація добре реагує на зміни пористості, насичення, вмісту глини та тріщин. Тому резистивна візуалізація часто застосовують, коли треба знайти водоносний шар. До того ж метод не руйнує навколишнє середовище, і метод важливий на забруднених або особливих ділянках. Однак у методу є недоліки. На значення питомого опору впливають багато факторів: пористість, вологість, тріщини, солоність, розмір зерен і температура. Тому

інтерпретувати дані треба з досвідом, і часто потрібне калібрування за допомогою каротажних діаграм свердловин або геологічних даних. Деякі масиви електродів мають обмежене проникнення на глибину або знижену чутливість до горизонтальних або вертикальних структур. Високоомні ґрунтові умови можуть зменшити глибину дослідження, а на якість даних можуть впливати шум, умови сухої поверхні або техногенні перешкоди. Таким чином, хоча метод електричного опору (ЕРМ) є потужним, він не є повністю самодостатнім і все ж виграє від інтеграції з бурінням, відбором проб або іншими геофізичними методами.

Незважаючи на ці недоліки, дослідження демонструють, що метод дуже добре працює в різних геологічних умовах. ЕРМ успішно визначив товщину водоносного горизонту в алювіальних відкладах, картографував підземні води під тріщинуватою корінною породою, виявив зони фільтрату та забруднення на сміттєзвалищах, окреслив шлейфи солоності в прибережних середовищах та визначив глибину залягання підземних вод та скельного фундаменту для вибору місця розташування свердловин та планування водних ресурсів. У більшості прикладів зображення опору тісно корелювало з даними свердловин, що підтверджує надійність методу.

Результати послідовно підкреслюють, що насичені зони виглядають як аномалії з низьким опором, тоді як ненасичені або кам'янисті шари виглядають як структури з помірним або високим опором. Автори показують, що метод електричного опору є високоефективним інструментом для дослідження підземних вод та вирішення багатьох інженерних проблем, пов'язаних з підземними водами. Він забезпечує економічно ефективну, швидку та неінвазивну візуалізацію підземного середовища, завдяки якій краще приймати рішення щодо визначення водоносного горизонту, оцінки забруднення та дослідження ділянки.

Використання в дослідженні метода ЕРМ разом з даними буріння свердловин і з хорошим геологічним розумінням, точність і достовірність у вивченні підземних вод значно підвищуються. Це краще, ніж лише буріння.

Безпека та надійність захисту дамб від повеней важливе у всій Європі. Французькі вчені *Cyrille Fauchard, Patrice Mériaux* [83], у своєму дослідженні зіткнулися з проблемою, пов'язаною з надійністю дамб у своєму регіоні. У багатьох частинах Франції, дамби старі, різні, з різних матеріалів, часто змінювали або ремонтували дамби протягом десятиліть без записів. Оскільки більшість дамб залишаються сухими протягом тривалого часу та піддаються гідравлічному напруженню лише під час повеней, їхні внутрішні дефекти, такі як приховані канали ерозії, зони надмірного зволоження, порожнечі або неоднорідності, залишаються непомітними до критичного руйнування. Це створює серйозний ризик прориву дамби під час повеней, коли наслідки руйнування можуть бути катастрофічними для громад, що розташовані нижче за течією.

Тому авторам потрібен був діагностичний метод, здатний оцінювати великі довжини дамб, виявляти внутрішні слабкі місця тіла дамби, до того, як відбудеться затоплення. Щоб вирішити цю проблему, автори застосували комплекс геофізичних методів, зосереджуючись переважно на високоефективних електромагнітних методах: методі слінграма (Slingram) та методі радіомагнітотелуричного аналізу (RMT).

Автори обрали електромагнітні методи. Електромагнітні методи швидко дають безперервні дані вздовж довгих лінійних об'єктів, наприклад дамб. Електромагнітні методи показують різницю в електричному опорі в геологічному розрізі. Електромагнітні методи добре реагують на вологість, зміни порід, ознаки ерозії і ділянки, які були відремонтовані або змінені людьми. Тому електромагнітні методи підходять для діагностики структур, де головна проблема – вода, що просочується, і внутрішня ерозія. На додаток до цих методів, автори використовували 2D електричну рефракцію (ERI), сейсмічну рефракцію та, частково, георадар для уточнення інтерпретації в певних місцях.

Вибір методів Slingram і RMT, бона це є кілька причин. По-першому, Slingram і RMT швидко охоплюють великі відстані. Це важливо, коли треба

оглядати довгі дамби. По-другому, Slingram і RMT проникають до 8–12 метрів. Це достатньо, щоб побачити тіло дамби і верхню частину фундаменту. Ї По-третє, електромагнітні методи дуже чутливі до змін електропровідності, що робить їх ефективними для виявлення зон підвищеної вологості, похованих аномалій, неоднорідностей будівельних матеріалів та можливих шляхів ерозії.

Однак, автори визнають певні обмеження: методи електромагнітної томографії (ЕМ) можуть мати нижчу роздільну здатність у ґрунтах з високим опором, можуть страждати від зовнішнього шуму (особливо RMT поблизу ліній електропередач) та надавати менш точну інформацію про глибину, ніж томографія з електричним опором. Щоб компенсувати ці недоліки, автори включили 2D-візуалізацію електричного опору та сейсмічний рефракційний аналіз у ключових місцях.

Ці методи пропонують вищу просторову роздільну здатність та дозволяють детальніше характеризувати підземні шари, включаючи нашарування, властивості фундаменту та потенційні зони ерозії, виявлені під час початкового ЕМ-скринінгу. Також був протестований георадар, але він виявився значною мірою неефективним через велику товщу глин в багатьох місцях дамби, які сильно послаблюють радіолокаційні сигнали. На завершення, автори продемонстрували, що інтегрований геофізичний підхід є важливим для надійної оцінки дамб для захисту від повеней.

Методи ЕМ Slingram і RMT виявилися дуже корисними. Методи ЕМ швидко виявили аномальні ділянки по всій дамбі. Методи ERI і сейсмічний рефракційний аналіз дали детальну перевірку цих ділянок. В результаті роботи з'явилася практична діагностична методологія. Діагностична методологія поєднує швидкий великий скринінг і цільові дослідження з високою роздільністю.

Мені здається, цей підхід реально допомагає інженерам знайти слабкі ділянки. Підхід показує, чи міцна структура. Ця методика дозволяє інженерам вжити запобіжні кроки ще до підйому води та знижує ризик великої аварії дамби.

1.3 Аналіз попередніх геолого-екологічних та гідрогеологічних досліджень Кривбасу

Аналіз результатів попередніх досліджень [38] свідчить про те, що гідрогеологічні умови формування поверхневих та підземних вод Кривбасу є вкрай складними та значною мірою трансформованими внаслідок інтенсивного техногенного впливу. Протягом понад пів століття питання прогнозування змін гідрогеологічної, гідрохімічної та інженерно-геологічної обстановки в регіоні перебували у фокусі діяльності низки профільних науково-дослідних установ та виробничих організацій. У період з 1990 по 1997 рік Криворізькою ГРЕ в межах проєкту «Проведення геолого-екологічних досліджень на території Криворізького басейну масштабу 1:50 000» було реалізовано комплекс спеціалізованих геолого-екологічних робіт [73]. Програма досліджень охоплювала площинне літохімічне опробування ґрунтів, аналіз донних відкладів (річок Інгулець, Саксагань, Кам'янка; Карачунівського, Кресівського, Південного та інших водосховищ) [24], а також гідрохімічне випробування підземних і поверхневих вод, рослинного покриву та атмосферних опадів. Літохімічне випробування ґрунтів проводилося паралельно з радіометричними вимірюваннями.

Паралельно було здійснено збір даних щодо підприємств, які є дійсними або потенційними джерелами забруднення геологічного середовища, а також відбір проб промислових відходів [36], характерних для виробничого комплексу Криворіжжя. За результатами проведених досліджень розроблено комплект моноелементних та синтетичних літо- і гідрохімічних карт, що відображають екологічний стан [60; 61] геологічного середовища. На основі цих матеріалів складено «Карту оцінки геологічного стану та районування території за комплексами природоохоронних заходів».

У період 1993–2001 років Криворізькою ГРЕ було виконано геолого-екологічні дослідження в масштабі 1:25 000 на території південної

промислової зони Кривбасу. Вказаний регіон є зоною концентрації провідних підприємств галузі, зокрема АТ «ПівдГЗК» (із гірничо-збагачувальним та коксохімічним виробництвами), ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», АТ «Кривий Ріг-Цемент» та інших об'єктів.

Геолого-екологічні маршрути також охоплювали великі населені пункти, де здійснювався відбір проб ґрунтів та виконувалися радіометричні вимірювання. За результатами польових досліджень було розроблено комплекс картографічних матеріалів, зокрема: карти вмісту хімічних елементів у ґрунтах (моноелементні), карти сумарного показника забруднення (СПК) ґрунтів, карти ландшафтів та техногенних об'єктів тощо. Підсумковим документом стала «Карта екологічного стану геологічного середовища масштабу 1:200 000» для території аркуша L-36-IV.

У межах проєкту «Моніторинг геологічного середовища Кривбасу» Криворізькою КГП упродовж 1996–2006 років проводилися комплексні геолого-екологічні та гідрогеологічні роботи. Програма моніторингу включала літохімічне випробування ґрунтів, донних відкладів і рослинності, а також гідрохімічне випробування поверхневих і підземних вод та систематичні спостереження за режимом рівня підземних вод.

У 2008 році Криворізькою КГП було підготовлено звіт за результатами комплексної оцінки регіональних змін інженерно-геологічних умов Криворізького залізорудного басейну [73], зумовлених розробкою родовищ корисних копалин [74]. Дослідження, проведені протягом 2001–2008 років, дали змогу проаналізувати динаміку інженерно-геологічного середовища та здійснити районування території за ступенем вразливості до небезпечних екзогенних геологічних процесів [28]. У межах роботи було ідентифіковано локальні площі та ділянки з високою імовірністю виникнення техногенних кризових ситуацій [47]. Зокрема, було встановлено, що території розташування великих гідротехнічних споруд (хвостосховищ, ставків-накопичувачів шахтних вод тощо) належать до зон підвищеного ризику виникнення надзвичайних ситуацій. Це зумовлено тим, що зазначені

техногенні об'єкти [47] переважно розміщуються у природних балках, утворення яких пов'язане з наявністю тектонічних порушень [48].

Розміщення техногенних об'єктів значної маси в межах зазначеної балки спричиняє додаткове навантаження на гірські породи, що призводить до розкриття тріщин, формування зон підвищеної водопроникності та суттєвого порушення природного гідрогеологічного режиму території, а також до зниження загальної сейсмостійкості регіону [29].

Згідно з висновками фахівців Державної служби геології та надр України щодо гідрогеологічних змін у південній частині Кривбасу [73], спричинених експлуатацією комплексу гідротехнічних споруд підприємств гірничо-металургійного комплексу у період 1955–2005 рр., встановлено наступне:

Безповоротні фільтраційні втрати води з усіх хвостосховищ Кривбасу становлять приблизно 28,5 млн м³/рік, при цьому на об'єкти АТ «ПівдГЗК» припадає 24,4 млн м³/рік (86% від загального об'єму, згідно з даними 1984 р.).

Застосування протифільтраційних екранів для мінімізації втрат із хвостосховищ є неефективним через зміну фільтраційних властивостей глинистих матеріалів під впливом коливань мінералізації та хімічного складу фільтраційних вод.

Починаючи з 1950 року і по сьогодні, у південній частині Кривбасу триває процес засолення підземних вод кайнозойських відкладів (на глибині 15–40 м) високомінералізованими водами з хвостосховищ.

Згідно з результатами досліджень, глибина хімічного забруднення підземних вод становила: у четвертинних відкладах — 0,2–8,4 м, у неогенових — 8,3–46,6 м.

Фільтраційні води хвостосховищ спричинили підтоплення та заболочування прилеглих територій на площі до 51 км².

З початком експлуатації хвостосховищ, зокрема ставка-накопичувача шахтних вод, спостерігалось поступове забруднення підземних водоносних

горизонтів мінералізованими стоками. Починаючи з 1977 року, вода у колодязях стала непридатною для споживання та використання у господарсько-технічних цілях (зокрема для поливу).

Фахівці гідрогеологічної партії математичного моделювання КП «Південукргеологія» у межах розроблених природоохоронних заходів надали рекомендацію щодо недоцільності використання ставка у балці Свистунова [68] для акумуляції високомінералізованих шахтних вод.

У південній частині Кривбасу [73], окрім зазначених вище досліджень, Криворізька КГП на договірній основі здійснює системні геолого-екологічні роботи для підприємств гірничо-металургійного комплексу м. Кривого Рогу. Ці заходи передбачають щорічний моніторинг санітарного стану ґрунтів та поверхневих вод на територіях, прилеглих до відвалів розкривних порід і хвостосховищ АТ «ПівдГЗК», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», АТ «Кривбасзалізрудком», ПрАТ «ІнГЗК» тощо. Проте в межах зазначених екологічних досліджень екзогенні геологічні процеси (ЕГП) враховуються неповною мірою. За загальної площі гірничого відводу діючих шахт, що перевищує 7,8 тис. га, на 3,3 тис. га спостерігається активізація ЕГП, які проявляються у вигляді зсувів гірських порід над відпрацьованим простором, утворення лійок, тріщин, просідань, терасоподібних уступів та плавних деформацій земної поверхні. З метою запобігання зсувним явищам над відпрацьованими порожнинами, необхідно в терміновому порядку вирішити питання щодо закладання відпрацьованого простору як на діючих, так і на закритих шахтах [10-11].

У 2004 році інститут «Дніпроводгосп» спільно з НВП «Аквасофт» здійснили комплексні дослідження чинників, що зумовлюють розвиток зсувних процесів на лівобережжі р. Інгулець. За результатами робіт було розроблено математичну модель території, що охоплює ділянки від верхів'я балки Городовата до гирла балки Свистунова, а також від р. Інгулець до верхів'я балки Широка [68]. Згідно з проведеним моделюванням та розрахунками НВП «Аквасофт», сумарний обсяг виробничих вод, що

надійшли до підземних горизонтів північно-східної частини Південного Кривбасу внаслідок фільтраційних втрат із техногенних об'єктів за період 1964–2004 рр., склав 14 085,2 тис. м³. Зокрема:

- з I карти хвостосховища «Об'єднане» (1964–2004 рр.) — 712,5 тис. м³ (5,1%);
- зі ставка-накопичувача балки Свистунова (1976 — початок 2004 рр.) — 4 102,9 тис. м³ (29,1%);
- з хвостосховища «Войкове» (1979 — початок 2004 рр.) — 9 269,8 тис. м³ (65,8%).

Під керівництвом І. Д. Багрія [18], відповідно до розпорядження Президента України, у 1996 році було розпочато еколого-економічний експеримент у містах Кривий Ріг та Дніпродзержинськ [58].

Метою заходу стало впровадження економіко-правового механізму, що визначає порядок надання окремим територіям статусу зон надзвичайних екологічних ситуацій. До ключових завдань належали розроблення техніко-економічного та екологічного обґрунтування меж таких зон, а також картографічне відображення основних параметрів стану довкілля в Кривому Розі та Дніпродзержинську (нині — м. Кам'янське) [58].

За результатами проведених досліджень (2002–2005 рр.) було опубліковано серію монографій, у яких детально проаналізовано умови формування та просторового поширення основних видів забруднення і деградації природного середовища зазначених міст.

Аналіз опрацьованих матеріалів вищезазначених авторів дає підстави констатувати кризовий екологічний стан на територіях міст Кривий Ріг та Кам'янське. Встановлено, що для Кривого Рогу притаманний значний рівень забруднення атмосферного повітря, ґрунтів та підземних вод на більшості міських територій, а також високий ступінь техногенної трансформації поверхні внаслідок активізації екзогенних процесів [28]. Найбільший внесок у забруднення атмосферного повітря здійснюють ПАТ «ПівдГЗК» (30,12 %), ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (29,49 %) та ПАТ «ПівнГЗК» (27,78 %).

Зазначені підприємства, спільно з коксохімічним виробництвом та об'єктами енергетичної галузі, є основними джерелами забруднення підземних вод та ґрунтового покриву. За результатами проведених досліджень автори також виокремили низку проблемних аспектів, з якими довелося зіткнутися під час їх виконання:

- розпорошеність, неузгодженість та відсутність системного підходу до збору фактичних даних щодо техногенного впливу на довкілля в межах досліджуваного регіону;

- недосконалість або повна відсутність методологій інтегрального розрахунку та комплексної оцінки сумарного впливу техногенних чинників на стан навколишнього середовища і здоров'я населення.

Результати гідрогеологічних досліджень, проведених у південній частині Кривбасу протягом 1950–2016 років [73], свідчать, що відкритий видобуток залізорудних копалин [74] та процеси їх збагачення [35] супроводжуються накопиченням значних обсягів промислових відходів. Складування розкривних порід, формування хвостосховищ, а також експлуатація накопичувачів високомінералізованих шахтних і кар'єрних вод створюють суттєве статичне навантаження на земну поверхню. Це спричиняє деформацію геологічних структур як у зонах безпосереднього розміщення об'єктів, так і на прилеглих територіях. Такі зміни впливають на напрямки та інтенсивність фільтрації мінералізованих вод, провокують активізацію екзогенних геологічних процесів [28], сприяють утворенню карстових порожнин, а також зумовлюють незворотні трансформації гідродинамічного та гідрохімічного режимів підземних вод. Гідрогеологічні зміни техногенного походження в районах інтенсивного видобутку залізної руди призводять до дестабілізації земної поверхні, що проявляється у виникненні зсувів, провалів, пливунів та суфозійних процесів. До додаткових негативних чинників належать підтоплення територій, виснаження природних водоносних горизонтів із одночасним формуванням техногенних на раніше здренованих ділянках, а також забруднення водних об'єктів та засолення ґрунтів.

Сучасна операційна діяльність у межах Криворізького залізорудного басейну пов'язана з низкою геоекологічних ризиків. Задля мінімізації аварійності на гідротехнічних спорудах, зокрема на хвостосховищах, а також забезпечення ефективного проєктування їх розширення, необхідно здійснювати комплексну інтерпретацію геологічних та геофізичних даних з урахуванням тектонічного і гідрогеологічного факторів. На прикладі детальних геофізичних досліджень, проведених поблизу ставка-відстійника високомінералізованих шахтних вод у балці Свистуновій (південна частина Криворізького залізорудного басейну), доведено, що інтенсивна тектонічна фрагментація порід зумовлює підвищення фільтраційних характеристик та погіршення їхніх фізико-механічних властивостей. Це, своєю чергою, спричиняє активізацію екзогенних процесів [28] та забруднення підземних вод. З метою мінімізації ризиків запропоновано впровадження регіональної системи сейсмічного моніторингу [3; 72] як ключового компонента екологічного моніторингу Дніпропетровської області. Структура системи передбачає створення центрального вузла управління в м. Дніпро та трьох локальних підсистем, що охоплюватимуть основні гірничодобувні райони: Криворізький залізорудний басейн, Нікопольський марганцеворудний басейн та Західний Донбас. Сьогодні мінерально-сировинна база є одним із пріоритетних напрямів експортного потенціалу України.

Сучасний ресурсний комплекс держави охоплює близько 20 тисяч родовищ, у межах яких видобуваються 113 видів корисних копалин [35], серед яких домінуючу частку становлять залізні руди. Видобуток корисних копалин супроводжується інтенсивним техногенним впливом на довкілля. У Криворізькому районі додаткове антропогенне навантаження, зумовлене експлуатацією хвостосховищ залізної руди обсягом близько 3 млрд тонн (з висотою дамб до 90 м) та відвалами гірничих порід обсягом понад 9 млрд тонн (висотою до 120 м), активізує геомеханічні процеси внаслідок проведення масових вибухових робіт. Це призвело до порушення природного гідрогеологічного режиму значного масиву земної кори (обсягом близько 20

млрд м³ та масою 50 млрд тонн), включаючи шахтні виробітки, відкриті кар'єри та штучні підземні порожнини обсягом близько 50 млн м³. Наразі накопичено ефективний досвід застосування комплексу геофізичних даних для ідентифікації параметрів небезпечних геологічних процесів на територіях гірничих робіт. Використання цих даних у режимі моніторингу є критично важливим для запобігання аварійним ситуаціям на гірничо-гідравлічних спорудах (зокрема хвостосховищах) та забезпечення ефективного проектування їх розширення.

Видобуток корисних копалин супроводжується інтенсивним техногенним впливом на довкілля. У Криворізькому районі додаткове антропогенне навантаження, зумовлене експлуатацією хвостосховищ залізної руди обсягом близько 3 млрд тонн (з висотою дамб до 90 м) та відвалами гірничих порід обсягом понад 9 млрд тонн (висотою до 120 м), активізує геомеханічні процеси внаслідок проведення масових вибухових робіт. Це призвело до порушення природного гідрогеологічного режиму значного масиву земної кори (обсягом близько 20 млрд м³ та масою 50 млрд тонн), включаючи шахтні виробітки, відкриті кар'єри та штучні підземні порожнини обсягом близько 50 млн м³.

Наразі накопичено ефективний досвід застосування комплексу геофізичних даних для ідентифікації параметрів небезпечних геологічних процесів на територіях гірничих робіт. Використання цих даних у режимі моніторингу є критично важливим для запобігання аварійним ситуаціям на гірничо-гідравлічних спорудах (зокрема хвостосховищах) та забезпечення ефективного проектування їх розширення.

Варто зазначити, що розташування даної водойми є геологічно та гідрогеологічно недоцільним. Зазначена балка приурочена до регіонального розлому з вираженими ознаками тектонічної активності. Інтенсивна тектонічна роздробленість порід спричиняє підвищення їхніх фільтраційних характеристик та погіршення фізико-механічних властивостей, що, своєю чергою, активізує суфозійно-карстові процеси [25]. Ризик виникнення цих

явищ зростає пропорційно до рівня техногенного навантаження, зокрема під час надмірного наповнення водойми шахтними водами. Наслідком цього є аварійне спорожнення резервуара та забруднення підземних вод.

Варто зазначити, що формування системи екологічного моніторингу Дніпропетровської області, як і загалом України, розпочалося у 1992 році. Наразі функціонують лише окремі її сегменти. Сучасним етапом розвитку цієї системи є невідкладне створення локальної мережі сейсмічного моніторингу Кривого Рогу, що передбачає інструментальні сейсмологічні спостереження на базі станції УК-15 із безпосереднім зв'язком із Національним центром сейсмологічних даних у Києві. Реалізація цього проєкту є критично важливою не лише для точної локалізації місцевих землетрусів та зон активізації тектонічних структур з індукованою сейсмічністю, а й для обґрунтування та уточнення просторових параметрів загальної мережі моніторингу довкілля. Пропонується створення регіональної системи сейсмічного моніторингу як ключового компонента системи екологічного моніторингу Дніпропетровської області. Центр управління системою доцільно розмістити у м. Дніпро на базі сейсмологічної станції МІ05, що функціонує з 2014 року. Структура системи передбачає розгортання трьох локальних підсистем у провідних гірничодобувних районах області — Кривбасі, Нікопольському марганцевому басейні та Західному Донбаському вугільному басейні — з інтеграцією чотирьох сейсмічних станцій у кожній із них. Додатково необхідно встановити щонайменше дві «фонові» станції для моніторингу Українського щита та схилу Дніпровсько-Донецької западини.

На прикладі Південного Кривбасу обґрунтовано взаємозв'язок між зростанням техногенного навантаження та сучасною геодинамічною активізацією регіону. Зазначена територія характеризується концентрацією значних обсягів промислових відходів, які наразі розглядаються як перспективні техногенні ресурси [47]. З огляду на високу ймовірність виникнення техногенно-природних надзвичайних ситуацій та активізації небезпечних екзогенних процесів [28], постає необхідність проведення

комплексних геофізичних, зокрема сейсмологічних, досліджень для моніторингу стабільності приповерхневого шару та цілісності відвалів гірничих відходів [65]. Результати інтегрованої тектонічної [48] та гідрогеологічної інтерпретації даних повторного геофізичного моніторингу (на ділянці водойми-накопичувача високомінералізованих шахтних вод у балці Свистунова) слугують фундаментальною основою для розроблення локальних систем екологічного моніторингу територій, прилеглих до об'єктів складування відходів гірничодобувної промисловості Південного Криворіжжя [73].

Зокрема, отримані дані дозволили ідентифікувати та локалізувати зони потенційного геоекологічного впливу [27; 60-61], зумовленого фільтрацією мінералізованих вод із зазначеного сховища, що становить загрозу для гідрогеологічного стану населених пунктів у басейні річки Інгулець.

1.4 Шляхи удосконалення геолого-екологічних досліджень в Кривбасі

Встановлено, що на стан та динаміку процесів у верхній частині розрізу (ВЧР) впливають екзогенні [28] (атмосферні та поверхневі) і техногенні [47] (фізико-хімічні та енергетичні) чинники, а також ендегенні фактори (сучасні геодинамічні процеси). Джерела техногенного впливу на геологічне середовище характеризуються варіативністю просторово-часових параметрів та речовинного складу:

- за просторовою локалізацією: точкові (скидання стічних вод у водойми або свердловини тощо), лінійні (витоки з трубопроводу, забруднення вздовж шляхів сполучення, каналів тощо) та площинні (орні землі, урбанізовані території, промислові зони тощо);
- за часовими характеристиками: постійні, періодичні (з різною частотою) та імпульсні;

- за інтенсивністю: слабкі, середні та сильні, що зумовлюють формування відповідних аномалій фізичних полів відносно фонових природних значень;
- за впливом на гідрогеологічні умови: зі зміною режиму чи хімічного складу підземних вод, зокрема внаслідок міграції нових геохімічних елементів (внаслідок процесів піритизації, окислення тощо).

Геологічні характеристики ВЧР, зокрема рельєф, склад гірських порід, стан поверхневих і підземних водоносних горизонтів, а також розвиток приповерхневих фізико-геологічних процесів (зсуви, просідання, карст, геодинамічні явища), виступають визначальними природними факторами. У разі порушення технологічного циклу вони призводять до нерівномірного техногенного навантаження на геологічне середовище, що відображено на схемі (рис. 1.2).

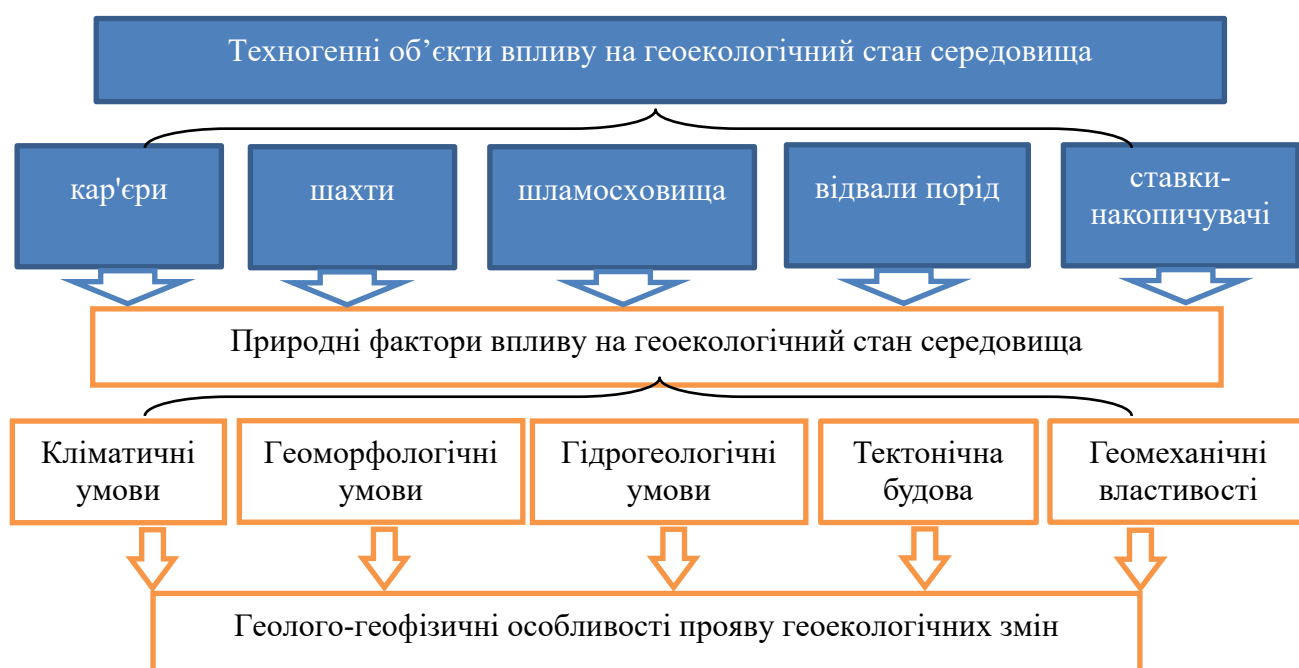


Рис. 1.2. Природні та техногенні фактори, що впливають на розповсюдження забруднення (за Маяковим, 2001 [34] та Остапчуком, 2010 [41])

Як відображено на схемі, природна складова характеризується сталістю, тоді як техногенна — динамічністю. Поширення останньої зумовлене кліматичними, геоморфологічними та гідрогеологічними умовами,

тектонічною структурою, а також геомеханічними властивостями геологічного середовища Кривбасу.

Вітчизняний та міжнародний досвід свідчить, що отримання оперативних даних про стан природно-геологічного середовища без порушення його цілісності забезпечується застосуванням геофізичних методів. Актуальність розвитку та впровадження цих методів [62] при вирішенні геоекологічних завдань (зокрема, у межах комплексного моніторингу) зумовлена зобов'язаннями України згідно з міжнародними угодами та конвенціями, які передбачають оперативне збирання інформації про стан довкілля та прогнозування динаміки його змін.

Сучасний розвиток системи геоекологічного моніторингу в Україні повинен здійснюватися з урахуванням загальноєвропейських вимог. Відповідно до Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» та розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.04.2021 № 443-р затверджено головний механізм реалізації Стратегії — Національний план дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року, а також розпочато впровадження положень Закону України № 2973-IX щодо функціонування державної системи моніторингу довкілля, що забезпечує інтеграцію екологічних показників до єдиної цифрової платформи «ЕкоСистема» та гармонізацію з вимогами ЄС, де визначено конкретні заходи поетапного досягнення стабілізації і поліпшення геоекологічного стану навколишнього природного середовища України.

Реалізація державних та регіональних програм потребує забезпечення безперервності моніторингу компонентів геологічного середовища, а також оптимізації нормативно-правового, методичного, технічного та організаційного базису для формування єдиної мережі спостережень. Зазначені заходи передбачають здійснення комплексного контролю стану атмосферного повітря, водних ресурсів, земельного фонду, лісових насаджень,

геологічного середовища, біорізноманіття, а також поводження з відходами та рівня впливу фізичних факторів на довкілля.

Промислові відходи [36], накопичені протягом останніх півтора століття у Кривбасі, постійно піддаються впливу природних і техногенних чинників (рис. 1.2) [30, 31]. Як було зауважено раніше, забруднення геологічного середовища спричиняє зміну фізичних властивостей верхньої частини розрізу, що призводить до трансформації наявних або виникнення нових геофізичних аномалій різної інтенсивності та частотних характеристик. Виявлені аномалії можуть бути зумовлені як безпосереднім розташуванням джерел забруднення, так і процесами їх міграції разом із повітряними масами, підземними водами чи внаслідок переміщення гірських порід, що спричиняє геоекологічні зміни на раніше чистих територіях Кривбасу. Геофізичні методи досліджень [53; 54] дозволяють здійснювати моніторинг таких аномалій без прямого втручання в геологічне середовище. Виконання повторних спостережень дає змогу розробляти динамічні карти забруднення геологічного середовища. Перспективи ефективного застосування геофізичних методів [62] для вирішення інженерно-геологічних та геоекологічних завдань обґрунтовані в працях Г. С. Вахромеєва, А. А. Огільві, В. А. Богословського, В. К. Хмелевського, Е. Д. Кузьменка, С. А. Вижви, О. К. Тяпкіна, П. Г. Пігулевського та інших фахівців. Доведено, що застосування геофізики є обґрунтованим завдяки аналізу значної кількості фізичних полів, які об'єктивно відображають статичні та динамічні характеристики геологічного середовища, зокрема параметри, що визначають його геоекологічний стан (через геолого-петрографічні, гідрологічні, фізико-геохімічні та інші характеристики). Геофізичними методами ефективно досліджується стан, стійкість, мінливість геодинамічних, гідрогеологічних, геохімічних та інших геоекологічних процесів у геологічному середовищі, через інформації про стан геофізичних полів, їх зміни у просторі та часі.

Використання сучасних геофізичних методів можуть забезпечити:

- високу детальність вивчення геологічного середовища на порівняно невеликих глибинах (від перших метрів до сотень метрів), які залежать від змін в просторі і в часі фізичних властивостей, водно-фізико-хімічних характеристик в результаті прояву широкого спектру природно-техногенних процесів;
- використання портативних методів і полегшених вимірювальних установок для прискорення досліджень та можливість проведення повторних спостережень;
- застосування декількох (до 3–4) методів з дослідженнями різної фізичної природи для підвищення достовірності одержуваної інформації;
- широке використання бурових свердловин і гірничих виробок, проходка яких не складна і фінансово мало затратна при невеликих глибинах розвідки.

Накопичений досвід застосування геофізичних методів [62] у поєднанні з даними щодо тектонічної [48] та геологічної будови, а також гідрогеологічного режиму, дає змогу оперативно та неруйнівним способом досліджувати поширення забруднень у верхній частині розрізу (ВЧР). Зазначений напрям досліджень потребує подальшого розвитку, зокрема шляхом розробки методик прогнозування геоекологічного впливу промислових об'єктів на геологічне середовище, створення системи просторово-часового моніторингу його компонентів, а також формування прогностичних моделей геоекологічних змін для обґрунтованого прийняття управлінських рішень.

1.5 Висновки до розділу

Проведений аналіз сучасного стану вивченості території Криворізького залізорудного басейну та опрацювання літературних і фондових джерел за темою дисертаційної роботи показав, що досліджуваний район характеризується складними природно-техногенними умовами формування

геологічного середовища та належить до найбільш інтенсивно освоєних гірничопромислових територій України.

Багаторічне функціонування гірничодобувних підприємств, розвиток відкритих і підземних гірничих робіт, накопичення значних обсягів промислових відходів, будівництво та експлуатація хвостосховищ, ставків-накопичувачів і відвальних масивів спричинили суттєву трансформацію природного стану геологічного середовища та активізували комплекс взаємопов'язаних геодинамічних і гідрогеологічних процесів.

Аналіз різних геологічних, інженерно-геологічних, гідрогеологічних і геоecологічних досліджень, проведених у різні роки, показав, що природні особливості Кривбасу — складна тектонічна будова, висока тріщинуватість кристалічних порід, нерівномірність та неоднорідність четвертинних відкладів і сильна розчленованість рельєфу — разом з потужним техногенним навантаженням створюють умови для активного розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів. Серед цих процесів найбільш типові — підтоплення, підвищення рівня ґрунтових вод, локальне заболочування, суфозійні явища, деформації земної поверхні, ерозія та порушення фільтрації на досліджуваній території.

Техногенні об'єкти гірничодобувного комплексу сильно впливають на природний гідрогеологічний режим. Це великі хвостосховища, шламонакопичувачі, кар'єри і породні відвали. Коли техногенні об'єкти працюють, вони додають техногенне навантаження на геологічне середовище. Техногенні об'єкти порушують баланс поверхневих і підземних вод, змінюють напрямки фільтраційних потоків і створюють локальні зони водонасичення. Через це з'являються ділянки потенційної нестійкості порід та змінюються фізико-механічні властивості ґрунтів. Через це погіршується екологічний стан території. Особливо актуальними такі процеси є в межах виробничих майданчиків гірничо-збагачувальних комбінатів, де концентрація техногенного впливу поєднується зі складною геологічною будовою та високою інтенсивністю сучасних виробничих процесів.

Опрацьовані матеріали свідчать, що, незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень, низка питань залишається недостатньо деталізованою, особливо щодо просторової диференціації зон техногенного перезволоження, оцінки сучасного стану верхньої частини геологічного розрізу та своєчасного виявлення потенційно небезпечних змін у межах територій інтенсивного техногенного освоєння. Існуючі архівні та літературні матеріали формують надійну інформаційну основу, однак потребують уточнення з використанням сучасних підходів і методів дослідження, здатних оперативно відображати актуальний стан геологічного середовища.

Узагальнення результатів аналізу підтвердило доцільність і наукову обґрунтованість застосування комплексу геофізичних методів у межах територій гірничопромислового освоєння Кривбасу. Використання геофізичних досліджень дає можливість деталізувати геологічну будову приповерхневої частини розрізу, виявляти зони підвищеного водонасичення та порушення структури порід, оцінювати вплив техногенних об'єктів на геологічне середовище, а також здійснювати моніторинг розвитку небезпечних процесів у динаміці.

Отже, аналіз показав, що тема дисертації актуальна та важлива і для науки, і для практики, і це створює методичну основу для нових досліджень. Нові дослідження будуть вивчати геологічне середовище в Криворізькому залізорудному басейні.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНИХ ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У данній дисертаційній роботі було застосовано комплекс геофізичних, інженерно-геологічних, дистанційних та геоінформаційних методів дослідження.

Під час написання дисертації застосовували переважно методи вертикального електричного зондування (ВЕЗ) та природного поля (ПП), які використовувалися для вивчення геоелектричної будови розрізу досліджуваної території, визначення потужностей інженерно-геологічних елементів та положення водоносних горизонтів. Інтерпретація геофізичних даних виконувалася з урахуванням матеріалів інженерно-геологічних та гідрогеологічних вишукувань, зокрема результатів буріння та спостережень за рівнем ґрунтових вод.

Для виявлення просторових закономірностей підтоплення [26] території Кривбасу та техногенного впливу автор використовував супутникові знімки, як один із методів дистанційного зондування Землі.

Узагальнення та інтеграція різнорідних даних здійснювалися із застосуванням геоінформаційних систем шляхом просторового аналізу та побудови тематичних карт, що дозволило виконати комплексну оцінку інженерно-геологічних умов досліджуваної території.

2.1 Огляд геофізичних методів, використаних у дисертаційному дослідженні

При сприятливих геолого-гідрогеологічних умовах комплексом геофізичних методів можуть вирішуватися ряд важливих питань, які пов'язані з пошуками підземних вод:

- виділення водотривких і водовмісних осадових відкладів, які характеризуються підвищеними фільтраційними властивостями;

- виявлення структур сприятливих для пошуків пластових вод;
- оцінка потужності осадових відкладів;
- оцінка фільтраційних характеристик ґрунтів;
- вивчення ділянок підтоплення.

Електророзвідка є одним із найбільш поширених геофізичних методів, що дає змогу вивчати диференційовану геоелектричну будову розрізу для дослідження геологічного середовища. У більшості випадків між питомим електричним опором гірських порід та їх фільтраційними властивостями простежується тісний взаємозв'язок, завдяки чому набули широкого застосування електророзвідувальні методи при вирішенні гідрогеологічних та інженерно-геологічних завдань. Найчастіше дослідження виконуються із використанням методів вертикального електричного зондування (ВЕЗ), дипольного електричного зондування (ДЕЗ), а в окремих випадках – симетричного електропрофілювання (СЕП). У попередні роки для аналогічних досліджень також використовувалися колове електропрофілювання (КЕП), дипольне електропрофілювання (ДЕП) та дипольне осьове зондування (ДОЗ).

За результатами електророзвідувальних спостережень виділяються ділянки практично непроникних порід із питомим електричним опором понад 40 Ом·м, слабкопроникних відкладів з опором від 15 до 40 Ом·м та проникних порід, для яких характерні значення опору в межах 8–15 Ом·м.

Отримані дані широко використовуються під час пошуків тріщинно-жильних і пластових підземних вод, виявлення та трасування зон підвищеної тріщинуватості й тектонічних порушень, вивчення гіпсометрії покрівлі кристалічних порід, визначення сумарної потужності пухких відкладів і оцінки їх фільтраційних властивостей. Крім того, електророзвідувальні методи є ефективним засобом картування зон підтоплення, поширення мінералізованих підземних вод та встановлення напрямків міграції розчинених солей [26; 88–91].

Електророзвідувальні методи можуть виконуватися як із застосуванням постійного, так і змінного струму. Водночас використання методів змінного

струму в межах гірничопромислових районів Кривбасу є малоефективним через значну кількість електромагнітних перешкод, джерелами яких виступають гірничодобувне обладнання, технологічні комплекси шахт і кар'єрів, збагачувальні підприємства, а також потужні лінії електропередач. З огляду на це та з урахуванням результатів аналізу літературних джерел для дослідження поширення високомінералізованих вод від хвостосховищ, ставків-накопичувачів та інших техногенних об'єктів у межах південного гірничопромислового району Кривбасу було обрано комплекс електророзвідувальних методів, до складу якого увійшли вертикальне електричне зондування (ВЕЗ), метод природного поля (ПП) та електротомографія (ЕТ).

Вертикальне електричне зондування належить до групи методів опорів і базується на визначенні значень уявного питомого електричного опору за допомогою установки АМНВ. Під час проведення вимірювань центр установки залишається незмінним, тоді як відстань між живильними електродами А та В послідовно збільшується. Оскільки зі збільшенням розносів зростає глибина проникнення електричного струму в геологічне середовище, результати спостережень характеризують дедалі більший об'єм порід. У випадку електрично однорідного середовища значення уявного питомого опору відповідає істинному опору порід, а крива ВЕЗ, побудована в логарифмічному масштабі як залежність ρ_k від напіврозносу $AB/2$, набуває вигляду прямої лінії, паралельної осі розносів. Якщо геологічний розріз складається кількома шарами з різними електричними властивостями, характер зміни значень уявного питомого опору відображає особливості їх просторового розташування та електричної неоднорідності.

На малих розносах відображається будова та характеристики верхньої частини розрізу. Подальше збільшення відстані між живильними електродами призводить до проникнення струму в нижчі горизонти, що супроводжується зміною значень уявного питомого опору залежно від співвідношення електричних характеристик суміжних шарів. Наявність додаткових меж

поділу між шарами також відображається на формі кривої зондування, яка містить інформацію про кількість горизонтів, їх потужність та питомий електричний опір.

Інтерпретація кривих ВЕЗ дозволяє встановлювати особливості геоелектричної будови розрізу, визначати кількість і параметри окремих горизонтів, а також зіставляти виділені електричні шари з геологічними елементами, отриманих для досліджуваної території.

Найбільшого поширення *метод ВЕЗ* набув під час вирішення структурних завдань, пов'язаних із пошуками та розвідкою нафтових, газових і вугільних родовищ, дослідженням розсипних покладів корисних копалин, виконанням інженерно-геологічних вишукувань і вивченням геологічної будови рудних районів [74]. Ефективність його застосування забезпечується наявністю достатньої диференціації порід за питомим електричним опором, відносно пологого залягання геологічних горизонтів та слабкорозчленованого рельєфу місцевості.

Метод *природного поля* ґрунтується на дослідженні природних постійних електричних полів, джерела яких не контролюються спостерігачем. Такі поля формуються внаслідок перебігу окисно-відновних, фільтраційних і дифузійно-адсорбційних процесів у геологічному середовищі. Основною метою польових спостережень є реєстрація параметрів цих полів, тоді як інтерпретація отриманих результатів спрямована на встановлення природи та характеристик джерел їх формування.

Дослідження природних електричних полів окисно-відновного походження широко застосовуються під час пошуків сульфідних родовищ. Вивчення фільтраційних полів дає можливість встановлювати місця виходу підземних вод, оцінювати напрями їх руху та особливості фільтраційних процесів під час гідротехнічних і гідрогеологічних досліджень. Формування електричних полів окисно-відновної природи пов'язане з процесами розділення зарядів у ході окиснення речовини. Для виникнення таких полів необхідний контакт середовищ з різними типами електропровідності та

наявність відмінностей у фізико-хімічних умовах на різних ділянках цього контакту. У природних умовах подібні процеси характерні для сульфідних рудних тіл, графітизованих порід та антрацитів, розташованих у водонасичених породах з іонною провідністю.

Практичне застосування методу природного поля визначається генезисом досліджуваних аномалій. Окисно-відновні поля характерні для сульфідних руд, зон піритизації та графітизації, покладів антрациту, а також ділянок корозії металевих конструкцій у ґрунтах. Інтенсивні фільтраційні поля формуються в областях живлення та розвантаження підземних вод, районах розвитку карстових процесів [25] і в межах гідротехнічних споруд, де відбувається фільтрація води через земляні греблі. Дифузійно-адсорбційні поля зазвичай мають невелику інтенсивність і рідко впевнено реєструються під час наземних спостережень. Основними чинниками, що ускладнюють виконання робіт методом природного поля, є магнітотелуричні поля, блукаючі струми та струми катодного захисту магістральних трубопроводів.

Електротомографія являє собою сучасний комплекс електророзвідувальних досліджень. Характерною особливістю методу є багаторазове використання одних і тих самих електродів як живильних і приймальних елементів вимірювальної системи. Електротомографія ефективно застосовується для вивчення геоелектричних розрізів зі складною будовою, що істотно відрізняються від горизонтально-шаруватих моделей, зокрема при дослідженні рудних зон, тектонічних порушень [48], зсувних процесів, насипних і техногенних ґрунтів, карстових утворень.

Польові вимірювання виконуються за допомогою системи електродів, рівномірно розташованих уздовж профілю спостережень. Керування підключенням електродів здійснюється багатоканальним комутатором. Основною перевагою методу є можливість одночасного вивчення геоелектричної будови як уздовж профілю, так і за глибиною. Під час виконання вимірювань послідовно реалізуються різні конфігурації живильних і приймальних електродів, що дозволяє отримувати значний обсяг інформації

про розподіл електричних властивостей середовища. Для проведення досліджень використовуються двохелектродні, трьохелектродні та чотириелектродні установки, зокрема схеми Шлюмберже, Веннера та дипольні установки типу ABMN.

Важливою перевагою цього методу є можливість побудови 2D геоелектричних моделей, які більш повно відображають реальну будову геологічного розрізу. Завдяки цьому можливо більш ефективно дослідити зони тектонічних порушень, ділянок підвищеної тріщинуватості, карстово-суфозійних утворень, техногенних об'єктів, зон підтоплення та поширення високомінералізованих підземних вод.

2.2 Теоретико-методичні передумови використання геоелектричних методів та електричні властивості порід в геологічних умовах Кривбасу

Електричні властивості гірських порід зумовлені комплексом факторів, зокрема речовинним складом, структурними особливостями, ступенем тріщинуватості та рівнем водонасичення. Суттєвий вплив на ці показники також мають мінералізація пластових флюїдів, коефіцієнт пористості та гіпсометричне положення порід відносно рівня ґрунтових вод.

Зокрема, для пісків, що залягають у водоносних горизонтах, показник питомого електричного опору варіюється в межах 10–1500 Ом·м, що безпосередньо залежить від ступеня насичення водою. Для супісків та суглинків у межах досліджуваної ділянки цей показник переважно становить 20–150 Ом·м. Питомий опір глин, залежно від ступеня їх ущільнення та зволоження, не перевищує 20 Ом·м. Найвищі значення електричного опору притаманні породам кристалічного фундаменту, де вони сягають від сотень до тисяч і більше Ом·м. При цьому у зонах вивітрювання корінних порід спостерігається зниження електричного опору, який у корі вивітрювання може зменшуватися до 10 Ом·м. Водоносні горизонти часто приурочені до

вивітрілої частини корінних порід, що зумовлює підвищення електропровідності кори вивітрювання.

Дослідження меж та ступеня підтоплення [26] південної частини Кривбасу здійснювалося переважно із застосуванням геоелектричних методів, у зв'язку з чим автором було проведено детальний аналіз та характеристику електричних властивостей порід (табл. 2.1, 2.2).

Таблиця 2.1

Електричні властивості порід (питомий опір)

№ п/п	Назва порід	Стан гірської породи	Питом. електр. опір в Ом·м	
			За РБН 43-74 Держбуду РРФСР	ПРШГ (параметрія) 1983-1985р.
1	2	3	4	5
1.	Грунтовий пласт (насіпні ґрунти)	вологий	50–10000	—
2.	Піски	маловологі	400–1500	150–240
		вологі	150–200	80–150
		насичені водою	40–100	—
3.	Супіски	тверді і пластичні	40–170	16–82
		текучі	20–70	—
4.	Суглинки	тверді і м'які, пластичні	18–44	11–170
		текучепластичні і текучі	16–36	—
5.	Глини	тверді і м'які, пластичні	2,0–26	6–28
		текучепластичні і текучі	1,0–16	—
6.	Граніти	вивітрілий	30–400	—
		невивітрілий	250–10000	—
7.	Кора вивітрювання*	каолінітова	40-100	—
8.	Кора вивітрювання*	жорств'яна	100-280	—
9.	Кристалічні породи*	монолітні	більше 2000	—

Таблиця 2.2

**Результати визначення уявного опору порід в природному заляганні
мікроустановками СЕП і ВЕЗ безпосередньо на площі досліджень**

№ п/п	Назва порід	Кількість спостережень	Середнє значення, Ом·м
1	2	3	4
1.	Суглинки щільні	8	109
2.	Суглинки гумусовані (сухі)	6	131
3.	Суглинки червоно-бурі (слабко вологі)	8	30
4.	Суглинки чорні (викопний ґрунт)	6	103
5.	Суглинки бурі (слабко вологі)	11	82
6.	Глина світло-коричнева (волога)	8	10
7.	Глина з невеликою домішкою піску (слабоволога)	8	26
8.	Глина волога	8	16
9.	Супісок (глинистий пісок) червоно-бурий з включеннями світлого піску	5	28
10.	Супісок червоно-бурий	8	18
11.	Супісок, що переходить у пісок різнозернистий	9	53
12.	Супісок бурий (слабко вологий)	11	82
13.	Пісок (слабко вологий)	6	106
14.	Пісок сухий	8	160
15.	Пісок вологий, різнозернистий	7	50
16.	Вапняк черепашковий (порушений, слабовологий)	8	193
17.	Вапняк оолітовий (порушений, вологий)	5	100
18.	Вапняк сильно порушений (пухкий)	17	53
19.	Вапняк вивітрений	8	474
20.	Вапняк щільний (сухий)	8	548

При використанні методу опорів шляхом розміщення на денній поверхні, у свердловинах або гірничих виробках системи точкових чи дипольних джерел генерується первинне поле [30]. Це поле впливає на розподіл питомого електричного опору в гірських породах, який є функцією просторових координат: $\rho = f(\rho(x, y), z(x, y))$.

Для одиничного точкового джерела струму, згідно із законом Ома, справедлива наступна формула:

$$\rho_y = \frac{E_{MN}}{j_o} = \frac{\frac{dU}{dr}}{\frac{I}{2\pi r^2}} = \frac{\rho_{MN} j_{MN}}{j_o} = \frac{E_o + E_{ANOM}}{j_o} = \rho_{MN} + d\rho_{AMON} \quad (2.1)$$

де E_{MN} – напруженість електричного поля поблизу приймальних

електродів, $\mathbf{j}_0$ – густина струму електричного поля точкового джерела в однорідному півпросторі, I — струм, що стікає із точкового електрода A , r – відстань між живильним електродом A і центром вимірювальної лінії MN , ρ_{MN} – питомий електричний опір середовища на поверхні якого заземлені приймальні електроди, $\mathbf{j}_{MN}$ – реальна густина струму в центрі вимірювальної лінії, E_0 — нормальне електричне поле точкового джерела в однорідному півпросторі з питомим опором $\rho_0 = 1$ Ом·м, E_{ANOM} – аномальна складова електричного поля зумовлена присутністю неоднорідностей, $\partial\rho_{ANOM}$ – аномальна складова уявного опору.

Для стрижневих електродів, розміщених на відстанях від живильного електрода, що значно перевищують глибину заземлення, потенціал може бути розрахований за формулою точкового джерела. У такому разі різниця потенціалів між вимірювальними електродами визначається наступним чином:

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \quad (2.2)$$

Це дозволяє встановити опір однорідного середовища, що заповнює нижній півпростір:

$$\rho = \frac{\Delta U_{MN}}{I} \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \right) \quad (2.3)$$

$$\text{Вводячи позначення } K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}, \quad (2.4)$$

отримаємо остаточно:

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (2.5)$$

де K — геометричний коефіцієнт установки, який залежить виключно від взаємного розташування живильних та приймальних електродів.

Оскільки реальне геологічне середовище, що досліджується методами електророзвідки, не є ідеально однорідним півпростором, підстановка результатів вимірювань у наведену формулу дає не істинне значення питомого опору, а величину, що називається уявним опором (ρ_y в Ом·м).

При використанні будь-якої практичної установки виміряне електричне поле нормується відповідно до її параметрів. Це забезпечує збіг уявного опору з істинним опором середовища у випадку його однорідності, що дозволяє обчислювати уявний опір за формулою:

$$\rho_y = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}, \quad (2.6)$$

де ΔU_{MN} – різниця потенціалів між приймальними електродами (M і N), I – струм у лінії живлення AB , K – коефіцієнт установки.

Для симетричної установки $AMNB$ (рис. 2.1):

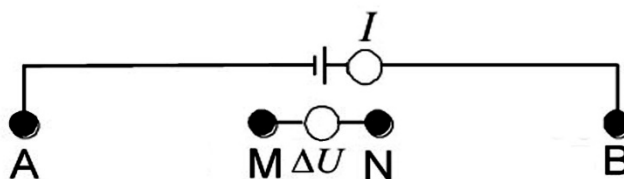


Рис. 2.1. Симетрична чотирьохелектродна установка

$$K = \frac{\pi \cdot AM \cdot AN}{MN} \quad (2.7)$$

З урахуванням натурних досліджень оптимальні розміри установки повинні задовольняти наступним вимогам.

Відстані між приймальними електродами потрібно брати достатньо малими, щоб виконувалась умова $\Delta U_{MN}/MN \approx E_{MN}$

де E_{MN} – напруга електричного поля в центрі MN .

Аномальні ефекти зумовлені контрастом питомого електричного опору між об'єктом пошуку та вміщувальним середовищем.

Питомий електричний опір більшості осадових гірських порід залежить від їхньої мінералізації, пористості, вологості, глинистості та температури. Згідно з моделлю піщано-глинистих порід, вони складаються з мінерального

скелета, пор, заповнених водою й глинистим матеріалом, та пор, заповнених повітрям. Відповідно до формули В. М. Дахнова [87], питомий опір гірських порід (ρ_p) розраховується як добуток опору пластової води на відповідні коефіцієнти, що враховують вплив вищезазначених чинників.

$$\rho_p = P_n \cdot P_v \cdot P_z \cdot P_m \cdot \rho_v, \quad (2.8)$$

де P_n – параметр пористості, P_v – параметр вологості, P_z – параметр глинистості, P_m – параметр температури, ρ_v – питомий опір води. Параметр пористості пов'язано в загальному вигляді із самою пористістю формулою Арчі $P_n = a/n^m$, де a – структурний коефіцієнт (для більшості осадових порід a змінюється від 0,5 до 1), n – пористість (для піску n реально може бути від 0,1 до 0,3) і m — показник цементації, який змінюється від 1,3 до 2,3.

Перед початком польових робіт здобувачем було проведено аналіз стандартних установок, що застосовуються в методах електророзвідки. Враховуючи високе техногенне навантаження на досліджуваній території, а також вплив екзогенних процесів та значну сучасну тектонічну активність, було обґрунтовано специфіку розподілу поверхневих і підземних вод, що визначає подальшу методологію досліджень.

Під час виконання польових геофізичних робіт (2018–2021 рр.) методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) застосовувалася апаратура: генератори ГЕР-1/300 та АНЧ-3, а також вимірювачі ЕІН-209М і МЕРІ-24. Вимірювання здійснювалися з використанням низькочастотного змінного струму (4,88 Гц) за симетричною установкою Шлюмбергера з дотриманням відповідних вимог до електродної бази: застосовувалися мідні приймальні (МВ) та сталеві живильні (АВ) електроди.

Для виконання робіт методом природного поля (ПП) використовувався прилад АЕ-72 у комплексі з парою неполяризуючих електродів.

З метою підвищення роздільної здатності та якості даних в умовах високого рівня промислових перешкод кількість точок зондування було збільшено в 1,7 раза порівняно зі стандартними методичними вимогами.

Вимірювання проводилися для значень напіврозмахів живильної лінії АВ/2: 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 11; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 110 та 150 м.

Етап планування польових робіт передбачав аналіз супутникових знімків території досліджень із урахуванням чинних методичних рекомендацій щодо їх інтерпретації.

2.3 Методичні особливості виконання польових електророзвідувальних робіт території південного Кривбасу

Ключовим завданням досліджень стало виявлення водопровідних та водотривких горизонтів, що характеризуються диференційованими показниками геоелектричного опору. На основі аналізу наявної петрофізичної [63] та інженерно-гідрогеологічної інформації було виконано розрахунок параметрів геометричного коефіцієнта для електророзвідувальної апаратури.

Обґрунтування методики польових робіт передбачало вибір оптимального способу зондування — чотириелектродної симетричної установки (установка Шлюмберже, рис. 2.1) із використанням апаратури АНЧ-3. Визначено такі параметри установки: $AM=NB$, $MN < AB/3$, $R=AB/2$.

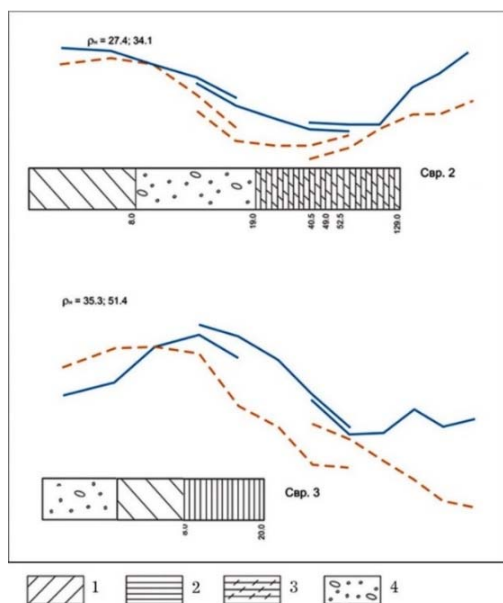


Рис. 2.2. Параметричні криві БЕЗ:

- 1 – суглинки; 2 – глини;
- 3 – мергель;
- 4 – піски з галечником

З огляду на потужність розущільнених утворень та очікувані характеристики геолого-гідрогеологічного розрізу, довжину розносів АВ встановлено на рівні 300 м.

За результатами попередніх досліджень 1984 року було побудовано карту уявного опору для розносу $AB/2 = 150$ м та розроблено схему інженерно-геологічного районування, що дозволило визначити розташування профілів для вивчення гідрогеологічних особливостей середовища. У межах ділянки

підтоплення [26] виконано дослідження на 18 профілях ВЕЗ (рис. 2.2) з кроком спостережень 200 метрів.

Для детальної характеристики верхньої частини зони аерації в межах ділянок відвалів «Лівобережні», хвостосховищ «Войкове» та «Об'єднане» було здійснено комплекс профільних робіт методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) із малими розносами (рис. 2.2).

З метою вивчення динаміки геоелектричних параметрів у різних напрямках на 33 точках було виконано хрестові ВЕЗ. Окрім цього, для верифікації електричних та геологічних показників, а також уточнення меж і потужності літологічних пластів під час якісної та кількісної інтерпретації, безпосередньо поблизу свердловин проведено параметричні ВЕЗ (рис. 2.3). Сумарний обсяг польових спостережень склав 656 фізичних та 439 координатних точок (табл. 2.3).

Для моніторингу часово-просторових змін гідрогеологічної ситуації та відповідної динаміки геоелектричних параметрів порід розрізу було проведено повторні профільні ВЕЗ на чотирьох базових профілях (ПР-10, ПР-11, ПР-12, ПР-13) із чотирирічним інтервалом (рис. 2.3).

Таблиця 2.3

Основні технічні показники робіт по об'єкту площі досліджень

№ п/п	Види робіт, мережа (крок) спостережень, типи приладів і їх номери, прізвище виконавців	Обсяги робіт		Точність		Оцінка якості			брак <u>обсяг</u> %
		з початку робіт		%	факт.	відмінн о <u>обсяг</u> %	добре <u>обсяг</u> %	задов. <u>обсяг</u> %	
		<u>ф.т.</u>	<u>корд.т.</u> ф.т.						
1.	Електророзвідка ВЕЗ, варіант профільний, АВ=300 м, крок-200 м з АНЧ-3	656	<u>439</u> 656	4,4	±3,8%	<u>15</u> 58	<u>9</u> 35	<u>2</u> 7	—

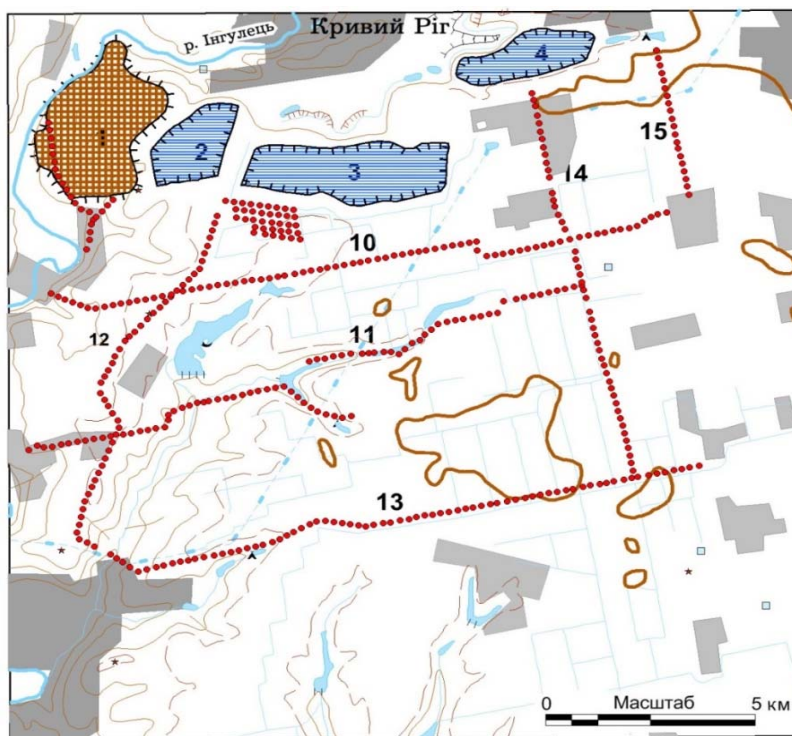


Рис. 2.3. Профілі польових спостережень ВЕЗ та схема розміщення відвалів “Лівобережні” (1); хвостосховищ “Войкове” (2); “Об’єднане” (3); “Миролюбівське” (4)

Повторні профільні вертикальні електричні зондування (ВЕЗ) були виконані на чотирьох базових профілях: ПР-10, ПР-11, ПР-12 та ПР-13 (рис. 2.3). Дослідження проводилися з інтервалом у чотири роки з метою моніторингу динаміки геоелектричних параметрів розрізу, зумовленої просторово-часовими змінами гідрогеологічних умов.

У межах дисертаційного дослідження польові спостереження природного електричного поля здійснювалися методом градієнта за замкненими контурами або ходами, прив’язаними до пунктів із відомими потенціалами геоелектричного поля Землі. Вимірювання на кожному профілі проводилися з урахуванням прив’язки до початкових та кінцевих точок попереднього профілю.

Схему розташування обладнання для вимірювання градієнта природного потенціалу наведено на рис. 2.4 та 2.5.

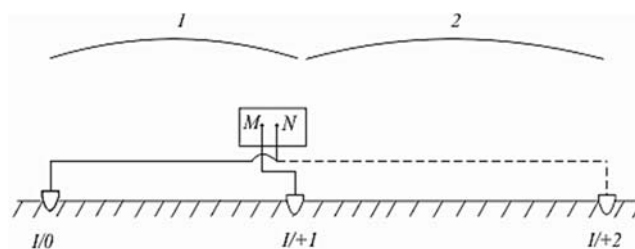


Рис. 2.4. Послідовність вимірів при зйомці методом градієнта (стоянка 1)

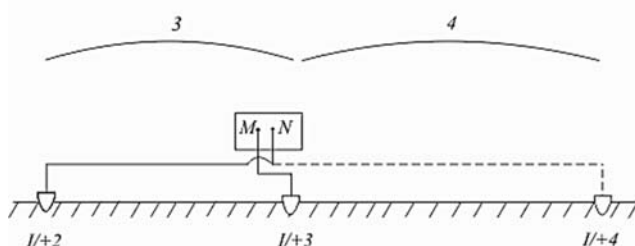


Рис. 2.5. Послідовність вимірів при зйомці методом градієнта (стоянка 2)

Схему розташування обладнання для вимірювання градієнта природного потенціалу наведено на рис. 2.4 та 2.5. Вимірювальний прилад розміщувався поблизу одного з електродів, при цьому клему М з'єднували з найближчим електродом за допомогою короткого провідника (1,5–2,0 м). Другий електрод приєднувався до клемі N провідником довжиною 10 метрів. Вимірювальна установка переміщувалася вздовж лінії спостережень. На етапі підготовчих робіт було створено опорний полігон, що слугував базою для геодезичної прив'язки спостережень на інших профілях. Польові вимірювання проводилися методом прямого та зворотного ходу вздовж досліджуваних профілів. Для мінімізації впливу поляризації електродів на кожній точці здійснювалося підсумовування показників з метою отримання середнього значення. Застосований алгоритм перестановки електродів дозволив нівелювати похибку поляризації шляхом взаємного компенсування знакозмінних величин під час розрахунку потенціалів. Довжина профілів спостережень становила 1400–1600 м, залежно від специфіки поставлених геологічних завдань. Польові роботи виконувалися згідно з нормативними

вимогами «Інструкції з електророзвідки» (Мінгео СРСР, Л.: «Надра», 1984 р.). Загальний обсяг робіт, з урахуванням контрольних вимірів та повторних ходів, склав 656 фізичних точок. Середня відносна похибка зйомки зафіксована на рівні 4,6%.

Повторні геофізичні спостереження були виконані у липні 2024 року за тією ж методикою та на тих самих пунктах з метою порівняння отриманих результатів.

2.4 Методичні основи застосування диференційних характеристик при інтерпретації кривих ВЕЗ

Попередній аналіз результатів раніше виконаних гідрогеологічних, інженерно-геологічних матеріалів для Криворізького басейну [1,3] і геофізичних досліджень [9,10,11] на території, прилеглої до південної частини м. Кривий Ріг, показав наявність постійних змін стану гідрогеологічного середовища [7].

Аналіз результатів геоелектричних досліджень Дніпропетровської геофізичної експедицією (ДГЕ) «Дніпрогеофізика» засвідчив про необхідність їх більш поглибленої якісної обробки за рахунок використання диференційних характеристик спостереженого електричного поля. Проблема мінералізації підземних вод дуже гостро стоїть на території Кривбасу. Особливу роль відіграє тектонічна будова території, яка безпосередньо відображається на протіканні всіх природних та техногенних процесів. Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом в межах Кривбасу формує в кристалічному фундаменті різнорангову систему розломів [5]. Дрібні тектонічні порушення і пов'язані з ними зони підвищеної проникливості впливають на формування і швидкість наземних негативних геологічних і техногенних процесів – підтоплення, формування ділянок просідання ґрунту та провалів, утворення зсувів. З тектонікою [40; 46; 56] також пов'язані особливості форм рельєфу, які визначають напрям

поверхневої та підземної водної фільтрації, а також зони найбільш активної фільтрації підземних вод.

Геофізичні дослідження були виконанні Дніпропетровської геофізичної експедицією (ДГЕ) «Дніпрогеофізика» у 2012 та 2018 рр. методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) [80]. Зондування виконувалося кількома вимірювальними лініями, розмір яких змінювався залежно від відстані між електродами, що живлять. Це дозволяло (при технічно можливих значеннях сили струму в ланцюзі живильних електродів) забезпечити у вимірювальній лінії достатню для вимірювань різницю потенціалів U . Вимірювання виконувались в режимі змінного низькочастотного струму (4.88 Гц) симетричною установкою Шлюмберже з мідними вимірювальними електродами (MN) і сталевими живильними електродами (AB). Застосована послідовність розносів лінії живлення і, відповідно, кількість вимірювань (точок-значень на кривій ρ_k) було обрано в 1,7 рази перевищує стандартне. Це зроблено для збільшення детальності вивчення геоелектричного розрізу, якості робіт в умовах присутності інтенсивних промислових електромагнітних перешкод. При цьому використовувалися такі напіврозноси лінії живлення $AB/2 = 1.5; 2; 3; 4.5; 6; 8; 11; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 110; 150$ м.

Отримані дані свідчать про диференціацію порід із питомого електричного опору геологічного розрізу по площі досліджень. За результатами попередніх досліджень були отримані криві ВЕЗ та побудовані класичні геоелектричні розрізи. На (рис. 2.6), як приклад, показано геоелектричний розріз за одним із досліджуваних профілем № 7. На ньому видно наявність диференціації геологічного середовища за позірним електричним опором.

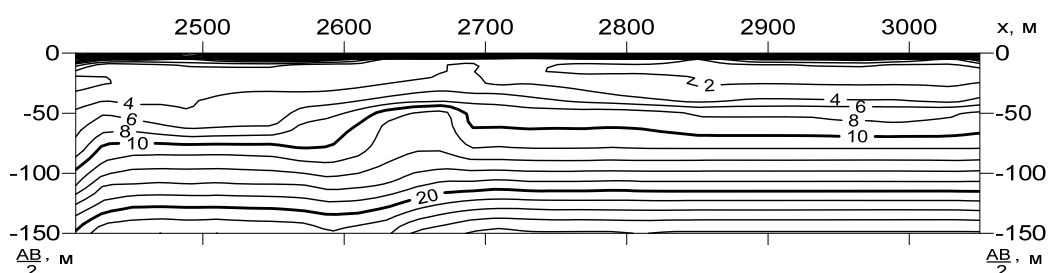


Рис. 2.6. Геоелектричний розріз ізоліній позірного питомого опору (ρ_p) за профілем № 7

Результати польових вимірювань методом ВЕЗ та їх візуалізація були представлені у формі якісних розрізів питомих опорів, середнього значення ρ_p , кривизни поля ρ_p і осьових ліній аномалій цих полів по комплексних геофізичних профілях або по окремих їх інтервалах. При цьому параметри «середнє значення ρ_p », «кривизна ρ_p » та «повний градієнт ρ_p » є статистичними характеристиками, розрахованими відповідно за наведеними формулами:

$$\text{Grad}(\rho_p)_{i,j} = \sqrt{(\rho_{p(i+1)j} - \rho_{p(i-1)j})^2 + (\rho_{p(i,j+1)} - \rho_{p(i,j-1)})^2},$$

$$C(\rho_p)_{ij} = 4\rho_{pij} - (\rho_{p(i+1)j} + \rho_{p(i-1)j} + \rho_{pi(j+1)} + \rho_{pi(j-1)}).$$

Диференційні характеристики розраховано за скінченно-різницевиими формулами без урахування розмірів комірки сітки, тому в назві відповідних характеристик використовується термін «аналог».

Для підвищення ефективності якісної інтерпретації результатів ВЕЗ був запропонований підхід, заснований на нескладній додатковій обробці при побудові геоелектричних розрізів [4]. Він полягає: по-перше, у використанні більш виразної візуалізації елементів у верхній частині геоелектричних розрізів; по-друге, у застосуванні аналогів похідних ρ_p розрахованих на основі формул відповідних трансформант для карт потенційних геофізичних полів.

Для збільшення виразності візуалізації розрізів геоелектричних даних замість традиційних значень $\frac{AB}{2}$ для вертикальної осі пропонується використовувати значення еквівалентної глибини дослідження ($h_{\text{екв}}$). Еквівалентна глибина знаходиться на основі логарифмічного перетворення значень напіврозносів лінії живлення установки ВЕЗ ($\frac{AB}{2}$) за евристичною формулою:

$$h_{\text{екв}} \left(\ln \frac{AB}{2} \right) = h_i^{\text{гео}} + \alpha_i \left(\ln \frac{AB}{2} - \ln \frac{AB^{\text{хар}}}{2_i} \right),$$

де $\alpha_i = \frac{h_{i+1}^{\text{гео}} - h_i^{\text{гео}}}{\ln \frac{AB^{\text{хар}}}{2_{i+1}} - \ln \frac{AB^{\text{хар}}}{2_i}}$ – коефіцієнт перетворення, $h_i^{\text{гео}}$ – глибина залягання і-й

границі опорного геоелектричного розрізу, $\ln \frac{AB^{\text{хар}}}{2_i}$ – логарифм значення характеристичного розносу, який «контролює» розташування і-й границі

опорного геоелектричного розрізу, $\frac{AB}{2}$ – робочий рознос, для якого розраховується значення еквівалентної глибини дослідження. Значення індексу i для розрахунків обирається за умови $\frac{AB^{хар}}{2_i} \leq \frac{AB}{2} \leq \frac{AB^{хар}}{2_{i+1}}$.

Оцінку значень h_i^{geo} можна виконати за результатами кількісної інтерпретації опорних або середніх кривих ВЕЗ або за аналізом параметричних ВЕЗ на території досліджень.

Ефективність заміни на геоелектричних розрізах $\frac{AB}{2}$ на $h_{екв}$ наглядно показано на порівнянні класичного виду геоелектричного розрізу ізоліній позірного питомого опору (ρ_p) (див. рис. 2.6) та з використанням еквівалентної глибини дослідження ($h_{екв}$) (рис. 2.7), де верхня частина розрізу не «затушовується» (перекривається) нижньою та сприяє доброму простеженню морфології водоносних горизонтів в четвертинних та неогенових відкладах.

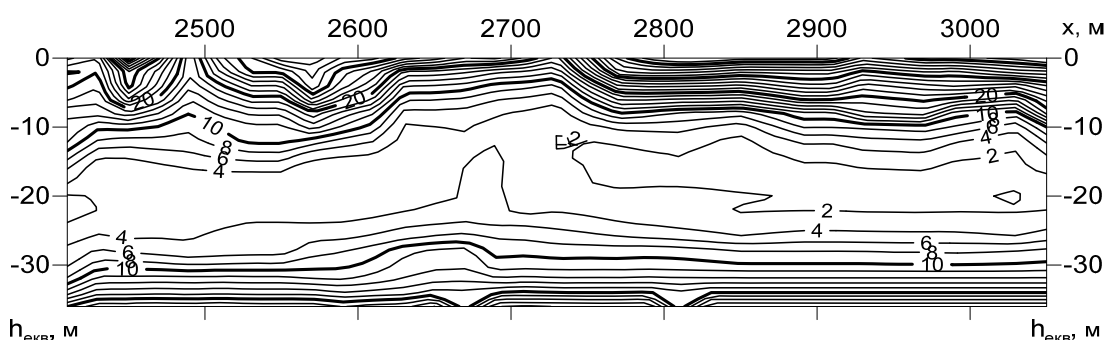


Рис. 2.7. Геоелектричний розріз з використанням логарифмічно перетвореної шкали осі $\frac{AB}{2}$ в еквівалентні глибини дослідження $h_{екв}$

Для експрес оцінки літологічних, тектонічних особливостей території [47] під впливом техногенних факторів були використані диференціальні характеристики полів, які мають більш локалізуючу здатність.

На основі польових вимірювань були розраховані повний градієнт $Grad(\rho_p)$ (рис. 2.8) та кривизна $C(\rho_p)$ (рис. 2.9) поля ρ_p . Для розрахунку вказаних диференціальних характеристик поля ρ_p були використані відповідні ідеї та формули з робіт [4].

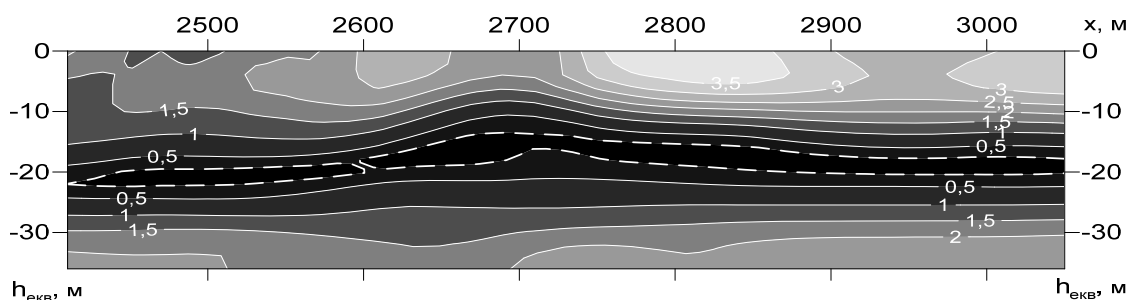


Рис. 2.8. Аналог повного градієнта уявного питомого опору $\text{Grad}(\rho_{\text{п}})$

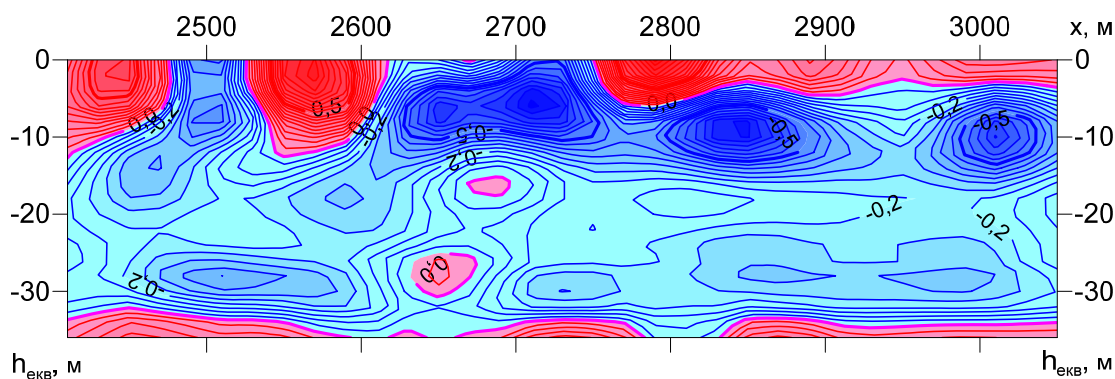


Рис. 2.9. Аналог кривизни уявного питомого опору $C(\rho_{\text{п}})$

Ці характеристики широко використовуються під час аналізу карт потенційних геофізичних полів. Диференційні характеристики розраховувались за скінченно-різничними формулами без врахування розмірів комірки сітки, тому в назві відповідних характеристик використовується термін «аналог».

Вибір трансформант ґрунтувався на зручності перетворення розрізу ізоліній у «геологічні об'єкти». Зони мінімальних значень аналога повного градієнта контролюють місцезнаходження та структуру окремих пластів порід. Нульові ізолінії аналога кривизни відповідають межах основних пластів, а локальні області його екстремальних значень – зонам другорядних ускладнень геологічної будови цих пластів. Середні значення ефективно при виділенні регіонального тренду, кривизна підкреслює межі поля, а повний градієнт – літолого-тектонічні дислокації. Екстремальні значення кривизни контролюють області порушення статистичної нестационарності геополя, які приурочені до геологічних меж або тектонічних зон [47]. На розрізах позірних питомих опорів, їх середніх значень, граничних параметрів та осевих ліній аномалій можливо якісно виділити підняття, западини, а також локалізувати

низькоомні аномалії, пов'язані з розломами, зонами тріщинуватості та обводненням.

Завдяки запропонованому підходу до якісної інтерпретації можливо значно скоротити терміни виконання робіт та підвищити надійність первинно отримуваних геологічних результатів.

2.5 Використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ)

У роботі проаналізовано перспективи використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для дослідження природно-техногенних умов Південного Криворізького басейну. Застосування супутникового моніторингу зумовлено потребою в отриманні оперативних та просторово інтегрованих даних про стан земної поверхні в регіонах з високим рівнем антропогенного навантаження.

Супутникові знімки дозволяють ідентифікувати техногенні форми рельєфу, зокрема кар'єри, відвали та хвостосховища, оцінювати стан рослинного покриву, а також виявляти лінеаментні структури, що відповідають зонам тектонічних порушень [47]. Виявлені лінеаменти вказують на наявність ділянок із підвищеною тріщинуватістю, які визначають інтенсивність фільтраційних процесів та впливають на формування гідрогеологічного режиму території.

Приклад результатів візуалізації наведено на рис. 1.1, де чітко розмежовано морфологію природного ландшафту та об'єкти техногенного походження (відвали, хвостосховища, кар'єри та інші інженерні споруди).

Техногенні форми рельєфу [22; 47] класифікуються на акумулятивні та денудаційні. До денудаційних форм належать кар'єри та зони обвалення відвалів, до акумулятивних — відвали, шламосховища, ставки-накопичувачі, дамби та греблі.

Для оцінки стану рослинного покриву та опосередкованого визначення рівня зволоження ґрунтів використовується нормалізований різницевий індекс

(NDVI), що дозволяє ідентифікувати ділянки з підвищеною вологістю. Такі зони можуть вказувати на підтоплення [26] або неглибоке залягання ґрунтових вод, що є критично важливим фактором при дослідженні сучасних інженерно-геологічних процесів.

Аналіз супутникових даних дозволяє оцінити просторові закономірності розподілу рослинності та рівень техногенного навантаження. Це дає змогу ідентифікувати території з порушеним природним режимом, які є потенційно небезпечними [44; 45] з огляду на розвиток екзогенних процесів. Методи дистанційного зондування Землі розглядаються як допоміжний інструментарій, доцільний для верифікації результатів геофізичних досліджень, зокрема під час інтерпретації даних геоелектричного зондування, а також для побудови інтегрованої моделі геологічного середовища досліджуваного району.

Використання космічних знімків на прикладі ставка «Леб'яжий»

Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом у межах Кривбасу формує в кристалічному фундаменті багаторівневу систему розломних структур.

Тектонічні порушення [47] виступають шляхами міграції підземних вод, визначаючи гідравлічний взаємозв'язок між водоносними горизонтами та поверхневими водними об'єктами. Показовим прикладом є ставок «Леб'яжий», розташований у зоні між Лівобережними відвалами та вигином річки Інгулець (північніше с. Новоселівка).

Води водойми характеризуються підвищеною та нестабільною в часі мінералізацією, що унеможлиблює їхнє використання в господарських цілях. Зміна рівня наповнення ставка безпосередньо впливає на вектори міграції високомінералізованих вод, що, своєю чергою, корелює з інтенсивністю зсувних процесів уздовж лівого берега р. Інгулець. З геоморфологічної точки зору відвали є трапецієподібними терасованими акумулятивними формами рельєфу з платоподібною вершиною. Зазначені об'єкти відіграють ключову

роль у техногенній трансформації природного середовища та сприяють поширенню високомінералізованих вод.

У межах ділянки «Леб'язий» (рис. 2.10) зафіксовано поширення високомінералізованих підземних вод, притаманних четвертинним та неогеновим відкладам, а також зонам глибинних розломів докембрійського фундаменту.

Рівень мінералізації зазначених вод варіюється як за вертикальним профілем, так і латерально. З метою виявлення та локалізації осередків високомінералізованих вод на досліджуваній території було проведено комплексні роботи [65], що включали обробку даних дистанційного зондування Землі та польові геофізичні дослідження з подальшою їхньою інтегральною інтерпретацією.



Рис. 2.10. Космознімки [64] району досліджень ставка «Леб'язий» за 2012 р. (А) та 2018 р. (Б):
профілі спостережень ВЕЗ та їх номери – червоні лінії;
моніторингові свердловини та їх номер - білі крапки.

2.6 Цифрова обробка архівних матеріалів

Значна частина вихідної інформації існувала лише у вигляді паперових карт, геологічних схем та архівних матеріалів. Без її оцифрування було неможливо виконати просторове суміщення з результатами ВЕЗ, ПП, матеріалами дистанційного зондування та сучасними цифровими картами. Архівні дані, які використані у роботі надані з архіву ДГП «Дніпрогеофізика»,

яке здійснювало геоелектричні дослідження [55; 57; 59] на території Кривбасу з 70-х років минулого століття.

Оцифрування в роботі не розглядається як самостійний науковий метод дослідження. Воно є етапом підготовки даних, який забезпечив можливість комплексної геоінформаційної обробки та подальшої інтерпретації отриманих результатів.

З метою оцінки довготривалих змін геоелектричних умов у межах досліджуваної ділянки Криворізького басейну було виконано порівняльний аналіз результатів вертикального електричного зондування (ВЕЗ), отриманих у 1990 та 2020 роках. Архівні матеріали 1990 року були попередньо оцифровані з графічних носіїв та приведені до табличного вигляду у середовищі Microsoft Excel (рис. 2.11) із фіксацією значень уявного питомого електричного опору (ρ_k) при відповідних розносах живильних електродів АВ/2.

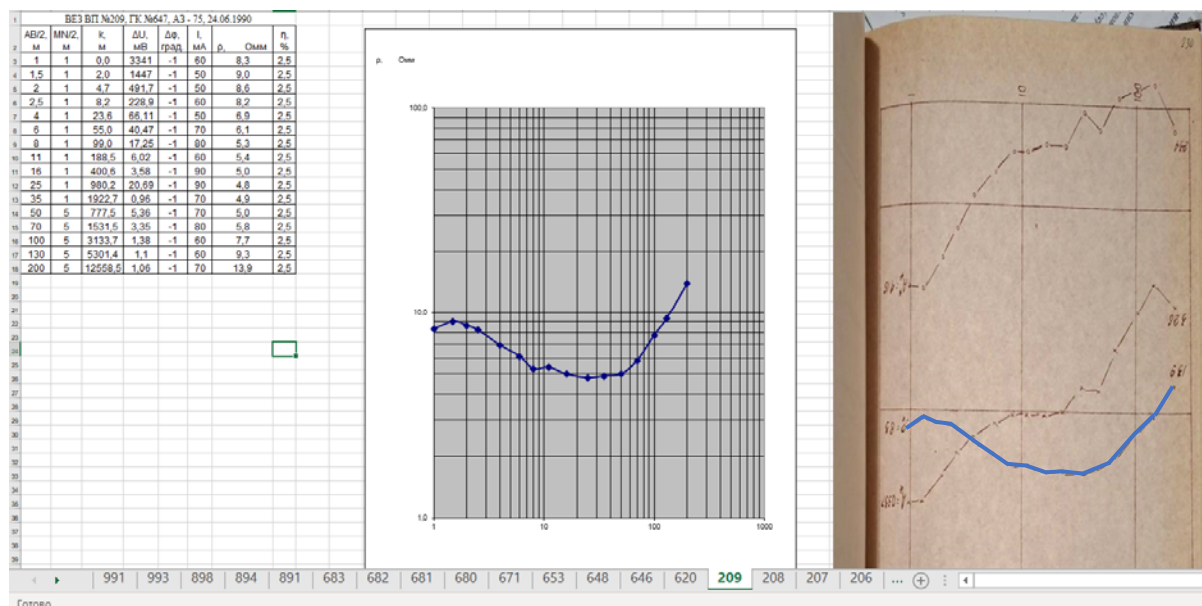


Рис. 2.11. Приклад переведення архівних матеріалів ВЕЗ 1990 року у цифровий формат за допомогою Microsoft Excel

Це забезпечило уніфікацію структури даних та можливість їх подальшої просторової інтерполяції й коректного зіставлення з матеріалами повторних спостережень 2020 року. Для кожного значення розносу АВ/2 було побудовано окремі карти (див. підрозділ 4.5, рис. 4.11 та 4.12) розподілу ρ_k за 1990 та 2020 роки, після чого розраховано карти різниць

$\Delta\rho_k = \rho_k(2020) - \rho_k(1990)$. Інтерполяція виконувалася в середовищі Surfer із формуванням регулярної грід-моделі, що забезпечило просторову узгодженість карт різних років.

Аналіз побудованих карт свідчить про наявність просторово-часових диференційованих змін геоелектричного поля, що мають як приповерхневий, так і глибинний характер.

Порівняння раніше проведених геологорозвідувальних робіт та геофізичних досліджень показав, що шари осадових порід також мають широкий розмах висотних позначок як покрівлі, так і підосви, які дуже складно пояснити давніми ерозійними процесами.

Щоб мати об'єктивне і коректне уявлення, доводиться звертатися до визнання наявності нетектонічних чинників, які можуть призвести до виникнення як плікативних, так і до дезюктивних (розривних) порушень.

2.7 Висновки до розділу

У третьому розділі дисертаційної роботи обґрунтовано та детально розглянуто комплексну методику геофізичних, інженерно-геологічних, дистанційних та геоінформаційних досліджень, застосованих для вивчення процесів підтоплення, міграції високомінералізованих підземних вод і впливу техногенних об'єктів на геологічне середовище.

Встановлено, що найбільш ефективними для вирішення поставлених задач у складних гірничопромислових умовах є геоелектричні методи, зокрема вертикальне електричне зондування (ВЕЗ), метод природного поля (ПП) та електротомографія (ЕТ), які дозволяють досліджувати геоелектричну будову розрізу, визначати потужності водоносних і водотривких горизонтів, встановлювати зони підвищеної тріщинуватості та шляхи міграції мінералізованих вод.

Проведений аналіз геолого-гідрогеологічних умов району досліджень показав, що територія Південного Кривбасу характеризується значним

техногенним навантаженням, складною тектонічною будовою, розвитком карстових і суфозійних процесів та наявністю великої кількості хвостосховищ, відвалів і ставків-накопичувачів, які істотно впливають на формування сучасної інженерно-геологічної та гідрогеологічної обстановки.

У роботі проаналізовано електричні властивості основних літологічних різновидів порід, встановлено закономірності зміни питомого електричного опору залежно від ступеня зволоження, пористості, мінералізації підземних вод та тріщинуватості порід, що стало основою для подальшої геологічної інтерпретації геоелектричних даних. Обґрунтовано вибір оптимальної методики польових робіт із використанням симетричної чотирьохелектродної установки Шлюмберже та визначено раціональні параметри спостережень для дослідження геологічного середовища в умовах Південного Кривбасу. Виконані профільні, параметричні та повторні спостереження методом ВЕЗ дозволили отримати значний обсяг геофізичної інформації, оцінити просторово-часові зміни геоелектричних параметрів та простежити розвиток процесів підтоплення й мінералізації підземних вод у межах досліджуваної території.

Встановлено, що поєднання результатів геоелектричних досліджень із матеріалами буріння, гідрогеологічних спостережень та дистанційного зондування Землі забезпечує можливість комплексного аналізу геологічного середовища та підвищує достовірність інтерпретації отриманих результатів.

Показано ефективність використання супутникових знімків для виявлення техногенних форм рельєфу, зон підвищеної тріщинуватості, аналізу рослинного покриву та встановлення ділянок можливого підтоплення. Застосування геоінформаційних технологій дозволило інтегрувати різноманітні дані, виконати просторовий аналіз та побудувати тематичні карти, які відображають особливості розвитку небезпечних геологічних процесів.

Особливу увагу приділено методичним підходам до інтерпретації результатів ВЕЗ, включаючи побудову геолого-геофізичних розрізів, використання програмних засобів кількісної інтерпретації та застосування

диференційних характеристик геоелектричного поля. Запропонований підхід із використанням аналогів повного градієнта та кривизни поля уявного питомого опору дозволив підвищити інформативність якісної інтерпретації, локалізувати тектонічні порушення, зони підвищеної проникності та області поширення високомінералізованих підземних вод.

Отримані результати свідчать про визначальну роль тектонічних порушень у формуванні шляхів міграції підземних вод та розвитку процесів техногенного підтоплення. Виконані дослідження підтвердили ефективність застосованого комплексу методів для оцінки сучасного стану геологічного середовища, виявлення зон потенційної небезпеки та створили методичну основу для подальшого моніторингу інженерно-геологічних процесів у межах Криворізького залізрудного басейну.

РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вибір території комплексних досліджень

Вибір досліджуваної території зумовлений двома основними чинниками. По-перше, високою концентрацією масштабних техногенних об'єктів, зокрема хвостосховищ, ставків-накопичувачів та відвалів гірських порід, які є невід'ємними елементами виробничої інфраструктури гірничодобувних підприємств [1]. По-друге, розпорошеність прав власності на ці гідротехнічні споруди (АТ «ПівдГЗК», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ДП «Кривбасшахтозакриття») унеможлиблює здійснення централізованого контролю за екологічним станом південної частини Криворізького басейну [4–9]. Багаторічні комплексні дослідження підтверджують, що функціонування зазначених техногенних об'єктів суттєво впливає на гідрогеологічний режим регіону, спричиняючи підтоплення територій [88–91]. Розташування ключових об'єктів дослідження відображено на рис. 3.1.

Порушення природного гідрогеологічного режиму в Криворізькому залізорудному басейні внаслідок видобутку залізної руди спричиняє трансформацію ключових екологічних параметрів геологічного середовища, зокрема геохімічних, гідрогеологічних, інженерно-геологічних та геодинамічних показників [69–71]. Зміни сейсмогеофізичного стану сприяють підвищенню рухливості масивів гірських порід, які зазнають прямого або опосередкованого впливу гірничих робіт під час регіональних і локальних сейсмічних навантажень. Функціонування право- та лівобережних відвалів, а також їхня здатність до акумуляції води, стали чинниками підтоплення територій [26] та активізації зсувних і провальних (карстових) процесів у населених пунктах, зокрема Рудничне, Рахманове, Новоселівка, Новолатівка [39] та інших.



Рисунок 3.1. Схема розташування досліджуваних об'єктів

Водночас наявність на цій території старих гірничих виробок з видобутку вапняку, параметри та локалізація яких наразі не встановлені, у поєднанні з додатковим надходженням води з відвалів, спричиняє розвиток зсувних процесів як на самих відвалах, так і активізує вилуговування у вапнякових пластах із інтенсивним перетоком підземних вод.

Окрім значного техногенного навантаження, регіон перебуває під впливом природних геологічних процесів, зокрема карстоутворення [25] та сучасної тектонічної активності, що визначають характер розподілу поверхневих і підземних вод.

Висока складність та важливість поставлених завдань зумовили необхідність збору та ґрунтового аналізу результатів усіх попередніх геологічних, гідрогеологічних та геофізичних досліджень. Це є критично важливим для обґрунтованого вибору оптимального комплексу та методології подальших геофізичних робіт. Дослідження розпочато з вивчення інженерно-геологічних умов ділянки, передусім — гідрогеологічних факторів.

3.2 Геофізичні характеристики території

Геофізична вивченість досліджуваної території достатньо високий. В дисертаційній роботі було проаналізовано архівні дані електророзвідувальних робіт виконаних ДГЕ «Дніпрогеофізика», серед яких найбільше використовувалися дослідження в модифікації вертикального електричного зондування (ВЕЗ).

У області дослідження було опрацьовано 14 сублатитудальних і субмеридіональних профілів ВЕЗ [80] (з кроком – 200 м і $AB \leq 300$ м). На деяких профілях ставили лінійні ВЕЗ з малим кроком, щоб детально вивчити верхню частину зони аерації. Обробляли профілі ВЕЗ маленьким кроком - це фіксувало геоелектричний опір перших метрів розрізу від поверхні, розбивало верхню частину розрізу і показувало глибину капілярного зволоження. Шари порід з різним електричним опором трактувалися як водоносиченими або водонепроникними горизонтами. За електричним опором визначали зволоження шарів порід і шукали зони з високою проникністю. Повторні дослідження ВЕЗ були проведені для визначення просторово-часових змін геоелектричних характеристик порід внаслідок змін гідрогеологічних умов. За результатами повторних спостережень, опір геологічного розрізу в цілому зменшився. Зниження геоелектричного опору за 4-6 років переважно відбувається у верхній частині осадової покриви. Це є ознакою сучасного зволоження майже всіх стратиграфічних горизонтів. Основна диференціація геоелектричного опору відбувається у верхній частині осадового чохла (до 50 метрів).

Для отримання додаткової інформації про параметри неоген-четвертинних відкладів і структуру водоносних горизонтів за результатами електророзвідки ВЕЗ були побудовані геолого-геофізичні розрізи, які в

подальшому служать основою комплексної інтерпретації результатів геофізичних досліджень.

Розбір даних ВЕЗ виявив аномалії підвищеної провідності на зрізах ρ_y . Аномалії поєднано в плані (рис. 3.2). Інформація про геоелектричний зріз у діапазоні глибин дозволяє чітко розпізнати аномалії ρ_{ymin} і пояснити геологічну природу цих аномалій.

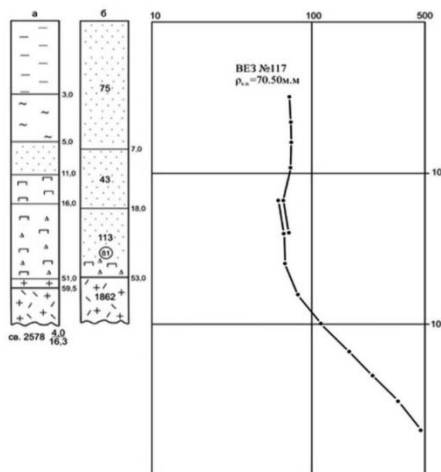


Рис. 3.2. Приклад інтерпретації кривої ВЕЗ на одній із досліджуваних гідрогеологічній свердловині № 2578

Для розв'язання геологічних завдань з метою стратифікації розрізу використовувалася програма IPI2Win, яка виконує одномірну інтерпретацію даних ВЕЗ по кожному профілю (рис 3.3).

Програма працює в інтерактивному режимі та дозволяє вибрати одне рішення серед багатьох. Програма підбирає рішення, яке найкраще і з геофізичної, і з геологічної точки зору. Програма мінімізує помилку підбору і підкреслює важливість геоелектричного розрізу. Я використовую криві ВЕЗ, щоб визначити питомий електричний опір і потужність покривних пухких відкладів. Кількісний аналіз кривих ВЕЗ дає ці значення.

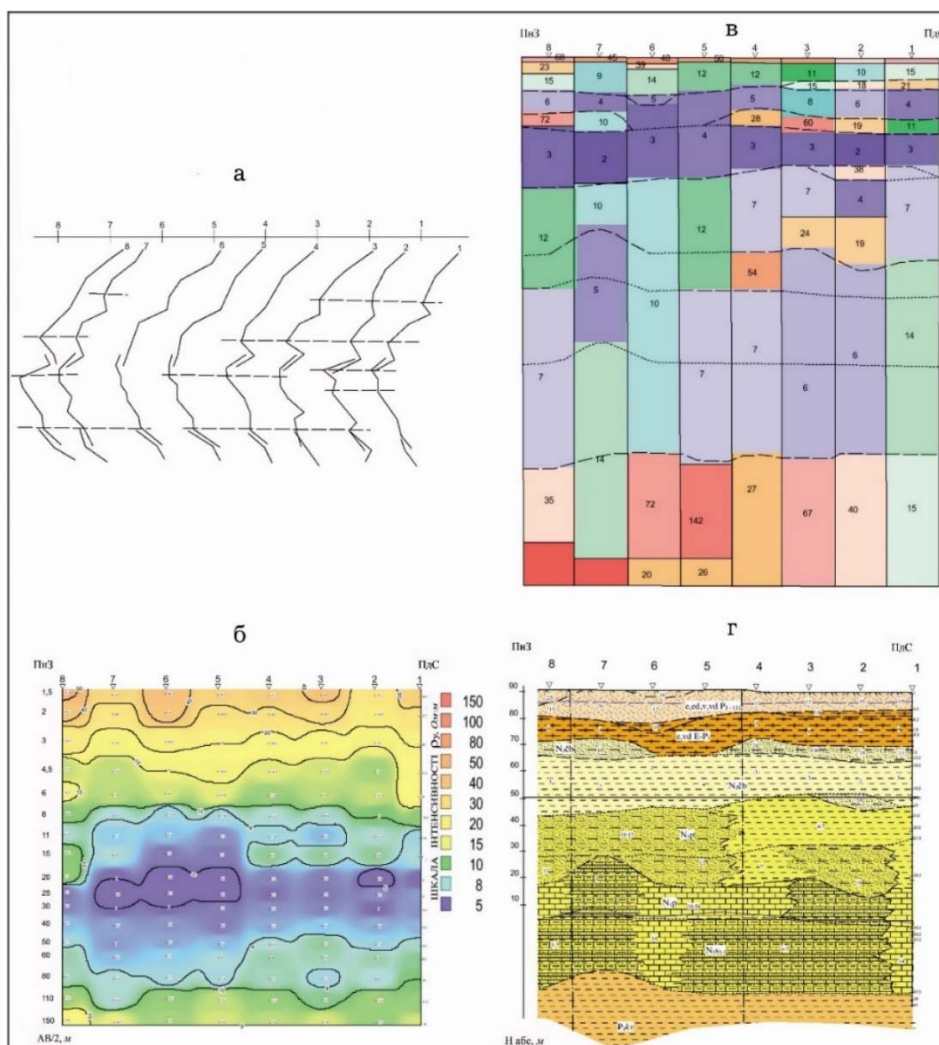


Рис. 3.3. Приклад кількісної інтерпретації ВЕЗ на профілі № 13:

а – криві ВЕЗ; б – вертикальний розріз ізом уявного опору (ρ_a) для спостережень 2008 р. (масштаб: горизонтальний 1:10 000, вертикальний логарифмічний); в – результати кількісної інтерпретації даних ВЕЗ; г – геолого-геофізичний розріз за профілем (масштаб: горизонтальний 1:10 000, вертикальний 1:500)

Контакти пластів з різним геоелектричним опором порівнювалися з межами стратиграфічних горизонтів. Межі цих горизонтів були встановлені по результатам буріння свердловин, які були розташовані на профілях ВЕЗ або поблизу.

Додатково були виконані розрахунки зміни геоелектричного опору геологічного середовища з метою встановлення його руху в часі (з 1984 по 2008 рр.) і зв'язку зі зміною інженерно-гідрогеологічної обстановки розрізу за 24 роки (рис. 3.4).

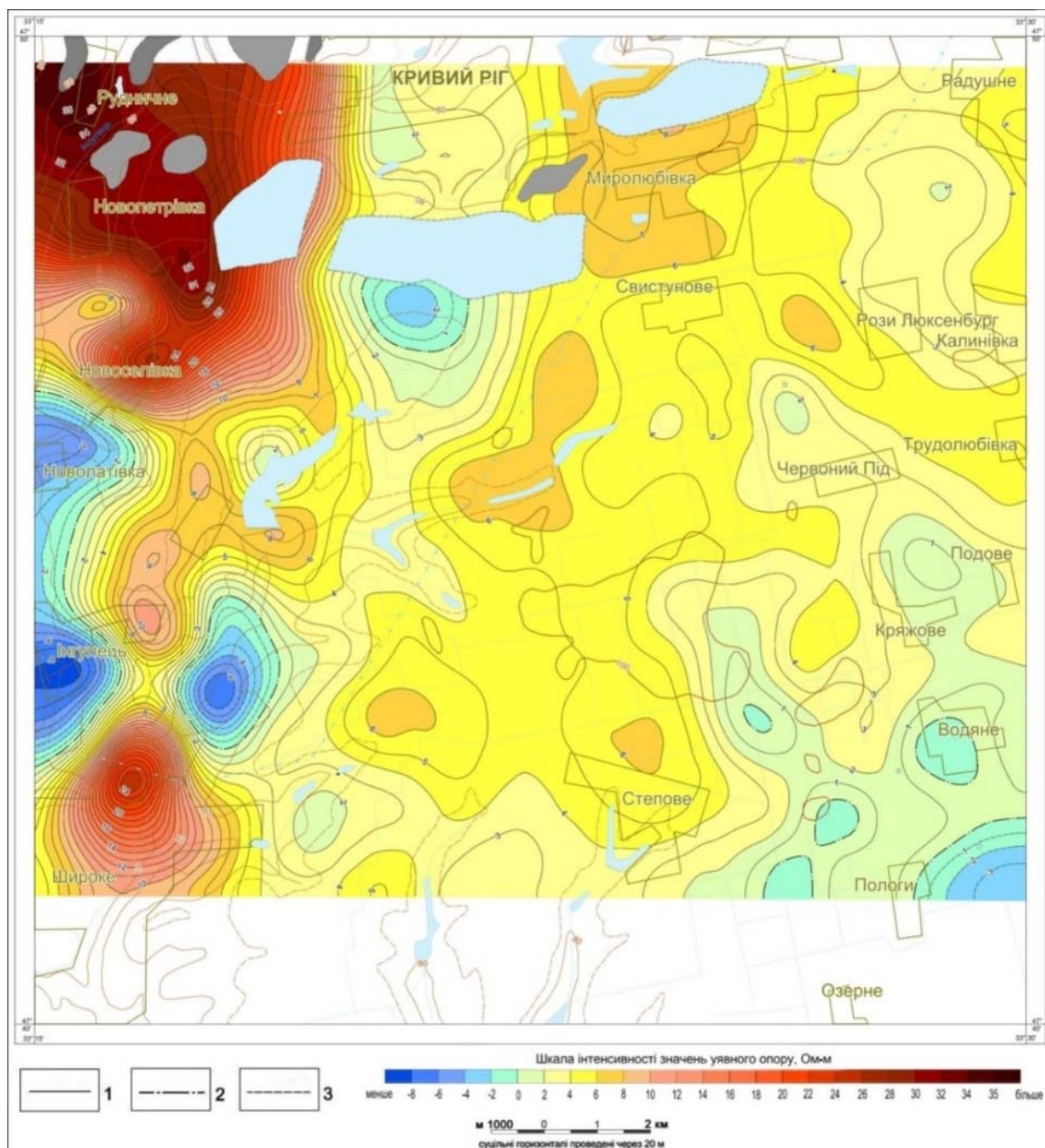


Рис. 3.4. Карта зміни значень уявного опору за проміжок часу з 1984 по 2008 рр., яка підкреслює зміни інженерно-гідрогеологічної обстановки площі досліджень за 24 роки

Повторні геофізичні дослідження (2008–2012 рр.) виявили значні зміни у геоелектричних параметрах. Балка збігається з регіональною зоною розломів [8,9,10], що підвищує її вразливість. Інтенсивна тектонічна порушеність [47] знижує фільтраційну стійкість порід і прискорює поширення мінералізованих вод. Дані досліджень методом електротомографії показали зниження питомого опору майже у всіх горизонтах, особливо у верхніх 50 м розрізу (рис. 3.5).

Висока вологість вказує на появу ділянок, зон підвищеної проникності. Тектонічна карта зі змінами опору (рис. 3.6) чітко показує, як блокова структура впливає на рух підземної води до р. Інгулець. Техногенне навантаження через надмірне заповнення водойми підсилює процеси, і це може викликати швидке спорожнення і забруднення водоносних горизонтів.

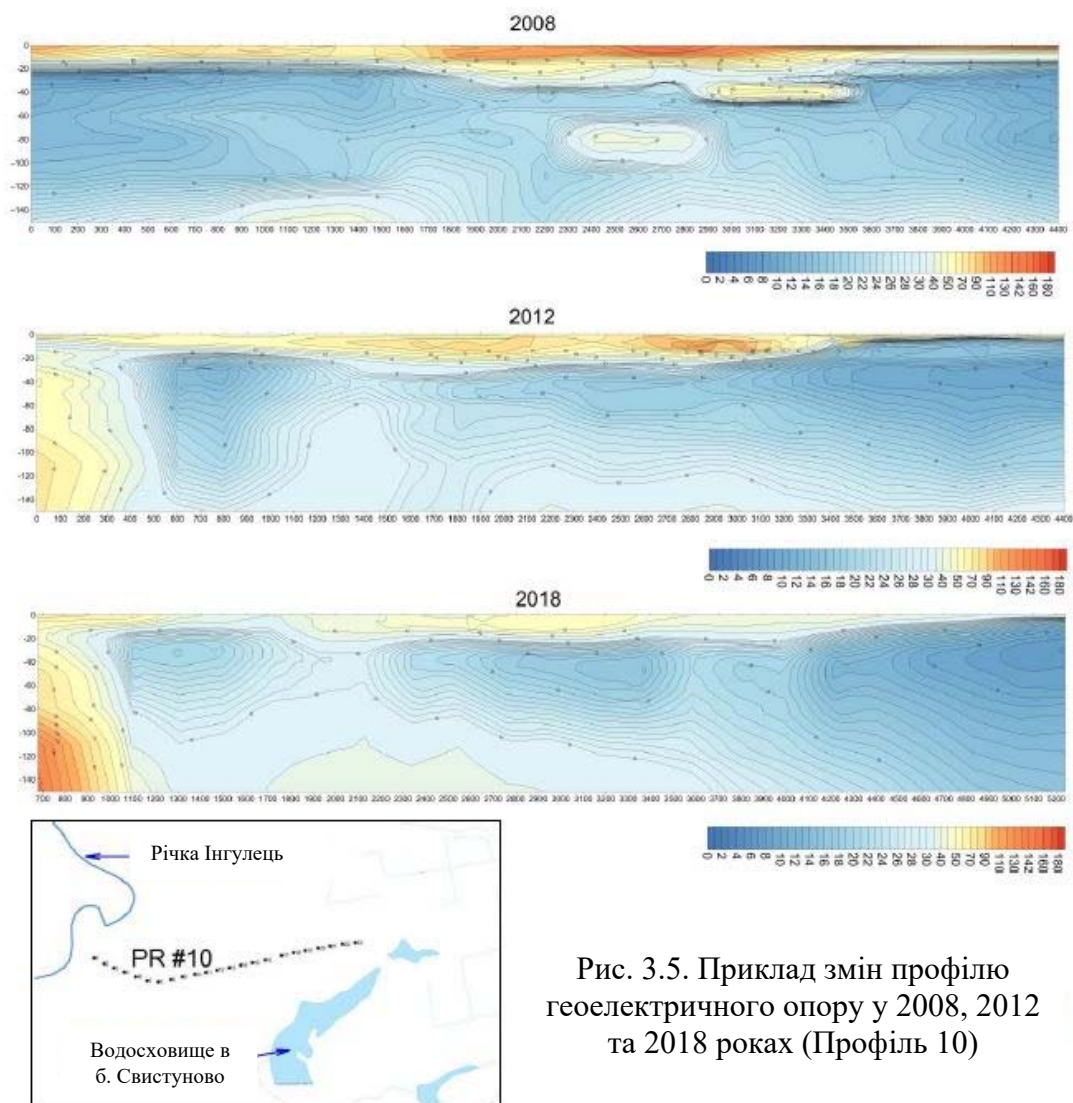


Рис. 3.5. Приклад змін профілю геоелектричного опору у 2008, 2012 та 2018 роках (Профіль 10)

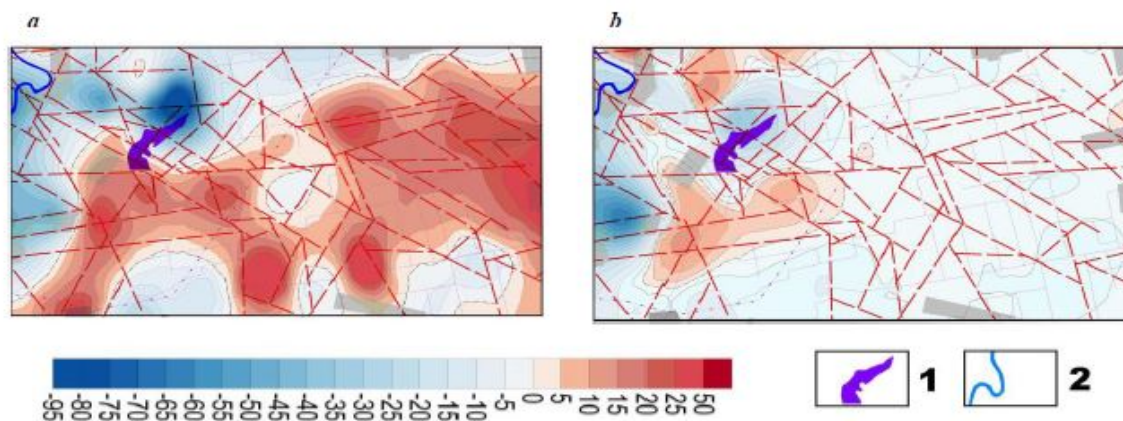


Рис. 3.6. Поєднання побудованої тектонічної карти та карти зміни геоелектричного опору (з 2008 по 2012 рік): а – $AB/2=2$ м, б – $AB/2=11$ м
(1 – водосховище в балці Свистунова, 2 – річка Інгулець)

На цих картах зона зниження рівня підземних вод (західного та північно-західного напрямку) виділена на північний захід від б. Свистунова [68].

Ця зона утворена в результаті «клаватурних» вертикальних зміщень невеликих блоків кристалічного фундаменту, які впливають на гіпсометричний рівень водоносних горизонтів та водонепроникних горизонтів. Конфігурація цієї зони обумовлена системами північно-західних б. Свистунова вздовж систем розломів у північно-західному напрямку до р. Інгулець. Про це також свідчить наявність тут жолобоподібного відхилення того ж напрямку водонепроникної поверхні глини Київської серії.

На прикладі б. Свистунова [68] показано, що мінералізовані шахтні води проникають в горизонти підземних вод уздовж зон розломів, викликаючи їхнє забруднення, засолення ґрунтів і активізацію карсту. Зниження питомого опору за 2008–2012 рр. підтверджує зміни у тектонічному стані геологічного середовища та показує, що він впливає на процеси природного та техногенного підтоплення [26; 88-91] та призводить до коливання зволоження стратиграфічних горизонтів і зростання водопроникності порід.

3.3 Тектонічні та структурно-геологічні умови формування території досліджень

Тектонічна будова [40; 46; 56] характеризує стан деформацій та сучасну динаміку земної кори, що зумовлюють формування блокової структури, системи розломів та тріщинуватості гірських порід. Зазначені чинники визначають не лише геологічну архітектуру регіону, а й гідрогеологічні умови, оскільки саме від них залежать шляхи фільтрації підземних вод, формування зон підвищеної проникності та локалізація водоносних горизонтів.

Територія Кривбасу має складну тектонічну структуру, зумовлену її розташуванням у межах Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита та Інгулецько-Криворізької шовної зони. Кристалічний фундамент регіону розчленований мережею глибинних і приповерхневих розломів. У межах гірничодобувних районів Українського щита виділяють шість систем розломів із такими азимутами простягання: 0° і 270° , 17° і 287° , 35° і 305° , 45° і 315° , 62° і 332° , 77° і 347° .

Поряд із фундаментальним геологічним значенням, розломи є визначальними факторами, що впливають на стан геоекологічної ситуації [32; 33] у межах досліджуваних регіонів. Будь-який активний розлом є джерелом постійних локальних полів напружень і деформацій, що зумовлюють підвищену тріщинуватість, водопроникність гірських масивів, інтенсивність сучасних рухів земної кори, а також формування зон ерозії, просідань, зсувів та інших екзогенних геологічних процесів. Розломні структури можуть знижувати рівень природного захисту підземних вод, слугуючи шляхами міграції техногенних забруднювачів. Загальновизнана концепція, згідно з якою зони перетину розломів характеризуються вищим ступенем фрагментації та схильністю до активізації небезпечних природно-техногенних геоекологічних процесів, є підґрунтям для тектонічної параметризації.

У даній роботі встановлено взаємозв'язок між сучасною геодинамікою та особливостями блоково-розломної структури регіону. За результатами проведених геолого-геофізичних досліджень виявлено низку дрібних розломів, що розділяють основні субмеридіональні пласти метаморфічних порід Криворізької серії на окремі блоки.

Аналіз тектонічних процесів на досліджуваній території підтверджує наявність сучасних вертикальних і горизонтальних переміщень блоків уздовж обмежуючих їх докембрійських розломів. Особливої уваги потребує Криворізько-Кременчуцький глибинний розлом, у межах якого швидкість вертикальних рухів земної кори варіюється в діапазоні від +0,6 до +4,8 мм/рік. Про поточну активність цієї структури свідчить наявність зон гідрохімічних та газових аномалій.

Крім вертикальних зміщень, встановлено інтенсивні горизонтальні рухи, швидкість яких у 3–5 разів перевищує вертикальні показники. Відносні горизонтальні зрушення в мегаблоках по обидва боки розлому оцінюються на рівні 3–10 мм/рік. Виявлені процеси свідчать про те, що масиви гірських порід у верхній частині земної кори характеризуються значним фізико-механічним розущільненням. Це істотно знижує сейсмостійкість регіону та сприяє формуванню техногенних зон із підвищеною водопроникністю. Як наслідок, формуються умови для утворення техногенних водоносних горизонтів та розкриття природних водоносних комплексів, що зумовлює суттєве порушення природних гідродинамічних і гідрохімічних режимів. Переміщення значних обсягів гірських порід під час відкритого та підземного видобутку залізної руди підвищує ймовірність вертикальних і горизонтальних зсувів окремих блоків масиву. В умовах наявної природної тріщинуватості та її інтенсифікації відбувається втрата жорсткого зчеплення між блоками, що додатково активізує деформаційні процеси.

Факторами, що провокують ці явища, є надмірне техногенне навантаження на блоки та зони тріщинуватості, зумовлене розміщенням відвалів, хвостосховищ, ставків-накопичувачів тощо. Додатковим чинником

дестабілізації є наявність порожнин у гірському масиві, що виникли внаслідок проведення підземних чи відкритих гірничих робіт [74].

Зміщення блоків фундаменту може бути зумовлене деформаціями в осадовому чохлі. На сьогодні вплив вертикальних та горизонтальних переміщень окремих блоків земної кори, спричинених техногенним навантаженням на денну поверхню, у межах регіону залишається недостатньо вивченим.

Результати попередніх геологорозвідувальних робіт свідчать про значну амплітуду коливань гіпсометричних відміток покрівлі та підосви стратиграфічних шарів осадових порід, що може бути пояснене виключно нетектонічними процесами.

Досліджувана територія, що розглядається в дисертаційній роботі, розташована на південному схилі Українського щита, де відмітки кристалічного фундаменту та денної поверхні поступово знижуються у південному напрямку до Причорноморської западини. Відповідно, осадовий чохол характеризується загальним регіональним нахилом у південному напрямку. Встановлено, що в широтному розрізі шари осадових відкладів залягають субгоризонтально з незначним кутом падіння на південь.

Геологічна структура регіону представлена комплексом кристалічних порід докембрію, що різняться за складом та ступенем метаморфічних перетворень, а також осадовими утвореннями палеогенового, неогенового та четвертинного періодів.

Фундамент докембрійського віку сформований породами архейської та протерозойської епох. Архейський комплекс характеризується переважанням вулканогенних порід основного складу, зокрема амфіболітів, сланців та безрудних кварцитів; меншою мірою представлені метаандезити, metabазальти та плагіогранітоїди. Протерозойські відклади переважно представлені метаосадовими породами: хлорит-актинолітовими сланцями, кварцито-пісковиками, залізистими кварцитами, джеспілітами та гнейсами.

Палеогенові відклади заповнюють депресії поверхні кристалічного фундаменту, залягаючи субгоризонтально або з незначним нахилом у бік Причорноморської западини. Стратиграфічний комплекс представлений морськими та континентальними фаціями еоцену та олігоцену. Літологічний розріз еоцену характеризується наявністю пісків, вторинних каолінів та бокситоподібних порід, що перекриваються вуглистими глинами, пісками та прошарками бурого вугілля. Вище за розрізом залягають мергелі, алеврити та алевритисті глини; завершується еоценова товща трепелоподібними пісковиками та глауконітовими глинами. Олігоцені відклади представлені піщано-глинистими утвореннями, з якими асоціюються поклади марганцевих руд. Верхня частина розрізу складена алевритистими глинами з прошарками алевритів.

Палеогенові відклади формують моноклінальне крило північного борту Причорноморської западини з пологим падінням у південному напрямку. Структура монокліналі ускладнена різноманітними за морфологією та генезою дислокаціями вищих порядків, серед яких переважають локальні підняття, що корелюють із виступами блоків фундаменту. У палеогенових відкладах за падінням монокліналі спостерігається закономірне, нерідко суттєве, збільшення потужності пластів. Межі зон таких змін потужностей, як правило, збігаються з орієнтацією широтних розломів.

Осадовий чохол Криворізького басейну представлений неогеновими та четвертинними відкладами. Верхній структурний ярус (платформний чохол) залягає на кристалічному фундаменті з чітко вираженою кутовою та стратиграфічною незгодою. При цьому структурні плани крейдово-палеогенових та неогенових відкладів, розділених стратиграфічною незгодою та тривалою перервою в осадконакопиченні, мають певні відмінності.

Неогенові відклади характеризуються ширшим поширенням порівняно з палеогеновими. Вони не лише заповнюють пониження рельєфу, але й разом із четвертинними відкладами утворюють суцільний покрив, який залягає на всіх нижчих стратиграфічних підрозділах, включаючи докембрійські утворення.

Неогенові відклади представлені мілководно-морськими, прибережно-морськими та континентальними фаціями, що залягають майже горизонтально. У певних випадках за результатами комплексних досліджень у палеоген-неогеновій товщі виявлено фрагменти порушень, які часто корелюють із зонами регіональних розломів кристалічного фундаменту.

У геологічній будові досліджуваної території значну частку становлять четвертинні відклади, представлені переважно континентальними генетичними комплексами. Дані відклади поширені на всій території району. Порушення суцільності четвертинних відкладів фіксуються виключно в межах сучасних ерозійних форм рельєфу, зокрема в долинах річок, балковій мережі та на окремих ділянках, змінених внаслідок техногенного впливу.

Стратиграфічний поділ та регіональне районування четвертинних відкладів здійснено згідно зі «Стратиграфічною схемою четвертинних відкладів України» (Київ, 2002) [23]. Коригування меж окремих підрайонів проводилося на основі аналізу геологічної будови, літологічного складу та умов залягання відкладів.

На досліджуваній території виділено два структурно-фаціальні підрайони: Північноінгулецький та Південноінгулецький. Вони належать до Центрально- та Південноукраїнської лесової області, проте мають відмінності за складом і морфологією четвертинної товщі. Зокрема, для північної частини характерне інтенсивніше накопичення потужності лесових горизонтів. У південному напрямку спостерігається зменшення потужності відкладів, а також їх епізодичне поширення або повна відсутність окремих горизонтів. Крім того, у південній частині досліджуваної території виявлено специфічні генетичні різновиди відкладів, зумовлені впливом озерних та еолово-делювіальних процесів.

Четвертинний комплекс характеризується значною літологічною та фаціальною неоднорідністю. Формування відкладів відбувалося протягом різних палеогеографічних етапів, що зумовило різноманітність їхнього складу, структури та просторового розподілу. Кожен стратиграфічний горизонт

відповідає специфічним кліматичним умовам осадо накопичення, що змінювалися впродовж антропогенового періоду. Чергування теплих і холодних фаз мало безпосередній вплив на генезис четвертинної товщі та визначило її сучасні структурні особливості.

Геологічний розріз території виробничого майданчика АТ «ПівдГЗК» із відображенням рівнів водоносних горизонтів наведено на рис. 3.7 та 3.8.

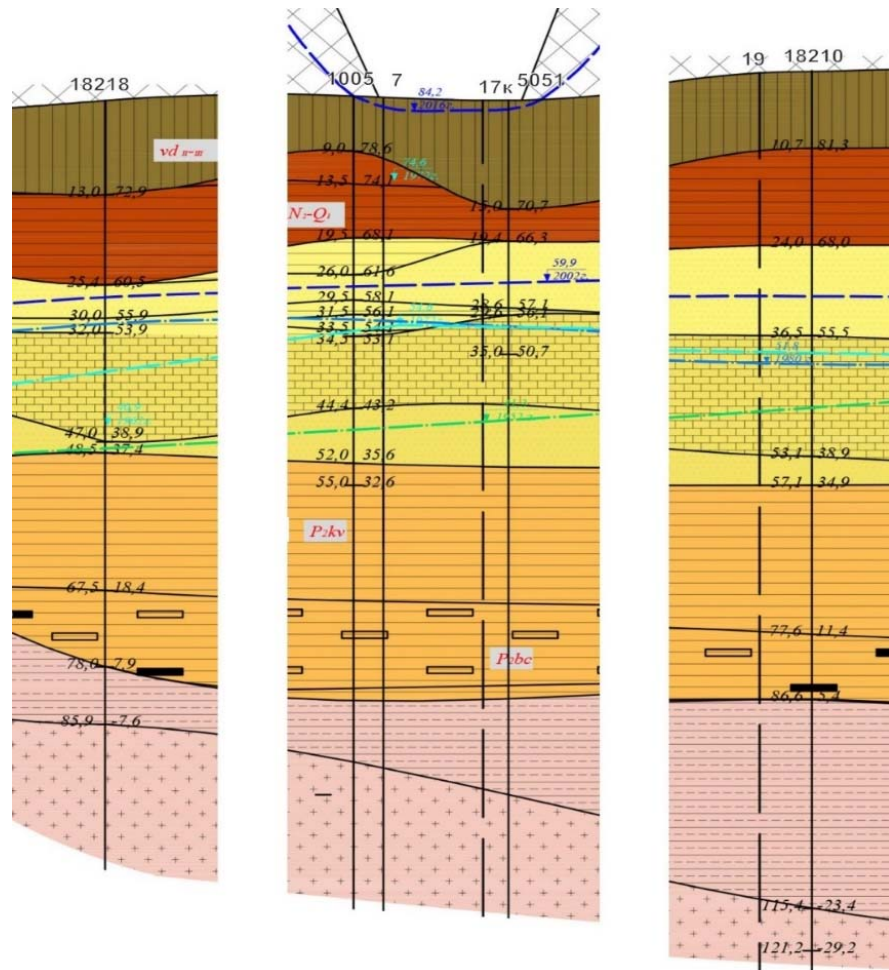


Рисунок 3.7. Геологічні розрізи свердловин, що розкрили поховану поверхню кристалічного фундаменту біля виробничого майданчику АТ «ПівдГЗК». (Умовні позначення на рис. 2.8)

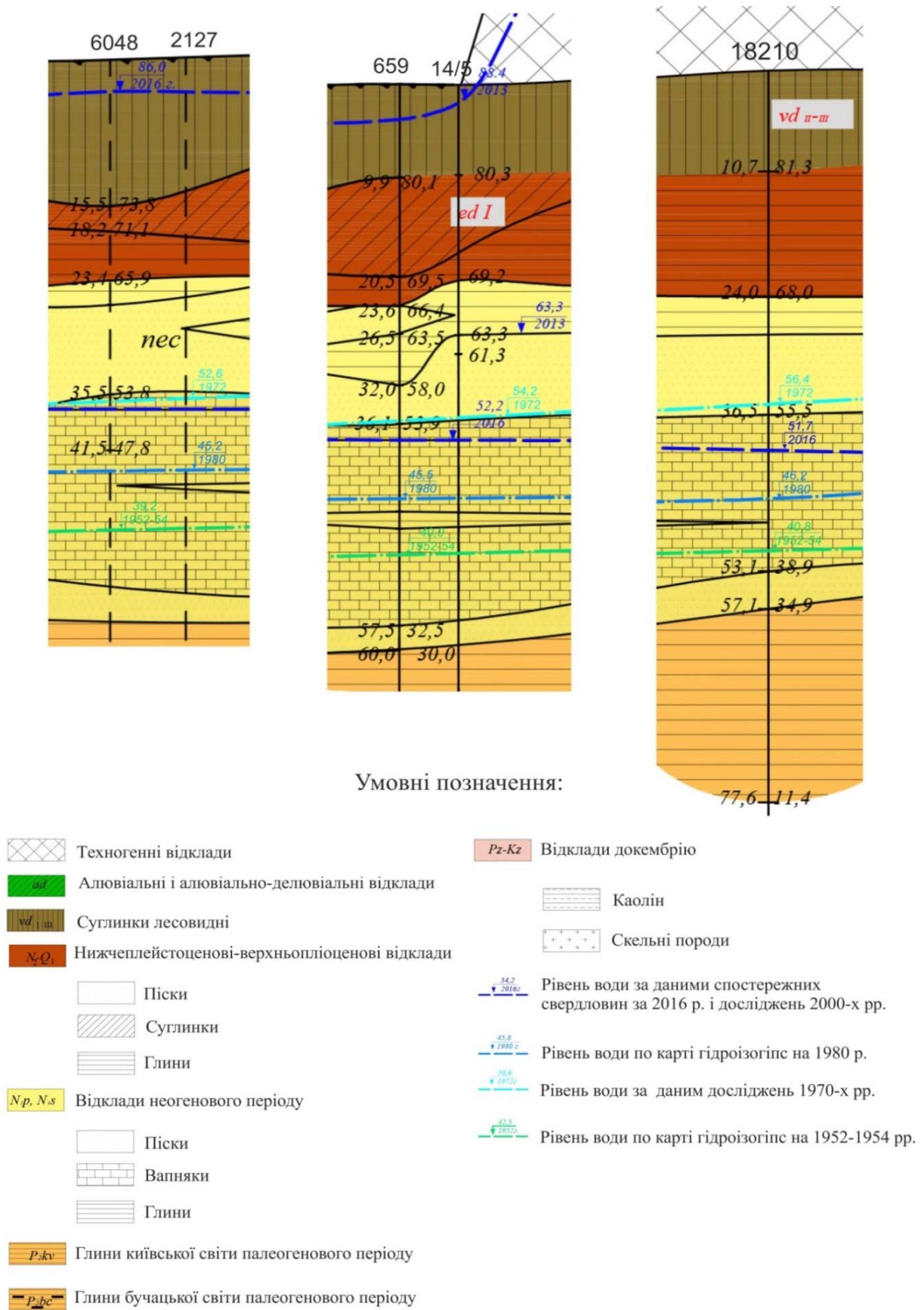


Рисунок 3.8. Стратиграфічні розрізи свердловин з відмітками рівня води по реперним рокам на території, що прилягає до південного виробничого майданчика АТ «ПівдГЗК»

3.4 Гідрогеологічна характеристика території

З гідрогеологічної точки зору досліджувана ділянка розташована в межах Українського басейну тріщинних вод. Даний басейн характеризується значним поширенням водоносних зон у тріщинуватих породах кристалічного фундаменту, корі вивітрювання, а також у перекриваючих їх неогенових та четвертинних відкладах.

Гідрографічна мережа району Кривбасу представлена річками Інгулець, Саксагань, Бокова, Боковенька та Кам'янка. У межах Криворізького гірничорудної басейну функціонує п'ять великих водосховищ та близько 200 ставків, що використовуються для господарсько-питного водопостачання, зрошення сільськогосподарських угідь, промислових потреб та рекреації. Зокрема, на р. Інгулець розташовані Іскрівське та Карачунівське водосховища; на р. Саксагань — Кресівське та Держинське; у балках — Красінське та Південне, а в поде на півдні басейну — Зеленодольське водосховище.

Геоєкологічний моніторинг [69-71] стану поверхневих вод на станціях відбору проб [31] свідчить про критичний рівень забруднення як водних об'єктів, так і донних відкладень водоєм Кривбасу.

На сьогодні екологічний стан річкової мережі Криворізького басейну характеризується як критичний. До річок Інгулець та Саксагань щорічно здійснюються скиди стічних вод промислового походження, що класифікуються як «технічні».

Основними джерелами забруднення поверхневих вод та донних відкладень у Криворізькому районі є скиди мінералізованих та інших промислових стоків від низки підприємств, зокрема гірничо-збагачувальних комбінатів, металургійного комбінату та шахт. Функцію головних акумуляторів стічних вод виконують хвостосховища гірничо-збагачувальних комбінатів, до яких, окрім відходів збагачення руди та оборотних вод, спрямовуються забруднені шахтні води, а також частково очищені господарсько-побутові стоки міськводоканалу.

Зокрема, від хвостосховища «ПівдГЗК», розташованого у північній частині району, скиди транспортуються трубопроводами діаметром 600–1200 мм вздовж правого берега р. Саксагань (в районі с. Веселі Терни, м. Кривий Ріг).

Надходження забруднюючих речовин до водних об'єктів відбувається внаслідок скидання зворотних вод гірничодобувних підприємств Криворізького промислового вузла через систему водовідвідних каналів та очисних споруд.

Стан підземних вод. Через інтенсивний антропогенний вплив, високу концентрацію промислових об'єктів, що порушують гідродинамічну рівновагу (кар'єри, відвали, хвостосховища), у регіоні спостерігається критичний рівень забруднення підземних вод та активізація процесів підтоплення, спричинених підняттям рівня ґрунтових вод [26; 88-91].

Забруднення підземних вод зумовлене не лише виробничою діяльністю підприємств Кривого Рогу, а й впливом промислових центрів, розташованих південніше, оскільки міграція забруднених підземних вод спрямована у бік зони розвантаження в межах Причорноморської низовини. Концентрація речовин I класу небезпеки (селен, ртуть, фтор) у підземних водах четвертинного водоносного горизонту на досліджуваній території перевищує нормативи локально — у зоні впливу хвостосховищ, що зумовлено інфільтрацією та міграцією забруднених вод. Сполуки II класу небезпеки (бром, літій, нікель) характеризуються ширшим ареалом поширення. Зокрема, вміст броду на більшості досліджуваних ділянок, за винятком західної та центральної частин, перевищує ГДК у 5–15 разів; забруднення нікелем із показниками понад 3 ГДК зафіксовано переважно у східному секторі. Забруднення підземних вод сполуками III класу небезпеки (стронцій, магній, барій) спостерігається переважно в межах західних та північних територій. Забруднення підземних вод сполуками IV класу небезпеки (титан, алюміній, залізо, сумарна радіоактивність) характеризується мозаїчністю розподілу. Найбільші площі поширення радіоактивно забруднених підземних вод

зафіксовано у західному та східному секторах досліджуваної території. Перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) за вмістом алюмінію та заліза притаманне зонам, прилеглим до хвостосховищ Центрального та Північного гірничо-збагачувальних комбінатів.

Згідно з показником сумарного забруднення підземних вод четвертинного водоносного горизонту, досліджувана територія класифікується як така, що має ступінь забруднення від надмірного до помірного. Відносно чисті води спостерігаються лише на захід від Карачунівського водосховища та на північ від хвостосховища Північного гірничо-збагачувального комбінату.

Варто зазначити, що у межах зон впливу ключових гідротехнічних споруд гірничорудного комплексу — хвостосховищ та гідровідвалів — діють специфічні закономірності формування хімічного складу підземних вод [12]. Зазначені закономірності зумовлені спрямованістю окисно-відновних реакцій, що відбуваються за активної участі мікроорганізмів. Істотні зміни гідрохімічного та мікробіологічного середовища спостерігаються за вектором: водойма (ставок-накопичувач) — донні відклади — зона міграції підземних вод. У межах ставка в балці Свистунова [68], а також аналогічних накопичувачів двофазних стоків [75] гірничорудних підприємств, домінуючими процесами є окиснення, обмінні реакції та сорбційно-десорбційні явища. Серед останніх переважає сорбція іонів важких металів на завислих частках, а також формування органо-мінеральних високомолекулярних лігандів із наступною їх коагуляцією. Процеси окиснення сульфідних мінералів у гідровідвалах та відходах збагачення залізних руд (хвостосховищах) призводять до утворення сульфатів, іонів заліза та водню. Утворюється сірчана кислота, яка підлягає нейтралізації карбонатними породами. Водночас за умов $E_h = 350 \dots 380$ мВ та $pH = 7,6 \dots 8,0$ залізо (II) окиснюється до вищого ступеня, після чого гідролізує з утворенням важкорозчинного гідроксиду заліза (III). При суттєвому підвищенні

концентрації сульфатів (до 150–350 мг/дм³) частина заліза (II) утворює сполуки із сульфат-іонами, залишаючись у розчиненому стані.

Під час фільтрації техногенних розчинів через донні відклади відбувається суттєва зміна фізико-хімічних параметрів середовища ($E_h = 150 \dots 250$ мВ, $pH = 6,0 \dots 7,5$), що супроводжується активізацією відновлювальних процесів за участі мікробіологічних угруповань (тіонових, сульфатредукуювальних та денітрифікуювальних бактерій). Це забезпечує самоочищення шахтних вод від нітратів, які відновлюються до вільного азоту, а також від сульфатів, що трансформуються у карбонати з виділенням сірководню та вуглекислого газу. Молекули H_2S та іони HS^- формують сірководневий бар'єр, який перешкоджає міграції заліза. Вибір акцептора протонів (H^+) за наявності окисників визначається термодинамічними параметрами окисно-відновних реакцій. Переважним процесом є денітрифікація, внаслідок якої утворюються N_2 та SO_4^{2-} . Життєдіяльність мікроорганізмів також спричиняє зміни у співвідношенні компонентів карбонатної системи, оскільки вуглецеві сполуки є основою метаболічних процесів у клітинах. У водній фазі донних відкладень концентрація HCO_3^- та CO_2 зростає до 350 мг/дм³ та 30 мг/дм³ і більше відповідно.

У водоносних горизонтах, що мають гідравлічний зв'язок із водоймами-накопичувачами, міграція техногенних елементів супроводжується менш інтенсивними фізико-хімічними процесами, які відбуваються переважно в окисному середовищі. За участю тіонових бактерій відбувається окиснення сірчистих сполук (H_2S та HS^-), відновлених під час фільтрації через донні відкладення. У разі наявності крейдових порід відбувається консервація забруднюючих компонентів (зокрема нітратів) у пористих блоках шляхом молекулярної дифузії.

Незадовільний геоекологічний стан підземних вод у досліджуваному районі зумовлений зношеністю інженерного обладнання (насосних станцій та дренажних систем), застосуванням застарілих виробничих технологій, а також

неефективністю існуючих методів очищення води у відстійниках і хвостосховищах.

На основі умов залягання, ступеня водонасиченості та хімічного складу в межах досліджуваної площі виділено п'ять водоносних, два слабководоносні та чотири водотривкі горизонти в породах четвертинного та неогенового віку. У підстилаючих відкладах палеогенової системи залягають відповідні водоносні та водотривкі горизонти.

За результатами аналізу та синтезу геолого-геофізичних матеріалів обґрунтовано вибір геофізичного методу досліджень, який у комплексі з гідрогеологічними даними забезпечує виконання поставлених завдань. Найбільш ефективними методами для діагностики та вирішення проблем підтоплення територій [10-11] виявилися різні модифікації електророзвідки, зокрема вертикальне електричне зондування (ВЕЗ) та метод природного електричного поля (ПП).

Рівень водонасиченості водоносних горизонтів, насамперед першого від поверхні, значною мірою зумовлений техногенними чинниками [76]. До них належать як постійні фактори впливу, так і явища епізодичного чи сезонного характеру. Важливим аспектом є скидання шахтних, кар'єрних та дренажних вод до хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) з подальшим їх використанням у технологічних циклах збагачення залізних руд. Фільтраційні втрати мінералізованих вод на всіх етапах цього процесу чинять негативний вплив на довкілля, спричиняючи низку екологічних наслідків: підтоплення [88-91], засолення ґрунтів, а також активізацію процесів суфозії та карстоутворення [25]. Геоелектричні методи [55; 57; 59] є ключовими інструментами оцінки, що довели свою високу ефективність під час вирішення завдань із виявлення ділянок підтоплення [26] на техногенно навантажених територіях.

Упродовж останніх десятиліть на території Криворізького басейну накопичився комплекс екологічних проблем. У зонах розташування кар'єрів, окрім техногенної трансформації природного рельєфу, інтенсифікуються

процеси обвалів, зсувів та лінійної ерозії. Відвали, що розміщені на колишніх орних землях, акумулюють значні обсяги атмосферних опадів, що сприяє підтопленню прилеглих ділянок та активізації несприятливих інженерно-геологічних явищ.

Основними джерелами антропогенного навантаження на території Південного Кривбасу є хвостосховища «Войкове» та «Об'єднане», відвали «Лівобережні», а також ставок-накопичувач шахтних вод у балці Свистунова [68].

Фільтрація високомінералізованих вод із хвостосховищ, окрім підтоплення територій, спричиняє забруднення водоносних горизонтів, а також призводить до порушення природних умов їх живлення та розвантаження. Системи перехоплення дренажних вод хвостосховищ не забезпечують належної ізоляції водоносних горизонтів від забруднення. Міграція хімічних елементів у водних розчинах у породах криворізької серії здійснюється переважно зонами розривних порушень.

Аналіз даних щодо морфології та структурних особливостей розривних порушень Кривбасу дозволяє дійти таких висновків:

- розривні порушення регіону характеризуються варіативністю просторового положення, морфології, внутрішньої будови та умов формування;
- діагональні розривні порушення, що оперяють розломи першого порядку, розвивалися в умовах стискання земної кори, внаслідок чого їх роль як шляхів міграції підземних вод є малоімовірною;
- поперечні розривні порушення, що виникли в умовах розтягання земної кори, здебільшого зазнали заліковування внаслідок посттектонічних гідротермальних процесів, що суттєво обмежує їхню водопровідну здатність;
- рух підземних вод у межах кристалічного фундаменту реалізується переважно вздовж розривних порушень субмеридіального простягання (азимуту від 0–5° до 10–20°).

Шляхи міграції високомінералізованих вод та зони накопичення

хімічних елементів зумовлені тектонічними особливостями території, фільтраційно-ємнісними властивостями порід, потужністю покривних відкладів, а також тривалістю експлуатації гірничотехнічних об'єктів.

Тектонічні порушення та закарстовані зони формують канали циркуляції підземних вод, забезпечуючи гідравлічний взаємозв'язок між різними гідрогеологічними рівнями. Найбільш динамічним чинником, що значно посилює антропогенний вплив на довкілля, є порушення гідрогеохімічного режиму території. Отже, дослідження впливу фільтрації високомінералізованих вод на геоекологічні процеси є пріоритетним та складним завданням у межах вирішення актуальних геоекологічних проблем Кривбасу.

З метою оцінки сучасного стану та динаміки розвитку об'єктів дослідження автором було здійснено збір та аналіз результатів попередніх геофізичних, геологічних, петрофізичних [63] і гідрогеологічних робіт. Узагальнення наявних даних, доповнених власними геофізичними дослідженнями, проведеними за розробленою методикою збору та інтерпретації в умовах техногенно навантажених територій, забезпечує підвищення достовірності оцінки впливу міграції мінералізованих вод на геомеханічний стан масиву гірських порід.

3.5 Геодинамічні процеси території досліджень

Геодинамічні процеси визначаються як сукупність фізико-хімічних змін, що відбуваються у надрах та на поверхні Землі під впливом ендегенних (глибинних) і екзогенних (зовнішніх) сил.

Екзогенні геологічні процеси — це явища, що відбуваються на земній поверхні та у приповерхневій зоні земної кори внаслідок механічної та фізико-хімічної взаємодії з атмосферою та гідросферою. Розвиток екзогенних явищ зумовлений комплексом природних (біотичних та абіотичних) і

антропогенних чинників, причому останні суттєво впливають на динаміку природних процесів рельєфоутворення.

На території Криворізького залізорудного басейну спостерігаються такі явища, як осідання та зсуви гірських порід над підземними виробками, а також інтенсифікація процесів підтоплення [26] та заболочування, що є взаємопов'язаними наслідками антропогенного впливу.

У межах даної дисертаційної роботи проаналізовано явища, що мають безпосереднє відношення до об'єкта дослідження. Зокрема, підтоплення, що визначається як підняття рівня ґрунтових вод до позначки менше ніж 2 м від поверхні, поширилося в межах Кривбасу переважно внаслідок функціонування гідротехнічних споруд [24] (водосховищ та відстійників). *Підтоплення територій* спостерігається як у межах міської забудови (у зонах розташування водосховищ та хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів), так і в сільській місцевості (села Радущине, Веселе, Червоне, Златоустівка, Лозуватка, Красне, Новожи́томир, Неда́йвода). Це явище зумовлене підвищенням рівня ґрунтових вод під час паводків і водопілля, а також експлуатацією Південного, Іскрівського та Карачунівського водосховищ і шламосховища Північного ГЗК. Найбільш масштабні площі підтоплення зафіксовано на території Радущанської, Веселівської та Новолатівської сільських рад [39]. Основними чинниками підтоплення сільськогосподарських угідь є замулення дренажних систем, недостатня потужність насосного обладнання водовідливних станцій, а також підвищення рівня та обсягу водних ресурсів, пов'язане з функціонуванням гідротехнічних споруд [24].

Заболочення, що фіксується у межах степової зони Криворізького залізорудного басейну, є наслідком аномального підняття рівня ґрунтових вод, спричиненого процесами підтоплення [88-91]. Заболочення територій спостерігається поблизу Південного, Карачунівського та Красинського водосховищ, а також у зонах розташування шламосховищ Північного та Центрального гірничо-збагачувальних комбінатів. Поєднання процесів

підтоплення, заболочення та забруднення підземних вод створює передумови для інтенсифікації засолення ґрунтів і карстоутворення в гірських породах, що несе суттєві ризики для населення та економічного сектору регіону. Більшість території характеризується слабким або середнім ступенем ураженості екзогенними геологічними процесами (від 3 до 25 %). Водночас зони видобутку залізної руди вирізняються високим та дуже високим рівнями ураженості (26–50 %) [28].

Отже, поточний геоекологічний стан Кривбасу [60; 61] може бути оцінений як задовільний, проте з тенденцією до критичного, що зумовлює необхідність проведення комплексних та ґрунтовних наукових досліджень. Компонентний аналіз стану атмосферного повітря, поверхневих та підземних вод, а також ґрунтового покриву свідчить, що основними джерелами забруднення є промислові підприємства м. Кривий Ріг, сільськогосподарська діяльність, а також викиди від пересувних джерел — автомобільного та залізничного транспорту (що потребує додаткових досліджень). Формування незадовільного геоекологічного стану зумовлене переважно антропогенними чинниками [76], зокрема впливом розвитку всіх галузей господарського комплексу та забрудненням компонентів ландшафту.

На сучасному етапі ключовою проблемою забезпечення еколого-техногенної безпеки Кривбасу є обґрунтування та врахування гірничо-геологічних умов видобутку залізничної сировини. Ці умови залежать від тектонічних порушень, наявності зон тектонічного та літологічного розущільнення, а також змін гідрогеологічного режиму, спричинених функціонуванням великих техногенних об'єктів (шламосховищ, водосховищ, відвалів гірських порід).

У межах досліджуваної території представлені елементи морфоструктурного рельєфу, формування яких зумовлене ендегенними (переважно тектонічними та неотектонічними) процесами, а також морфоскульптурні форми, що виникли внаслідок дії екзогенних чинників [28].

Значного поширення набули також техногенні форми рельєфу [47], зумовлені інтенсивною промисловою та сільськогосподарською діяльністю.

Морфоструктура досліджуваного регіону характеризується ієрархічною побудовою. Відповідно до геоморфологічного районування, розробленого В. П. Палієнком [37; 42; 43], Криворіжжя належить до Східноєвропейської

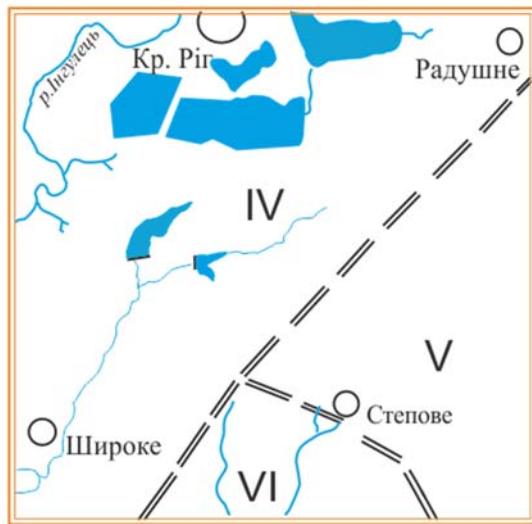


Рисунок 3.9. Схема геоморфологічного районування за Булавою Л. М.

полігенної рівнини, що є морфоструктурою першого порядку.

У межах зазначеної рівнини територія досліджень охоплює дві морфоструктури II порядку. Північна частина належить до Придніпровсько-Приазовської геоморфологічної області цокольних пластово-денудаційних височин (морфоструктура II порядку), зокрема до Центрально-Придніпровської денудаційної височини (морфоструктура III порядку) та її зниженої ділянки — Інгуло-Інгулецької лесової акумулятивної розчленованої рівнини. Південна, більша за площею частина (приблизно від ізогіпси +100 м), розташована в межах Причорноморської геоморфологічної області пластово-аккумулятивних і пластово-денудаційних рівнин, що включає Причорноморську низовину (морфоструктура II порядку) та Північно-Причорноморську рівнину (морфоструктура III порядку).

Зазначені морфоструктури II порядку відповідають ключовим тектонічним елементам регіону — Українському щиту та Причорноморській западині.

Морфоструктури III та IV порядків зумовлені наявністю тектонічних блоків, куполів та валів, площа яких варіюється від кількох десятків тисяч до кількох десятків квадратних кілометрів.

Відповідно, основними елементами морфоструктурного рельєфу регіону є лесово-суглинисті височинні та низовинні вододільні плато,

ускладнені різноманітними морфоскульптурними формами, переважно флювіального та суфозійного походження.

У дисертаційній роботі використано результати геоморфологічного районування морфоструктур IV порядку, проведеного Л. М. Булавою. В основу дослідження покладено історію геоморфогенезу в контексті тектонічних рухів кристалічного фундаменту. Згідно з цим районуванням, територія досліджень охоплює IV, V та VI райони (рис. 3.9).

Четвертий район розташований на схилах гранітоїдних валів та куполів, що характеризуються помірним підняттям та розчленованістю (1,2–2,0 км/км²) переважно короткими скринеподібними балками зі слабкорозвиненою яружною мережею.

Морфоструктури п'ятого типу (V) локалізовані на схилах Українського щита (УЩ), де відбувається інтенсивне розчленування фундаменту на окремі блоки з диференційованими тектонічними рухами. У цьому регіоні розломна тектоніка [40; 46; 56] відіграє визначальну роль у формуванні гідрографічної мережі (балок та річок), а сучасні вертикальні рухи характеризуються переважно уповільненими підняттями зі швидкістю 2 мм на рік.

Шостий тип (VI) морфоструктур охоплює південний схил УЩ, який занурюється під потужну товщу осадового чохла. Для цієї зони притаманний режим тектонічної рівноваги або незначні опускання, при цьому вплив розломної тектоніки на формування рельєфу є мінімальним. Розподіл площі досліджуваної території за основними типами рельєфу наведено в табл. 3.1.

Згідно з отриманими даними, майже 14% території дослідження займають техногенні утворення (відвали, кар'єри, шламосховища), що свідчить про повну трансформацію природного ландшафту в цих зонах.

Таблиця 3.1

Розподіл площі дослідження за основними типами морфоструктур

№ п/п	Номенклатура	Типи морфоструктур	Площа, км ²	Прийняті відмітки обмежування, м	Площа, %	Співвідношення морфоструктур вододіли/яружно-балочні
1	2	3	4	5	6	7
1	7-Г-а	Вододіли	18.98	85–90 і більше	21.8	0.57
		Яружно-балочно-річкові	34	98–85 і менше	38.9	
		Техногенні	34.5	різні	39.3	
2	7-Г-б	Вододіли	45.5	98 і більше	53	1.66
		в тому числі поди	4	98 і менше	24	
		Яружно-балочні	27.5	98 і менше	32	
		Техногенні	14.6	різні	15	
3	7-Г-в	Вододіли	35.5	96–85	40	0.66
		Яружно-балочні	52	менше 96	60	
		Річкові	6	менше 85	15	
4	7-Г-г	Вододіли	53	97 і більше	61	1.56
		в тому числі поди	17	97 і менше	12	
		Яружно-балочні	33.42	97 і менше	39	
5	7-Г	Вододіли	152.98	98 і більше	44	1.04
		В тому числі поди	21	97 і менше	28	
		Яружно-балочно-річкові	146.92	97–85 і менше	42	
		Техногенні	48	різні	14	

Вододільні площі, що характеризуються морфоструктурним типом рельєфу, займають понад 50% території дослідження. Вони представлені останцями давньої поверхні вирівнювання, орієнтованої на південь та захід. Цей факт підтверджується даними про максимальні абсолютні відмітки сучасної поверхні, які варіюються в межах 100–102,6 м над рівнем моря та зосереджені у північній і східній частинах (табл. 3.1, ізогіпси сучасного рельєфу). У південному та західному напрямках висотні показники в центральних частинах вододілів поступово знижуються.

Морфоскульптурний рельєф досліджуваної території класифікується за декількома генетичними типами: флювіальний, карстовий, суфозійний, гравітаційний та еоловий.

Флювіальні форми рельєфу сформовані переважно річковими долинами та їхніми притоками I і II порядків, а також меншими формами — балками, ярами та лощинами (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Яружно-балочна система на лівому березі р. Інгулець поблизу с. Новоселівка (листопад 2016 р.)

Річка Інгулець лише частково охоплює територію дослідження. Долина річки повністю розташована в межах північно-західного сектора ділянки, причому значна її частина характеризується інтенсивно зміненим природним рельєфом. Балки, що дренуються в долину р. Інгулець, мають субширотну орієнтацію. Балки, розташовані в північній частині території (Грушевата, Гордовата, Миролубівська), наразі зайняті великими шламосховищами: «Войкове», «Об'єднане» та «Миролубівське».

Найбільша балка — Широка, протяжність якої становить близько 17 км, має південно-західне простягання та чітко виражену асиметрію будови. Це зумовлено впливом зони сучасної тектонічної активності (ЗСТА), а також особливостями блоків кристалічного фундаменту, що різняться ступенем тектонічної рухливості.

Флювіальні форми рельєфу формують низовинні ділянки, зокрема в західній частині досліджуваної території (долина р. Інгулець з відмітками 60–70 м), у басейні балки Широкої з притоками (90–95 м), а також у південній частині — у верхів'ях б. Першої Кобильної (90–95 м).

Еолові форми рельєфу локалізовані в долині р. Інгулець і представлені еоловими горбами (кучугурами) перевіяних пісків, закріпленими трав'янистою та чагарниковою рослинністю. Потужність еолових відкладів сягає 8 м.

Гравітаційні процеси проявляються на крутих схилах долини р. Інгулець та в межах балок. Вони характеризуються наявністю зсувів, деляпсіогенних (ниркоподібних) опливів ґрунту та мікрозсувів (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Формування зсувів (мікрозсувів) на лівому березі р. Інгулець в районі с. Новоселівка (листопад 2016 р.)

Активація зсувних процесів, мікрозсувів та опливів пухких порід становить значну загрозу для об'єктів інфраструктури та населених пунктів. Зміна геологічного середовища, спричинена будівництвом великомасштабних техногенних споруд (відвалів, дамб, гребель), призводить до порушення природної рівноваги напружено-деформованого стану масивів. Це, своєю чергою, спричиняє втрату стабільності як природних, так і штучних утворень, що може призвести до виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

У східній частині території, у межах вододільних плато, спостерігаються «степові блюдця» — безстічні суфозійні форми рельєфу (западини) округлої або еліпсоподібної конфігурації з глибиною до 1–2 м.

Карстові процеси мають потенціал до розвитку на більшій частині досліджуваної території. Карст регіону класифікується як покритий та задернований; за глибиною залягання — поверхневий і підземний, за

орографічними особливостями — рівнинний. Активізації процесів карстоутворення [25] на цій ділянці сприяють такі чинники:

- * широке поширення карбонатних порід (вапняків, мергелів);
- * субгоризонтальний характер залягання пластів;
- * наявність тектонічних порушень та зон тріщинуватості;
- * циркуляція в товщі порід вод з підвищеною хімічною агресивністю;
- * тривалий геологічний розвиток утворень докембрійського фундаменту впродовж палеозойської та кайнозойської ери.

Морфологічне різноманіття карстового рельєфу представлене карстовими лійками, сліпими ярами, понорами, улоговинами та валами. У південній частині досліджуваної території також виявлено карстові печери.

Карстові форми рельєфу, зокрема провали (рис. 2.12), воронки та просідання земної поверхні, зафіксовані на території населених пунктів Новопетрівка та Новоселівка.



Рисунок 3.12. Техногенне провалля у Кривому Розі

Техногенний рельєф у межах досліджуваної площі становить майже 14% поверхні та представлений кар'єрами, відвалами, шламосховищами, ставком-накопичувачем шахтних вод, а також дамбами та греблями гідротехнічних споруд.

Згідно з класифікацією [47] (рис. 3.13), техногенні форми рельєфу розподіляються на акумулятивні та денудаційні. До денудаційних форм належать кар'єри та зони обвалення відвалів, до акумулятивних — відвали, шламосховища, ставки-накопичувачі, дамби та греблі.

На схилах кар'єрів та відвалів кристалічних порід спостерігається активне утворення зон обвалу. Визначальним чинником у розвитку цих процесів є вплив води, зокрема рухомих водних потоків, які виступають інтенсивним каталізатором руйнування. Сформовані внаслідок обвалів кам'яні та ґрунтові осипи функціонують як природні накопичувачі води різного походження.

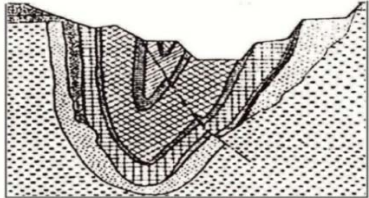
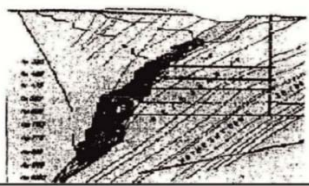
Назва	Визначення	Структура і елементи	Літологічний склад	Схематичний рисунок
Кар'єр	Циркоподібні терасовані денудаційні від'ємні форми рельєфу	Уступ, борт	Відповідає геологічній будові родовища	
Відвал	Трапецієвидні терасовані акумулятивні додатні форми рельєфу з верхів'ям у вигляді плато	Укіс, ярус	Суглинки, глини, глинисто-піщані суміші, вапняки й глинисті сланці (на півдні Кривбасу), сланці, кварцити, гнейси, мігматити, пегматити	
Шламосховища	Акумулятивні алювіальні плато з терасованими, скеляними схилами	Первинні й вторинні дамби, призми привантаження дренажні канали, шламові поля (намівні пляжі)	Суглинки, глини, кварцити, шлами збагачення (SiO_2 , FeO , F_2O_3 , Al_2O_3)	
Зона провалів і зсуву	Денудаційні мульдоподібні, кільцеві і каньйонні з провальними колодязями і терасами на околицях від'ємні форми рельєфу	Провальні колодязі мульдиги прогину тераси, порожнечі	В зоні обвалення: збіднені руди, породи висячого боку; уздовж лежачого боку язички порід осадочного чохла	
Зрошувальні канали	Акумулятивні насипні форми в середині канали з водою	Видовжені прямолінійні форми: дамби з каналами	Земляні дамби всередині бетонні плити	

Рис. 3.13. Техногенні форми рельєфу

Відвали характеризуються наступними особливостями:

- ✓ значна площа розміщення, яка становить близько 7,5 км²;
- ✓ перевищення висотних відміток відвалів над рівнем прилеглої території на 50–80 м;

- ✓ здатність кристалічних порід докембрійського фундаменту та розкритих порід (вапняків, пісковиків, кременистих утворень, піщано-глинистих порід і суглинків) акумулювати атмосферні опади;
- ✓ інтенсивне пилоутворення внаслідок фізико-хімічних властивостей порід, що складають відвали;
- ✓ поступове просочування накопиченої вологи до підшови з формуванням водонасиченого шару та виникненням зон підтоплення на прилеглих територіях;
- ✓ підвищена мінералізація внутрішніх вод відвалів, зумовлена високим вмістом важких металів та шкідливих хімічних елементів.

На території досліджень розташовані хвостосховища АТ «ПівдГЗК» (у балці Грушувата «Войкове»), а також об'єднане хвостосховище АТ «ПівдГЗК» та ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». У межах вказаних об'єктів відбувається процес поступового осідання твердої фази шламів, інтенсифікація якого забезпечується шляхом застосування спеціальних реагентів. Хвостосховища облаштовані дамбами, які обмежують розповсюдження відходів збагачення та надшарового водного дзеркала (рис. 3.13). Як свідчать дані, промислові відходи [36] заповнюють об'єм споруди пошарово, тоді як вода, що за проектом має покривати всю площу сховища, піддається фільтрації як у вертикальному напрямку, так і крізь тіло огорожувальних дамб.

Хвостосховища, ставки-накопичувачі шахтних вод та ставки зворотного водопостачання є джерелами забруднення прилеглих територій. У процесі накопичення в цих резервуарах вода фільтрується через дно та бічні дамби, що, внаслідок недостатньої ефективності протифільтраційних екранів, призводить до забруднення першого від поверхні водоносного горизонту. Регулярні скиди стічних вод із хвостосховищ та накопичувачів у річку Інгулець призводять до суттєвого підвищення її мінералізації та жорсткості, а також посилюють агресивний вплив на водне середовище.

Крім того, на території досліджень зафіксовано зони техногенних просідань та зсувів, що утворилися внаслідок деформацій поверхні над відпрацьованими та закритими гірничими виробками. На поверхні над ними формуються карстові воронки та кільцеві просідання ґрунту.

3.6 Висновки до розділу

У другому розділі дисертації було наведено комплексну характеристику території досліджень у межах південної частини Криворізького залізорудного басейну, що охоплює ділянки розташування основних техногенно навантажених об'єктів: хвостосховищ, ставків-накопичувачів, відвалів гірських порід, виробничих майданчиків та прилеглих територій.

Встановлено, що досліджувана територія характеризується значною концентрацією гірничопромислових і гідротехнічних споруд, які тривалий час функціонують у межах єдиної природно-техногенної системи та формують складні геоекологічні умови. Особливістю району є розташування об'єктів, що належать різним підприємствам, зокрема АТ «ПівдГЗК», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та ДП «Кривбасшахтозакриття», що ускладнює комплексний контроль за станом геологічного середовища та розвитком небезпечних процесів.

На основі аналізу геологічних, гідрогеологічних і геофізичних матеріалів встановлено, що геологічна будова території є складною та неоднорідною. Детальна геологічна характеристика наведена на прикладі виробничого майданчика АТ «ПівдГЗК», у межах якого впродовж останніх років систематично виконуються геофізичні дослідження у зв'язку з розвитком кар'єрних робіт, необхідністю уточнення гідрогеологічної обстановки та виявленням ділянок потенційного підтоплення і можливого розвитку небезпечних геологічних процесів. Отримані результати використані для інтерпретації процесів у межах інших техногенно трансформованих об'єктів району.

Визначено, що техногенне навантаження суттєво впливає на природний гідрогеологічний режим території, проявляючись у зміні напрямків руху підземних вод, підвищенні водонасиченості масивів, локальному підтопленні та погіршенні геоекологічного стану окремих ділянок.

Встановлено, що значний вплив на розвиток небезпечних геологічних процесів мають водоакумулюючі властивості відвалів, фільтрація техногенних вод із хвостосховищ і ставків-накопичувачів, а також наявність старих гірничих виробок і зон вилуговування у вапнякових породах. Це створює передумови для активізації зсувних, провальних і підтоплювальних процесів у межах досліджуваної території. Одночасно з техногенним впливом територія перебуває під дією природних геологічних чинників, зокрема карстоутворення та сучасної тектонічної активності, які контролюють розподіл поверхневих і підземних вод та впливають на просторову локалізацію небезпечних процесів.

Таким чином, встановлено, що територія досліджень є складною природно-техногенною геосистемою з високим ступенем трансформації геологічного середовища. Це обґрунтовує необхідність застосування комплексних геоелектричних досліджень для уточнення гідрогеологічної структури, визначення зон техногенного впливу та оцінки розвитку небезпечних геоекологічних процесів у межах південного Кривбасу.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Дослідження механізму розвантаження надмірних поверхневих вод на території Кривбасу за результатами повторних геофізичних спостережень

Повторні геофізичні спостереження, у яких автор приймав участь, вивчали механізм скидання надмірних поверхневих вод у геологічне середовище (на прикладі дослідження кар'єру, проведеного на півдні Кривбасу). Схематично розташування досліджуваних профілей зображено на рис. 4.1.

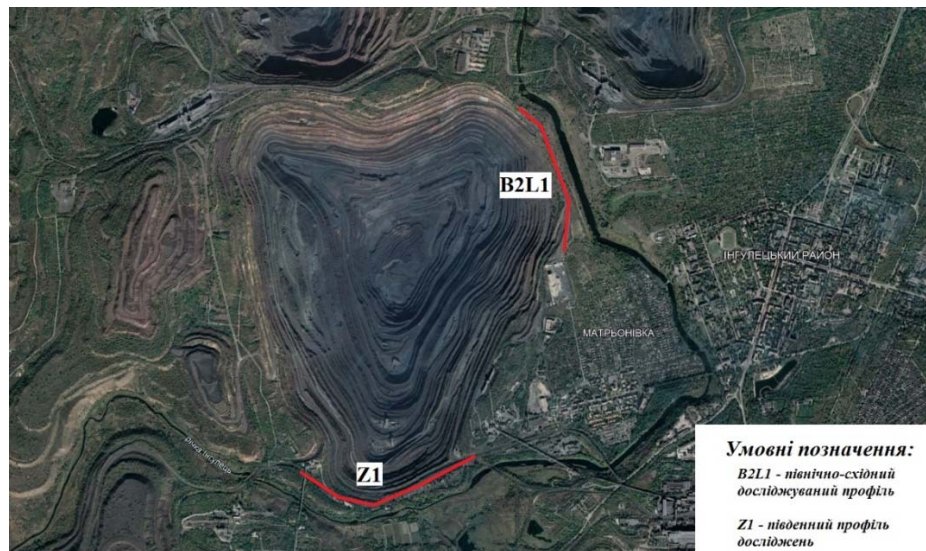


Рис. 4.1. Схеми розташування геофізичних профілів у межах кар'єру

Результати, отримані у 2021 році та повторені у 2024 році, показали, як протікає гідрогеодинамічний процес у підземних водах зі значним затопленням осадового чохла поверхневими водами. Дослідження з використанням методу природного поля (ПП) підтвердили можливість його використання для вивчення механізму швидкого водонасичення геологічного розрізу та шляху скидання підземних вод. Поведінка потенціалу та градієнта природного поля показує їх залежність від процесу інфільтрації надмірних поверхневих вод у геологічне середовище. Знак та амплітуда ґрунтового

потенціалу в області досліджуваних профілів показують перспективи застосування методу в районах з відкритими та закритими системами розломів.

На різкі зміни рівня ґрунтових вод та затоплення територій також впливає скидання величезних обсягів води для промивання річкових вод у містах активного видобутку руди в Південному Кривбасі. Вони спричиняють швидкі гідродинамічні процеси, що впливають на розвиток зсувів не лише на берегах річок, а й на бортах кар'єрів, відвалів та шламосховищ завдаючи значної шкоди як самим підприємствам, так і сільськогосподарським угіддям та населенню.

У 2021 році, у березні, квітні та червні, авторами було проведено моніторингові польові спостереження для оцінки впливу гірничих робіт у кар'єрі на р. Інгулець (права притока Дніпра) з використанням методів електророзвідки (різними модифікаціями) та гравірозвідки.

В результаті обробки польових геофізичних спостережень та раніше отриманих даних гідрогеологічних та геофізичних досліджень, космічної зйомки [64] в районі кар'єру та навколо нього було встановлено сучасні гідрогеодинамічні процеси в геологічному середовищі.

Під час досліджень у 2021 році вперше було вивчено вплив скидання величезних обсягів води з Карачунівського водосховища в р. Інгулець, що спричинило значне та швидке підвищення рівня води в річці та перезволоження схилів кар'єру та берегів річки ґрунтовими водами.

У липні 2024 року було проведено повторні спостереження в тих самих точках та за тією ж методикою. Методологія геофізичних досліджень у липні 2024 року геофізичні роботи було повторено з кроком 10 м на профілях 2021 року - B2L1 та Z1: профільні спостереження методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ); профільні спостереження методом електротомографії (ЕТ); профільні спостереження природного поля (ПП);

профільні спостереження методом гравіметрії [85-87]; повторні високоточні топогеодезичні спостереження.

Полеві спостереження методом ПП проводилися градієнтним методом вздовж замкнутого контуру, який був прив'язаний до точок з відомим потенціалом опорного полігону. Початкова та кінцева точки кожного профілю були прив'язані до кінцевих точок попереднього профілю. Хід спостережень на профілях проводився в прямому та зворотному напрямках. За такого порядку спостережень їх поляризація буде включатися до вимірювань або з одним знаком, або з протилежним знаком, а при підсумовуванні вимірювань вздовж контуру при розрахунку потенціалів похибка, зумовлена поляризацією, не накопичуватиметься. Для кожного профілю було розраховано кількісні параметри потенціалів та градієнтів природного поля (у мілівольтах), які показано на рис. 4.2 та 4.3.

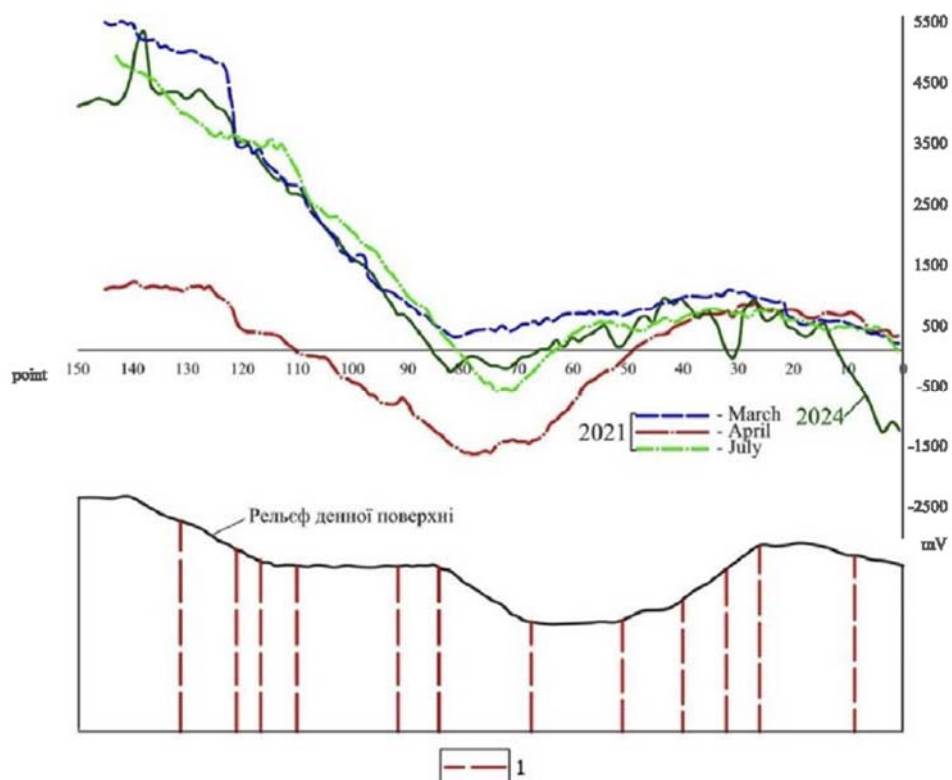


Рисунок 4.2. Графіки зміни природного поля на північно-східному профілі B2L1 у 2021 та 2024 роках. Спостереження 21 березня, 14 квітня та 2 липня 2021 та 30 липня 2024 року (Pigulevskiy et al., 2023, 2025).

Умовні позначення: 1 – тектонічні порушення за даними геофізичних досліджень

Обробка комплексних геофізичних спостережень вздовж профілю B2L1 (рис. 4.2) показала дуже складну геологічну будову верхньої частини борту кар'єру. Слабомінералізовані води не досягають денної поверхні, а переважно знаходяться в ослаблених тектонічних зонах та в міжпластовому просторі. Їхній верхній край здебільшого розташований на глибинах $-3 \div -5$ м від поверхні. Заболочування в північно-східній частині профілю пов'язане з тріщинуватістю порід, які розташовані поблизу тектонічної зони, утвореної Тарапаківсько-Скелевацькою системою розломів (Пігулевський та ін., 2023).

Порівнюючи результати польових спостережень у 2021 та 2024 роках, слід зазначити, що геоелектричний розріз став більш резистивним, що, ймовірно, пов'язано зі збільшенням геоелектричного опору геологічного розрізу під час сухої та спекотної погоди, яка тривала протягом червня-липня 2024 року. Графіки ПП (рис. 4.2) показують високий потенціал верхньої частини геологічного розрізу для збагачення водою в інтервалі профілю між ПК 96-145.

На рисунку видно, що до ПК 30 відсутня фільтрація річкової води в кристалічних породах, а далі на південь, разом зі збільшенням товщини осадового чохла, також збільшується її поглинання породами. З часом геологічний розріз насичується водою, і процес поглинання переходить у рівноважний режим. Однак у межах профілю залишаються дві області між ПК 65-80 та 125-145, де поглинання води продовжується. Загальна тенденція рівня природного поля за три роки з 2021 по 2024 рік не змінилася, за винятком двох ділянок між ПК 32-33 та 53-54, де відзначається сучасне водопоглинання.

За результатами комплексної обробки спостережень та моніторингу природного поля вздовж профілю Z1 на півдні кар'єру показані на рис. 4.3. У межах профілю відзначається зниження питомого електричного опору, що пов'язано з більшою товщиною осадового шару, який перекриває кристалічний фундамент. Порівняно з профілем B2L1 помітне підвищене заболочення геологічного розрізу.

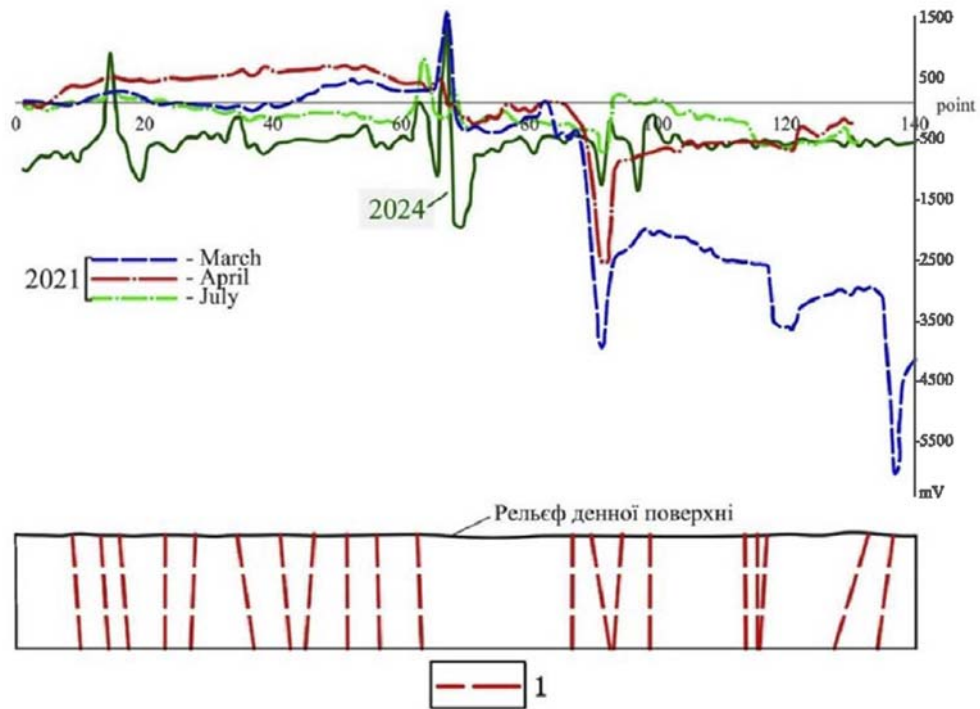


Рисунок 4.3. Графіки ПП на профілі Z1, отримані 21 березня, 14 квітня та 2 липня 2021 року (Pigulevskiy et al. 2023) та липня 2024 р.

Умовні позначення: 1 – тектонічні порушення за даними геофізичних досліджень

Різкі зміни питомого опору свідчать про переважання субвертикальних та крутопадаючих розломів у геологічному розрізі. Найбільш заболочені породи залягають переважно на глибинах від 5 до 20 м від поверхні. На заході профілю Z1 між РК 100-140 (рис. 4.3) відзначається обводнення верхньої частини розрізу. Воно простежується фрагментарними комірками, розташованими на різних рівнях. Тут проходить потужна зона Тарапаківської системи розломів, вздовж якої з півдня до кар'єру надходить щорічна вода з р. Інгульця.

Вздовж профілю Z1 у нижній частині розрізу простежуються інтервали різної інтенсивності водопоглинання, де залягають різноманітні кварцові піски (з включеннями гальки). Під ними, на глибинах понад 15-20 м, виділяються породи, більш стійкі до заболочування. Повторні спостереження показали, що протягом цього часу осадовий чохол був насичений, що призвело до підвищення рівня потенціалу ПП у східній частині профілю (рис. 4.3). На графіках показано локальну ділянку, де поглинання надлишку річної води

продовжувалося у липні 2021 року. Цей факт свідчить про наявність відкритого розлому, який живить цей шар із заходу.

Результати моніторингових спостережень 2 липня показують, що збагачення осадового шару водою завершено та розпочався режим водного балансу в підземних водах.

За підсумками отриманих результатів можливо відмітити, що при взаємодії фізичних параметрів: по-перше, виявляються зони розущільнення та тріщинуватості, які характеризуються низькою щільністю та підвищеним значенням електропровідності через водонасиченість; по-друге, тектонічні порушення та зони обвалів корелюють із аномаліями природного електричного поля.

При цьому для математичного моделювання процесу рівняння потенціалу має вигляд:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0,$$

де σ – провідність середовища, V – електричний потенціал.

Аналіз потоку підземних вод:

$$Q = -K \cdot \nabla h,$$

де Q – швидкість потоку, K – коефіцієнт фільтрації, h – гідравлічний потенціал.

Наведені результати досліджень показують, що фільтраційні потоки в зонах інфільтрації супроводжуються від’ємним потенціалом природного поля, а в зонах інфлюації або близько від них (ексфільтрації) – додатнім потенціалом. Ці потенціали можуть досягати, в залежності від інтенсивності

фільтраційного потоку, перших десятків мілівольт. Методом ПП, переважно, вирішують дві задачі при дослідженні процесів підтоплення [26] та зсувів:

- оконтурення порід різного літологічного складу, структури та тріщинуватості;
- визначення зон інфільтрації поверхневих вод і атмосферних опадів, а також зон ексфільтрації підземних вод у кар'єр.

При моніторингових спостереженнях методом ПП можливо оперативно вивчати гідрогеологічні особливості розвитку не тільки зсувних процесів, но і початку моменту інтенсивного зволоження ґрунту для прийняття інженерних запобіжних рішень. При обладнанні вимірювального приладу блоком для передачі інформації в онлайн-режимі можливо визначати момент швидкого зволоження вивчаємого геологічного розрізу.

Отримані результати можуть бути використані на початковому етапі моніторингу територій з активним розвитком зсувів для побудови оптимальної сітки спостереження та вибору місць можливого первинного обвалення з подальшим використанням дорогих методів моніторингу. Метод ПП є недорогим та дуже швидким. Його можна використовувати для вивчення процесів насичення та зневоднення зсувних територій у різних регіонах України та за її межами.

4.2 Результати застосування диференційних характеристик при інтерпретації кривих ВЕЗ

Подальший розвиток системи обробки та інтерпретації кривих ВЕЗ у межах досліджуваної території було виділено два основні водоносні горизонти: у четвертинних відкладах з глибиною залягання від 2,5 до 13,1 м та у неогенових відкладах — від 10,5 до 22,7 м. Аналіз результатів попередніх досліджень показав, що однозначне картування зон з особливо високою мінералізацією підземних вод є складним завданням, оскільки їх формування та поширення обумовлено комплексом природних і техногенних факторів.

Особливу роль у формуванні сучасного гідрогеологічного режиму території відіграє тектонічна будова. Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом у межах Кривбасу формує у кристалічному фундаменті різнорангову систему розломів [5]. Дрібні тектонічні порушення та пов'язані з ними зони підвищеної проникності впливають на формування і швидкість розвитку негативних геологічних та техногенних процесів – підтоплення [88-91], просідання ґрунтів, провалів і зсувів.

Аналіз отриманих геоелектричних побудов показує, що шари осадових порід мають широкий розмах висотних позначок як покрівлі, так і підосви, що може бути пояснено наявністю розривних тектонічних порушень. За результатами запропонованої обробки польових геоелектричних досліджень та узагальнення геологічних, гідрогеологічних і геофізичних матеріалів встановлено, що у просторовому відношенні виділені аномалії приурочені до певних тектонічних зон.

Високі значення мінералізації підземних вод переважно поширені між розломами Західним і Тарапаківським. Виділені підвищені або знижені значення мінералізації також приурочені до локальних ділянок, положення яких визначається Криворізькою системою субмеридіональних розломів та зрізною діагональною системою північно-західного простягання.

Результати аналізу аналога повного градієнта (рис. 2.8) свідчать про наявність локальних зон неоднорідності геологічного середовища, які можуть бути пов'язані з тектонічними порушеннями та зонами підвищеної тріщинуватості. Мінімальні значення $\text{Grad}(\rho_p)$ дозволяють простежити положення окремих структурних елементів геологічного розрізу та виділити можливі шляхи циркуляції підземних вод.

На розрізах аналога кривизни $S(\rho_p)$ (рис. 2.9) більш чітко простежуються межі окремих геологічних тіл та локальні ускладнення геологічної будови. Екстремальні значення кривизни відповідають зонам порушення статистичної однорідності геоелектричного поля, що може бути пов'язано з тектонічними зонами або ділянками зміни літологічного складу порід.

Отримані результати дозволили встановити, що основними носіями підвищених показників мінералізації підземних вод є великі тектонічні порушення, які являють собою лінійні зони шириною від десятків до сотень метрів. Тектонічні порушення та закарстовані зони виступають шляхами циркуляції підземних вод і визначають гідравлічний зв'язок між водами різних водоносних горизонтів.

Шляхи міграції високомінералізованих вод та накопичення хімічних елементів залежать від тектонічних особливостей території, проникності та пористості порід, потужності покривних відкладів і тривалості експлуатації гірничотехнічних об'єктів.

Проведеними електророзвідувальними роботами у модифікації ВЕЗ між Лівобережними відвалами, закрутом р. Інгулець та с. Новоселівка ділянок суцільного підтоплення [26] не виявлено. Уздовж профілів у верхній частині геологічного розрізу від 2–5 до 10 м у більшості випадків спостерігаються підвищені значення питомого опору, що свідчить про відсутність значного обводнення у межах досліджуваної території. Виконані геоелектричні дослідження [55; 57; 59] дозволили побудувати прогнозну карту глибин залягання докембрійських порід та встановити наявність локальної депресії по покрівлі фундаменту в основі ставка «Леб'яжий». Зона, що описується, обумовлена специфікою вузла перетину різноорієнтованих розривних порушень, де у вигляді лінз зберігаються високомінералізовані води.

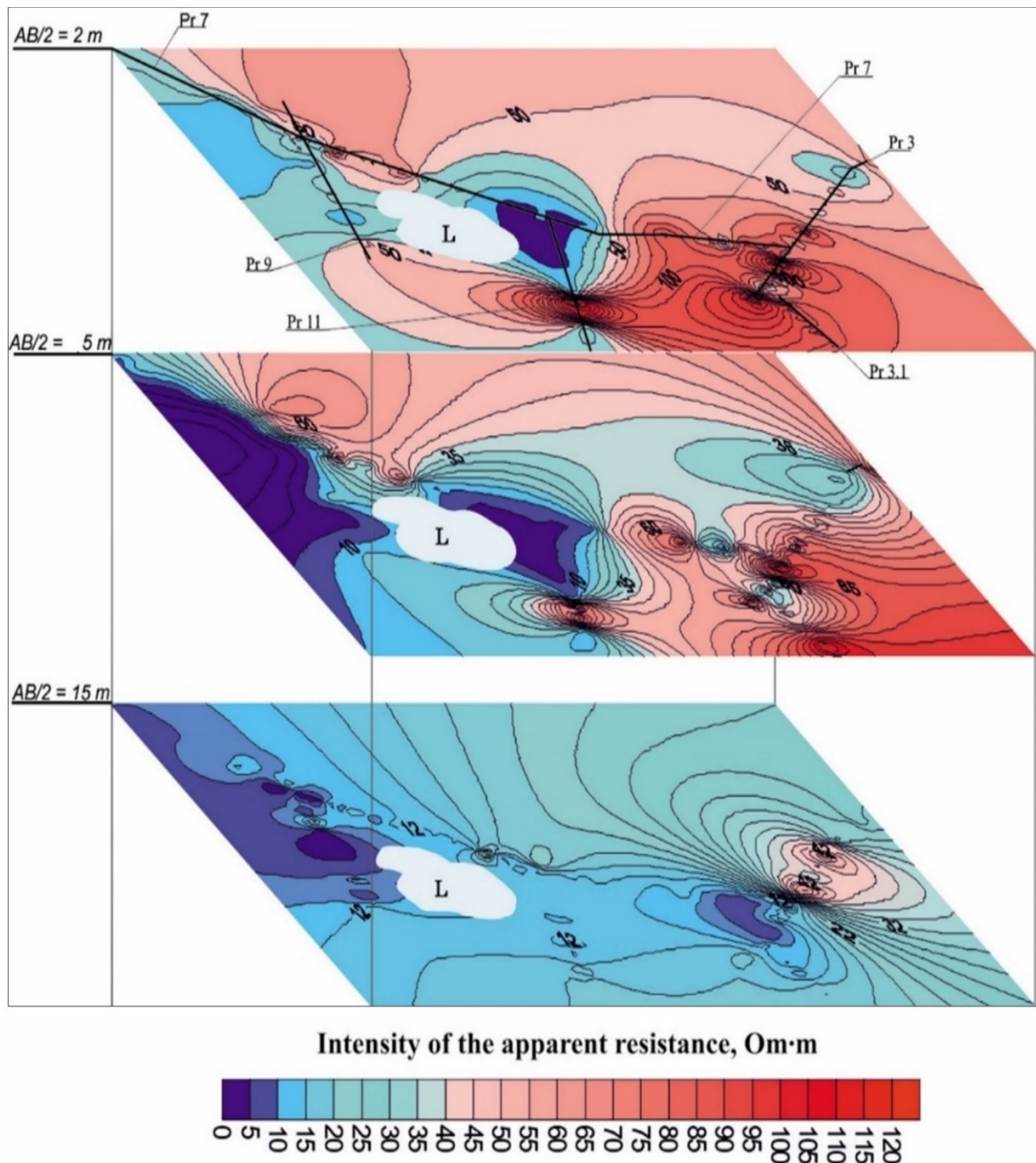


Рис. 4.4. Погоризонтні зрізи на ділянці ставка Леб'язого (в аксонометрії) опору ρ_n на розносах $AB/2$ (1,5–15,0 м)

На погоризонтних зрізах ВЕЗ (рис. 4.4) простежується міграція мінералізованих вод на різних стратиграфічних рівнях. Темно-сині ділянки відповідають зонам понижених значень питомого опору, які можуть бути пов'язані з поширенням високомінералізованих підземних вод. Аналіз побудованих погоризонтних зрізів свідчить про складний характер фільтраційних процесів досліджуваної території та підтверджує суттєвий вплив тектонічних порушень на формування шляхів міграції підземних вод.

Отримані результати підтверджують ефективність використання геоелектричних методів [62] для дослідження впливу тектонічних процесів на формування сучасного гідрогеологічного режиму території Кривбасу та дозволяють використовувати запропонований підхід для прогнозування розвитку процесів підтоплення [88-91] в межах гірничопромислових територій.

Комплексний аналіз геоелектричних побудов, включаючи виміряне та згладжене поле позірною питомого опору, а також поле кривізми, дозволив деталізувати особливості геологічної будови досліджуваної території та виділити зони можливих тектонічних порушень. На субширотних прогнозованих геологічних розрізах за профілями ВЕЗ № 11-13 (рис. 4.10-4.12) простежуються порушення суцільності геологічних шарів, зміни потужностей відкладів та локальні зони підвищеної неоднорідності геоелектричного середовища. Виділені аномальні ділянки можуть бути пов'язані із зонами тріщинуватості та шляхами міграції підземних вод.

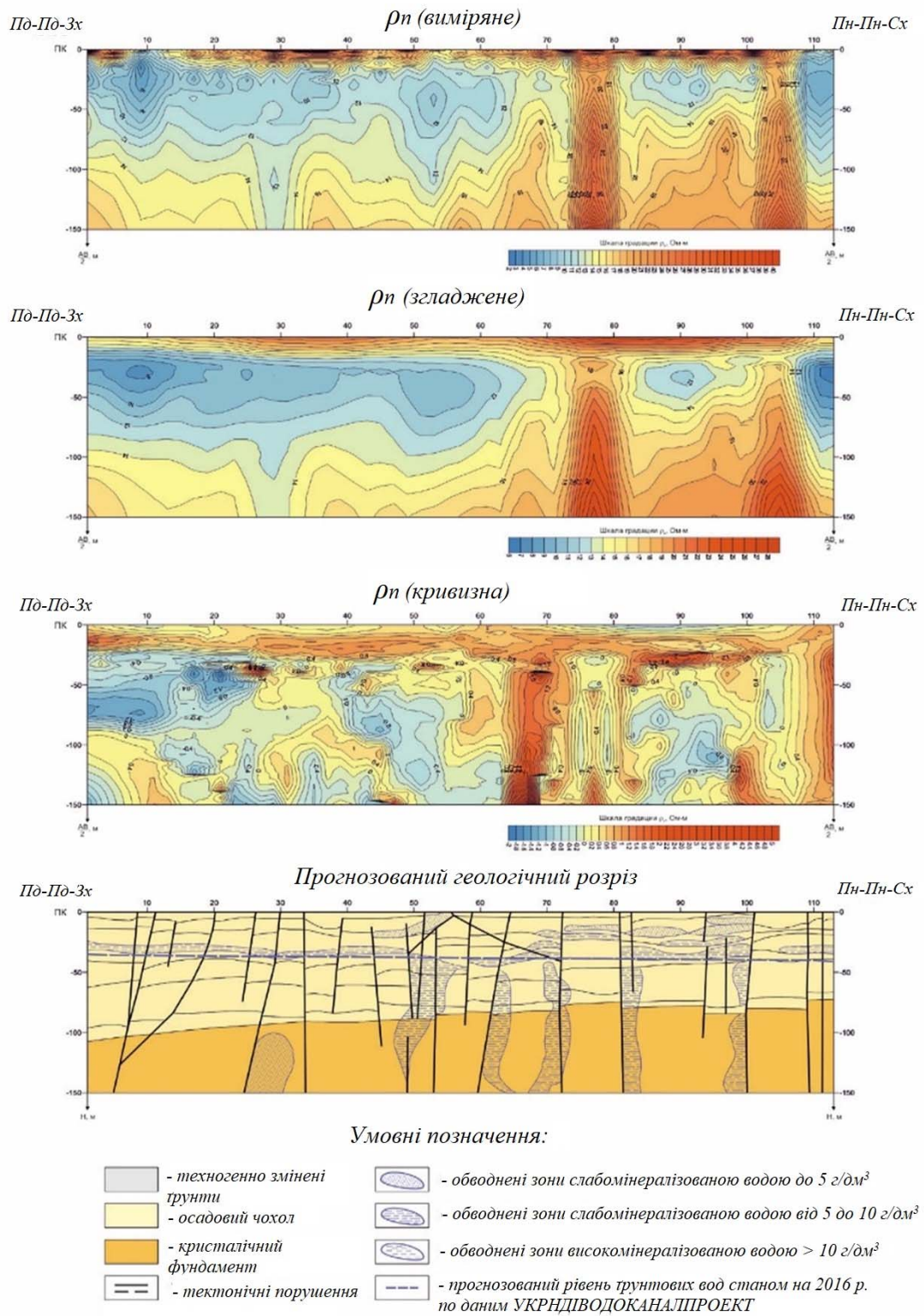
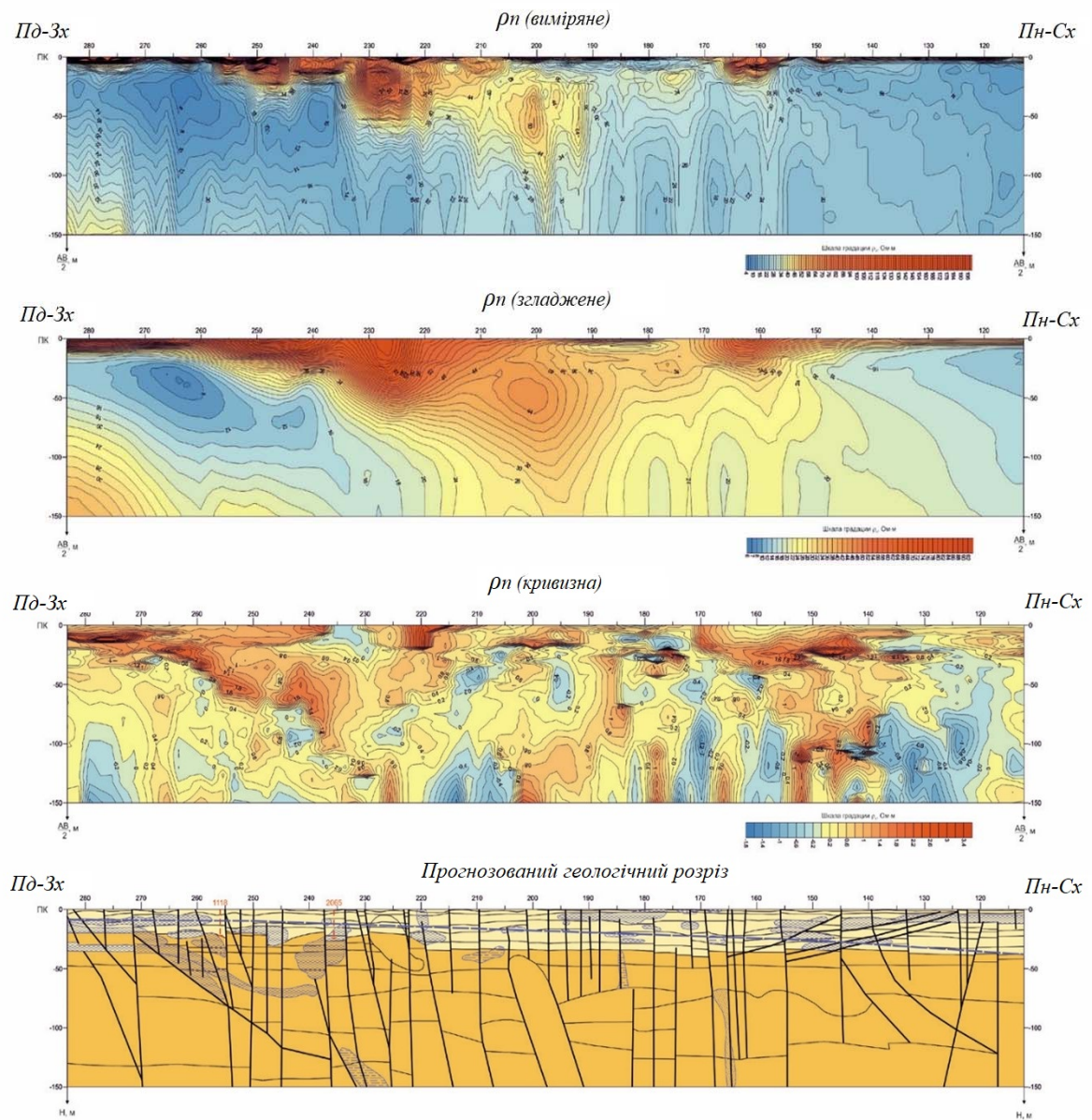
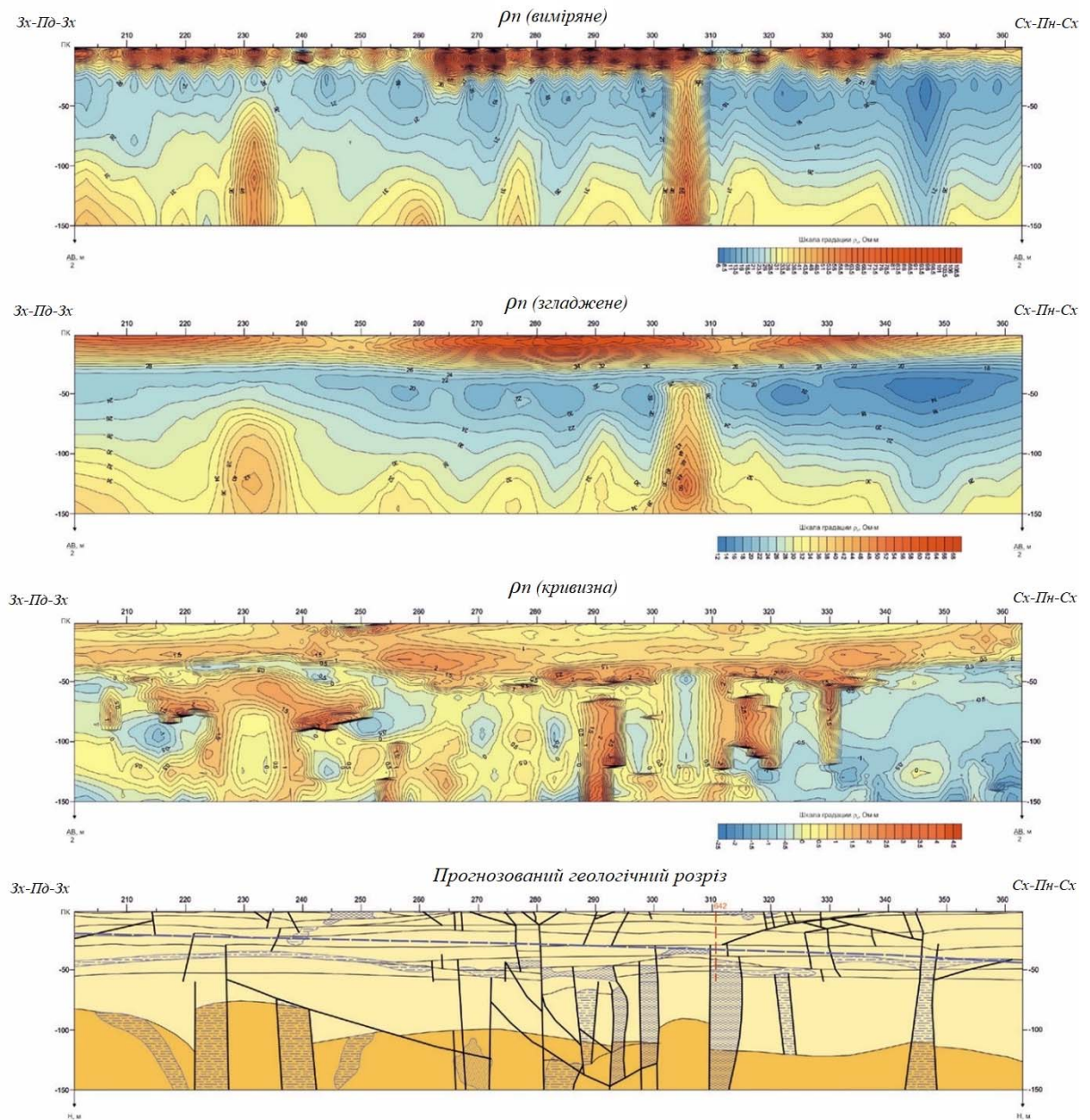


Рис. 4.5. Геолого-геофізичний розріз вздовж профілю № 11



Умовні позначення зображені на рисунку 3.15.

Рис. 4.6. Геолого-геофізичний розріз вздовж профілю № 12



Умовні позначення зображені на рисунку 3.15.

Рис. 4.7. Геолого-геофізичний розріз вздовж профілю № 13

На рис. 4.5-4.7 добре простежується міграція мінералізованих вод на різних стратиграфічних рівнях. Аналіз побудованих розрізів свідчить про складний характер фільтраційних процесів у межах досліджуваної території та підтверджує суттєвий вплив тектонічних порушень, які мають різні кути падіння та потужність, що впливає на формування шляхів міграції підземних вод.

4.3 Дослідження тектонічних процесів на техногенно обумовлені зміни на території Південного Кривбасу

При вивченні ступеню й характеру техногенно обумовлених змін у стані гідрогеологічної структури земної кори за результатами аналізу даних раніше виконаних гідрогеологічних, гідрологічних, інженерно – геологічних і геофізичних досліджень території Південної промзони Кривбасу, в межах якої розташований виробничий майданчик АТ «ПВДГЗК».

Для відображення динаміки природно-техногенно обумовлених гідрогеологічних змін на території на південь від м. Кривий Ріг вивчав доступні звіти спеціальних наукових гідрогеологічних досліджень ділянки й дані моніторингових спостережень за режимом поверхневих і підземних вод території досліджень за 2004-2024 рр.

Враховуючи, що територія досліджень вивчена нерівномірною сіткою свердловин де відстань між ними може сягати 1-2 км, тому нерівномірність розмірів і кількості блоків сітки інтерполяції для території не дозволяє адекватного вивчити розломно-блокову будову й коректне локалізувати лінійні і площинні об'єкти.

Основним репером на розглянутій території було значення рівнів підземних вод у водоносному горизонті четвертинних відкладів. Ці дані отримані при аналізі показників напорів води в спостережних свердловинах режимної мережі, а також за результатами раніше проведених інженерно-геологічних досліджень. Вважається, що рівні мінералізованих підземних вод є найбільш надійними кількісними показниками.

У результаті робіт з верифікації було проведене зіставлення рівнів (гідроізогіпси) водоносного комплексу з спостереженнями за рівнем ґрунтових вод в свердловинах гідропостережної мережі).

Водоносний горизонт четвертинних відкладів Криворізького басейну (Q_{I-IV}) є верхнім безнапірним гідрогеологічним рівнем, який частіше за все приурочений до алювіальних, делювіальних та техногенних відкладів, що

формують верхню товщу регіону. Цей горизонт характеризується просторовою мінливістю літологічного складу, від пісків, супісків та суглинків до гравійно-галечникового ґрунту.

Водотривкими ґрунтами частіше за все виступають щільні різновиди важких суглинків та глин. Глибина залягання рівня води становить від 1,5 до 12 м при коливанні потужності від кількох сантиметрів до 20 м, середня – 2-5 м. Суглинки мають незначну водозбагаченість, дебіт колодязів та свердловин становить 0,002-0,3 л/сек. Добовий водозабір із колодязів становить 0,2-20 м³. За хімічним складом води хлоридно-сульфатно-натрієві з мінералізацією до 12 г/дм³.

Станом на 2018 рік водопостачання горизонту відбувається завдяки інфільтрації атмосферних опадів, інфільтрації з поверхневих водотоків (р. Інгулець) та різних вод техногенного походження. Режим горизонту в межах досліджуваної території дуже залежить від роботи гірничодобувних підприємств, що діють на території досліджень. В таких умовах інтенсивного гірничодобувного освоєння, гідрогеодинамічний режим зазнав істотних трансформуваль, серед яких, на окремих ділянках він дренається кар'єрами, зонами впливу шахт, на інших – поповнюється за рахунок інфільтрації технічних вод із водосховищ [24], шламонакопичувачів, хвостосховищ, каналів та інших промислових втрат, що призводить до ризиків підйому рівня води та підтоплення [26] територій. Також при надмірному скиданні вод з хвостосховищ, призводить до розвитку зсувів, деформацій ґрунту та активізації карстово-суфозійних процесів у приповерхневих відкладах [49-52].

Зіставлення розрахованих значень гідроізогіпс і абсолютних оцінок води (рівнів) у спостережних свердловинах свідчить про досить добру відповідність розробленої моделі існуючим природно-техногенним умовам.

У процесі верифікації моделі другого від поверхні водоносного горизонту була побудована карта гідроізогіпс території (для неогенового й алювіального водоносних горизонтів). Зіставлення модельних (гідроізогіпс) і рівнів (абсолютні відмітки води) у спостережних свердловинах свідчить про

добру відповідність розробленої моделі існуючим природно-техногенним умовам.

За результатами моделювання неогенового водоносного горизонту, був визначений напрямок руху підземних вод на досліджуваній території (рис. 4.8). Встановлено загальний напрямок потоку від вододілів на північному сході модельованої області убік р. Інгулець, а також убік ставка-накопичувача у балці Свистунова.

У балці Свистунова [68] утворився купол підземних вод за рахунок перетікання фільтраційних вод з верхнього водоносного горизонту та фільтраційних втрат через дно хвостосховища «Об'єднане» по субмеридіональним розломам, що обумовлюється відсутністю розділяючого водотривкого шару суглинків і глин між водоносними пластами на цій частині території.

Активний обмін мінералізованих вод в південній частині промислової зони Кривбасу, окрім вже виявлених основних напрямів фільтрації, сприяє розвитку обводненості розкритих тектонічних розломів та їх зон дезінтеграції, що сприяє до розвитку карстових процесів [25], які в свою чергу викликають додаткові зміни рівнів поверхней першого та другого водоносного горизонту.

Переміщення мінералізованих вод також істотно впливають на фільтраційні властивості лесовидних суглинків верхньої частини розрізу, підживлюючи їх і сприяють формуванню нових зон активної фільтрації. В зв'язку з наявністю мозаїчних зон розгрузки підземних вод в кристалічній породі та карсти, суцільна зона розповсюдження першого та другого водоносного горизонту, а також підтоплення відсутня [88-91]. Але ці процеси створюють гідравлічний зв'язок з тріщинними водами [67], завдяки чому формуються ділянки активної вертикальної фільтрації.

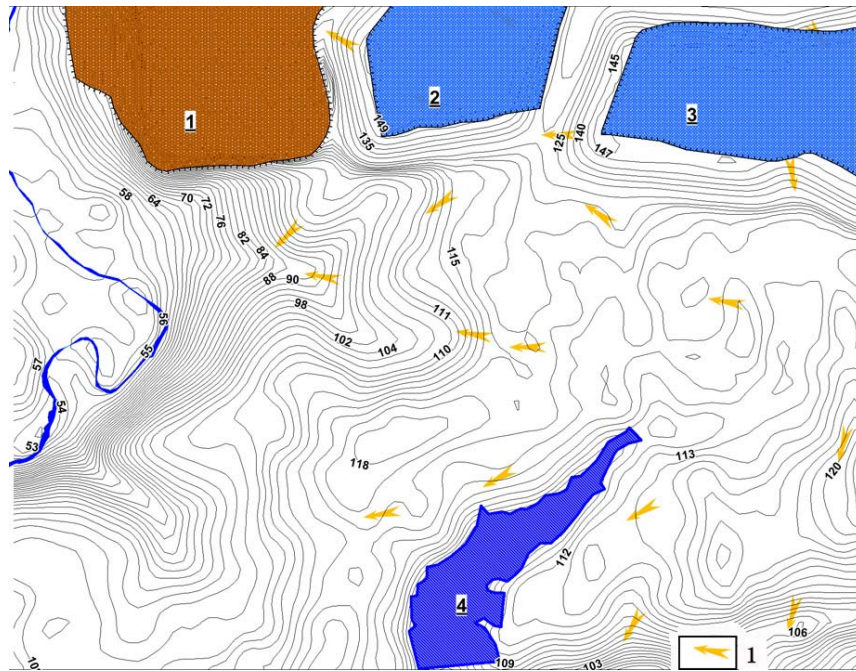


Рисунок 4.8. Карта сучасного рельєфу за матеріалами космічної зйомки з загальним напрямком потоку неогенового водоносного горизонту (за даними [АТ «ПІВДГЗК»]).

Умовні позначення: (1 – напрямок потоку неогенового водоносного горизонту;
1 – Лівобережні відвали; 2 – Хвостосховище «Войкове»;
3 – Хвостосховище «Об'єднане»; 4 – Резервуар шахтних вод у Свистунівій балці)

Розривна тектоніка території впливає на розташування джерел фільтрації поблизу Лівобережних відвалів. Згідно наведеною інформації в АТ «ПІВДГЗК» джерела фільтрації являють собою витoki у вигляді струмків, у деяких випадках у основі відвала сформовані озерця за даними досліджень [77].

Джерело № 1 являє собою постійно поточний струмок зі сформованим озерцем у основі відвала;

Джерело № 2 представлене неглибокою калюжею;

Джерела № 3 і № 4 - озерця із глибиною до 1 м;

Джерело № 5 займає більшу площу розливу, неглибоке, але має більшу ширину.

На рис. 4.5 показаний вміст хлоридів і сульфатів у пробах води із джерел фільтрації. Найменший вміст хлоридів характерно для джерел 2, 3, 4, 10, а найбільше для джерел 1 і 11. Найменший вміст сульфатів відзначається в джерелах 1 а найбільший в джерелах 2, 4, 5.



Рисунок 4.9. - Вміст хлоридів і сульфатів у пробах води по джерелах фільтрації (на 10.10.2021) [77]

Для джерела 1, як і до вод неогенового водоносного горизонту та кристалічного фундаменту характерно високий вміст сухого залишку, підвищений вміст хлоридів при відносно малому вмісті сульфатів (рис. 4.9). На карті-схемі розривної тектоніки території джерело фільтрації №1 розташовується на розломі (Тарапаківський насув) при цьому джерело фільтрації № 11 розташоване на північній стороні Лівобережних відвалів в тій же самій зоні Тарапаківського насуву.

Отримані нами дані добре підтверджуються і результатами біолокаційних спостережень на площі, яким виявлені чотири регіональні зони глибинної вертикальної фільтрації та активного водообміну між горизонтами підземних вод.

Ці зони в багатьох випадках співпадають із аномальними та градієнтними ділянками природного електричного поля (метод ПП), а також із зонами високих горизонтальних градієнтів гравітаційного поля. На карті рівнів першого від поверхні водоносного горизонту ці зони включають ділянки найглибшого стояння рівня ґрунтових вод.

4.4 Визначення особливостей розташування першого від поверхні водоносного горизонту на півдні Кривбасу

Дослідження виконувалися ДГЕ «Дніпрогеофізика» у 2018–2020 роках. У ході робіт використовувалися такі геофізичні методи, як метод вертикального електричного зондування (ВЕЗ) та метод природного електричного поля (ПП). Методика проведення польових робіт була описана у розділі 2 дисертаційної роботи (див. підрозділ 2.3).

Для покращення роздільної здатності верхнього геоелектричного розрізу та підвищення якості роботи, незважаючи на сильні промислові електромагнітні перешкоди, кількість точок вимірювання (точок даних на кривій видимого опору) була збільшена в 1,7 раза порівняно зі стандартом.

Під час сучасної обробки та інтерпретації даних спостереження за різні роки були інтегровані (або конденсовані, або адаптовані відповідно до попередніх методологій дослідження). Для мінімізації впливу промислового шуму застосовувалися як стандартні, так і адаптивні методи фільтрації.

Водоносний горизонт у четвертинних відкладах має широке поширення, за винятком окремих ділянок природного (вздовж річок та великих ярів) або антропогенного (відвали, кар'єри, хвостосховища) походження.

Вертикально перший водоносний горизонт присутній у кількох формаціях різного віку, які відрізняються за складом, фізико-механічними властивостями та кольором. Аналіз та повторна інтерпретація даних ВЕЗ за 2018–2020 рр. призвели до створення карти тектонічних розломів території на південь від Кривого Рогу, на якій виділено водонасичені зони в кристалічному фундаменті (рис. 4.10).

Водонасичені розломи першого порядку позначені синім кольором, а другого порядку – світло-синім. Розташування аномалій провідності, виявлених за даними ВЕЗ, свідчить про те, що досліджувана територія містить як ізольовані водонасичені розломи, так і цілі водоносні зони. Ці насичені зони зазвичай утворюються на перетинах трансрегіональних та регіональних

розломів субмеридіональної та північно-західної орієнтацій (рис. 4.10). До водонасичених структур також належать Тарапаківський, Саксаганський та Східний насувані розломи, а також пов'язані з ними вторинні розломи.

Глибина залягання першого водоносного горизонту було визначено за допомогою буріння свердловин та спеціалізованої обробки кривих ВЕЗ, що дозволило визначити його розподіл глибини по досліджуваній території з точки зору інтенсивності та напрямку. Висока концентрація антропогенного заболочення в південно-західній частині досліджуваної території свідчить про вплив вод під тиском із хвостосховищ Центрального та Південного гірничо-збагачувальних комбінатів.

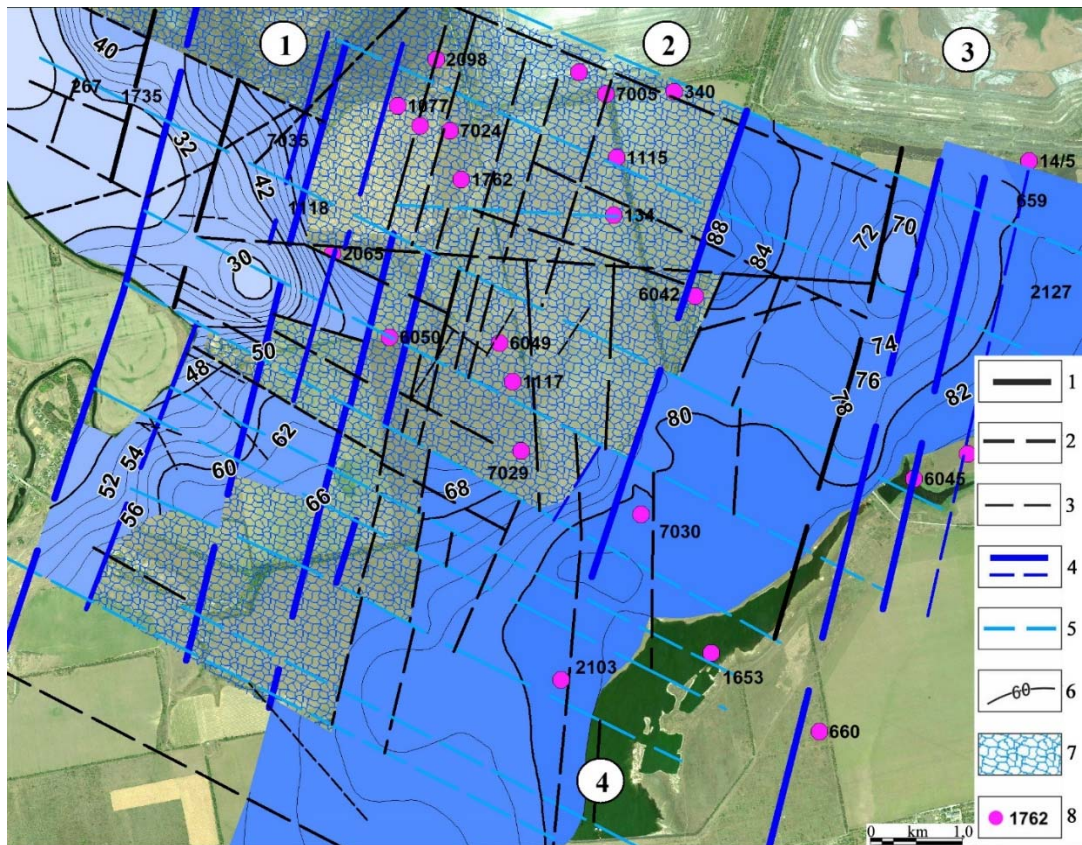


Рисунок 4.10. Карта глибин першого водоносного горизонту від поверхні на основі інтерпретації профілів ВЕЗ за 2018 та 2020 роки.

Умовні позначення: 1, 2, 3 – Неводоносні розломи I, II та III рангів у кристалічному фундаменті за даними ВЕЗ; 4, 5 – Водонасні розломи I та II рангів у кристалічному фундаменті за даними ВЕЗ; 6 – Контури глибини першого водоносного горизонту від поверхні; 7 – Напрямки ймовірної фільтрації вод першого водоносного горизонту; 8 – Моніторингові свердловини, що використовуються для визначення рівнів ґрунтових вод, номери свердловин;

Техногенні споруди:

(1 – Лівобережні відвали; 2 – Хвостосховище «Войкове»; 3 – Хвостосховище «Об'єднане»; 4 – Резервуар шахтних вод у Свистунівій балці)

Згідно архівних гравіметричних досліджень [85-87], під цими об'єктами зберігаються активні тектонічні перетворення. Значна нерівномірність кривих градієнта природного поля, що спостерігається польовими роботами ДГЕ «Дніпрогеофізикою», свідчить про те, що заболочення походить як з природних, так і з техногенних джерел.

Підняття рівня водоносного горизонту (за абсолютною висотою) у східній частині досліджуваної території має північно-східний напрямок, що збігається з балкою Свистунова [68]. Локалізовані підняття, або «куполи», зазвичай пов'язані з водоймами-утримувачами, які накопичують високомінералізовану воду та порушують режим ґрунтових вод. У цих зонах рівень води піднявся на 3–7 метрів відносно західного боку балки.

Куполоподібний підйом ґрунтових вод у районі шахтного водозберігаючого ставу був пов'язаний з його критичним рівнем наповнення наприкінці 2018 року. Розрахунки показують, що поширення високомінералізованої води простягалось вгору за течією вздовж балки до його витоків, досягаючи межі між хвостосховищами "Войкове" та "Об'єднане". Східна тектонічна насувальна зона в докембрійському фундаменті сприяла цьому руху. Градієнт поверхні води 2–3 метри розділяє друге підняття, яке простягається до меж хвостосховищ "Войкове"–"Об'єднане". Однак відсутність вимірювань ВЕЗ поблизу цих об'єктів перешкоджає точному визначенню північної межі цього водоносного горизонту. Це питання потенційно може бути вирішене за допомогою інженерної сейсміки [66; 81-82; 93].

Спостерігається західний та південно-західний тренд просідання поверхні першого водоносного горизонту. Це просідання ще більше ускладнюється молодшими системами розломів Високопільська та Конкська, які створюють зв'язок "клавійного типу" між блоками вищого порядку, впливаючи на рівень ґрунтових вод. Крім того, відзначається висока концентрація техногенних повеней зі шламоскопів Південного гірничо-

збагачувального комбінату та активного карстового утворення в західній частині досліджуваної території (на лівому березі р. Інгулець).

Розрахунки геофізичної моделі показують, що загальний рух високомінералізованих вод відбувається у західному та північно-західному напрямку. Фільтрація вод першого водоносного горизонту переважно спрямована до долини річки Інгулець, яка служить локальним базовим рівнем ерозії. Західний напрямок потоку пов'язаний зі стратиграфічними характеристиками, тоді як північно-західний потік залежить від тектоніки (рис. 4.10). Інфільтрація промислових вод відбувається в межах першого водоносного горизонту та поширюється на глибші горизонти, що підтверджується спостереженнями у спеціально обладнаних моніторингових свердловинах. На північно-західний напрямок потоку впливають долини, багато з яких перетворені на хвостосховища. Основний напрямок фільтрації вод з Лівобережних відвалів збігається з долиною р. Інгулець.

У ході аналізу та інтерпретації геологічних та геофізичних даних встановлено, що тектоніка розломів у докембрійському фундаменті суттєво впливає на гідродинаміку та геофільтрацію підземних вод в осадовому чохла. Оцінка кореляції між рівнем підземних вод та морфологією аномалій геоелектричного опору якісно підтвердила спостереження, отримані з мережі моніторингових гідрогеологічних свердловин Південного ГЗК.

Результати кореляції також підкреслюють мінливий характер геолого-тектонічної структури як осадового чохла, так і кристалічного фундаменту, що впливає на гідродинаміку підземних вод, геофільтрацію та геохімічну міграцію. Побудована карта дозволила визначити глибину залягання першого водоносного горизонту від поверхні та ідентифікувати його поверхневу морфологію, яка визначає напрямок фільтрації підземних вод. У північній та центральній частинах досліджуваної території потік переважно спрямований на захід.

4.5 Механізми сучасного впливу природного та техногенного підтоплення на геологічне середовище території Півдня Кривбасу

Завдяки оцифрування архівних даних ВЕЗ (методика яких була наведена розділі 2.6 дисертаційної роботи) було побудовано комплект карт різниць для всіх досліджених розносів ВЕЗ на досліджуваній території. Карти наведено на рисунках 4.11 та 4.12.

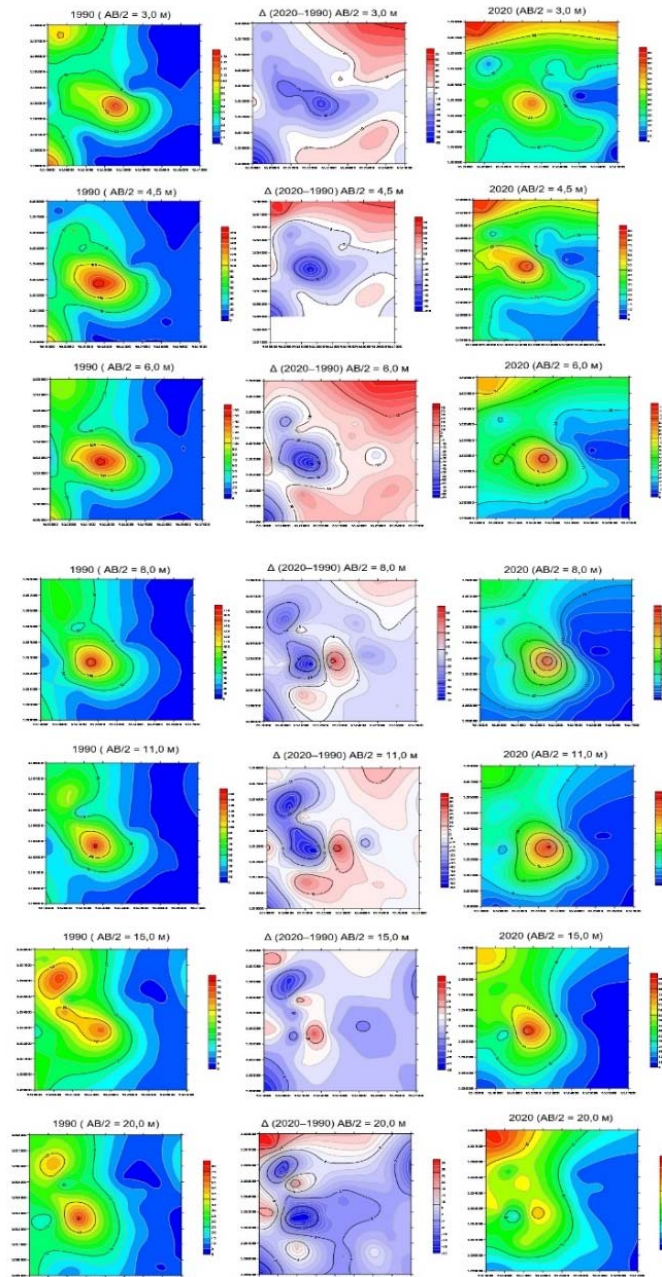


Рис. 4.11. Карті погоризонтних зрізів геоелектричного опору ρ_g на розносах $AB/2 = 3,0 \div 20$ м у 1990 та 2020 рр. та його зміни за 30 років

Як показано на картах погоризонтних зрізів геоелектричного опору на розносах $AB/2 = 3,0 \div 20$ м у 1990 та 2020 рр. та його зміни за 30 років (рис. 4.11), переважають аномалії субширотного простягання. Рознесення з такими параметрами характеризують будову осадової товщі на глибину до 10-15 метрів. На таких глибинах розташовані переважно четвертинні відклади, як правило, представлені комплексом континентальних утворень. Вони поширені повсюдно, крім ділянок розмиву річок і великих балок.

Четвертинні відклади, як правило, представлені комплексом суттєво різноманітних у фаціальному та літологічному відношенні стратонів, кожному з яких відповідає певний палеогеографічний етап. З 20-ти встановлених палеогеографічних етапів антропогену, 10 представлено утвореннями теплих етапів формування та 10 – утвореннями холодних етапів формування.

Четвертинні відклади формувалися на вже існуючому схилі Українського щита вже у континентальному режимі земної кори, яка має переважну широтну тектоніку за рахунок занурення дна Чорного моря. Можна припустити, що вже в четвертий час осадовий чохол не схильний до суттєвих тектонічних процесів, а лише незначних коливань вздовж розломів Конкської тектонічної зони. Це підтверджують результати зміни питомого опору з 1990 по 2020 рр. (рис. 4.11).

Аналіз побудованих карт свідчить про наявність просторово диференційованих змін геоелектричного поля, що мають як приповерхневий, так і глибинний характер.

Для малих розносів (3–8 м), які характеризують верхню частину розрізу, переважають від’ємні значення $\Delta\rho_k$ у межах окремих ділянок, що інтерпретується як зниження уявного питомого опору в 2020 році порівняно з 1990 роком. Така тенденція може бути пов’язана зі зростанням локальних підтоплень або техногенним перерозподілом поверхневих та інфільтраційних вод. Водночас на окремих фрагментах території зафіксовано позитивні значення $\Delta\rho_k$, що може свідчити про часткове осушення або ущільнення приповерхневих порід.

Для середніх розносів (11–40 м), характер змін набуває більш структурованого вигляду. У межах ряду аномальних зон простежується стійке збільшення ρ_k у 2020 році, що може відображати зниження рівня підземних вод або зміну фільтраційного режиму внаслідок тривалого функціонування гірничодобувних об'єктів. Водночас окремі ділянки демонструють протилежну тенденцію, що вказує на неоднорідність гідрогеологічних процесів і можливу локалізацію зон підвищеної тріщинуватості чи вторинного зволоження.

Для великих розносів (60–150 м), які характеризують глибші горизонти, зміни мають більш локалізований характер і меншу амплітуду порівняно з приповерхневими шарами. Це свідчить про відносну стабільність глибинних геоелектричних параметрів та обмежений масштаб впливу сучасних техногенних процесів на глибокі частини розрізу. Разом із тим у межах окремих структурних елементів фіксуються зони підвищення або зниження ρ_k , що можуть бути пов'язані з довготривалими змінами напружено-деформованого стану масиву або перерозподілом глибинних фільтраційних потоків.

Загалом результати порівняльного аналізу свідчать про те, що за період 1990–2020 рр. геоелектричне поле досліджуваної території зазнало помітної трансформації, яка має багаторівневий характер. Найбільш інтенсивні зміни приурочені до приповерхневої частини розрізу, що узгоджується з очікуваним впливом кліматичних і техногенних чинників. Глибші горизонти демонструють більш інерційний характер змін, що відповідає їхній геологічній стабільності.

Отримані результати підтверджують доцільність використання повторних спостережень ВЕЗ як інструменту моніторингу довготривалих змін геоелектричних умов у районах інтенсивного техногенного навантаження. Поєднання оцифрованих архівних матеріалів із сучасними вимірюваннями дозволило виконати кількісну оцінку трансформації електричних

властивостей геологічного середовища та підвищити обґрунтованість висновків щодо еволюції гідрогеологічного режиму досліджуваної території.

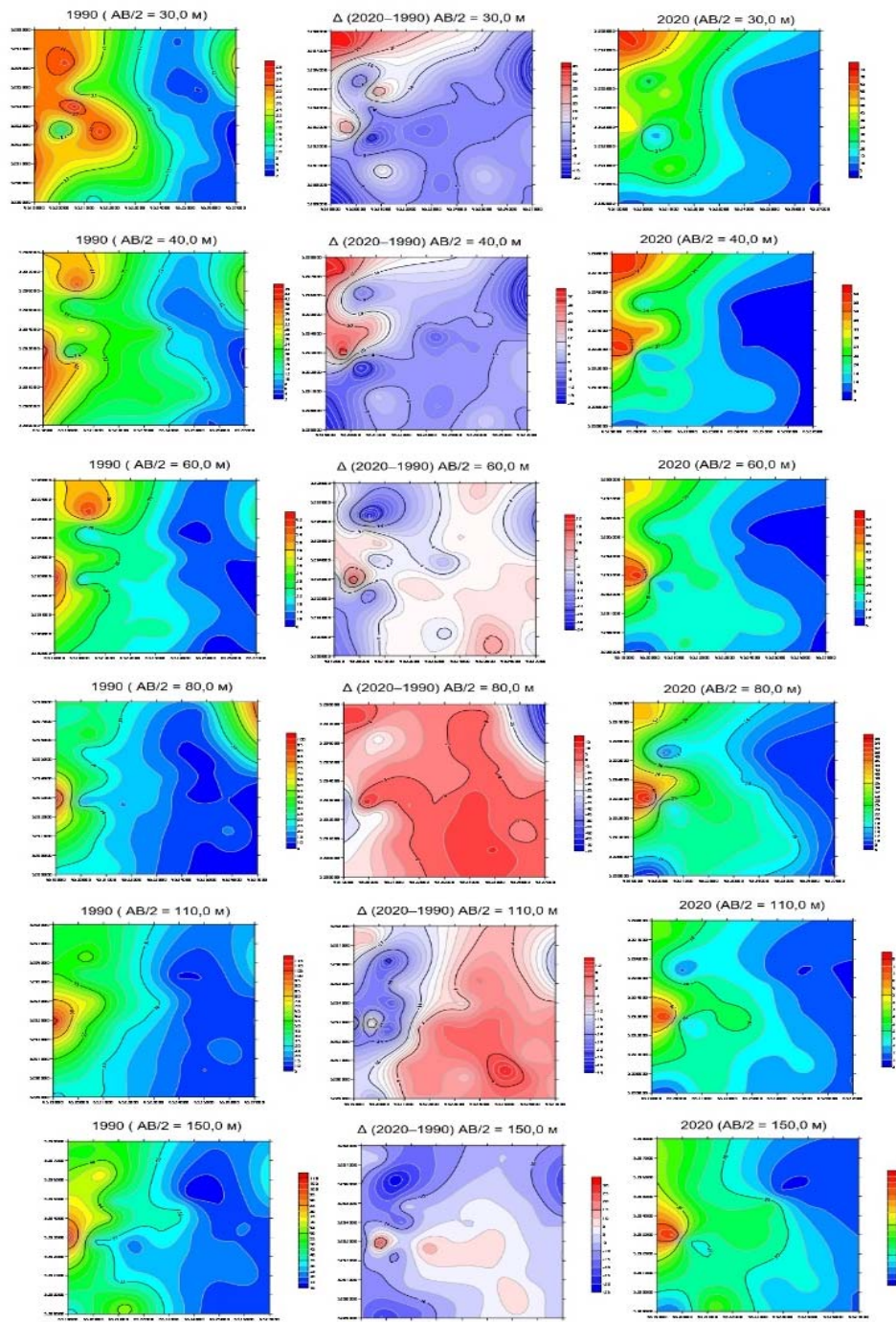


Рис. 4.12. Карты погоризонтных зрізів геоелектричного опору $\rho_{\text{г}}$ на розносах $AB/2 = 30 \div 150$ м у 1990 та 2020 рр. та його зміни за 30 років

Як показано на рис. 4.12 на розносах $AB/2 = 30,0\text{--}80,0$ метрів зміни геоелектричного опору $\rho_{\text{г}}$ за 30 років з 1990 по 2020 рр., переважають аномалії північно-західного простягання. Разноси з такими параметрами характеризують будову осадової товщи на глибина до 30–40 метрів. На таких

глибинах розташовані переважно неогенові відклади, як правило, представлені пісками, суглинками та глинами. Це показує в нижчеплейстоценовий-неоплейстоценовий час тектонічний режим території змінюється. Ймовірно, почали розвиватися здвигові процеси вздовж Криворізько-Кременчуцької шовної зони.

Починаючи з кайнозойського часу в межах площі досліджень в поширенні кайнозойських відкладів важливу роль відіграє рельєф поверхні кристалічної основи. Палеогенові відклади виповнюють депресії, залягаючи майже горизонтально або зі слабим нахилом до Причорноморської западини. Неогенові відклади виповнюють усі пониження рельєфу поверхні фундаменту та спільно з четвертинними відкладами утворюють суцільний покрив, який залягає на породах докембрію. Це добре простежується на розносах $AB/2 = 80,0\text{--}150,0$ метрів (рис. 4.12) зміни геоелектричного опору ρ_y за 30 років з 1990 по 2020 рр., стають більш аморфними, на їх форму впливає близьке розташування кристалічного фундаменту та зони його площевої дезінтеграції з утворенням кори вивітрювання.

Таким чином, за даними вивчення морфології аномалій в залишковому полі геоелектричного опору ρ_y за 30 років з 1990 по 2020 рр. було вперше встановлено наявність трьох тектонічних циклів в зміні геодинамічного режиму території досліджень. Отримані результати дозволяють по-новому взглянути на гідродинамічні процеси, які протікають в осадовому чохлі на різних глибинах та внести суттєві зміни при проектуванні захисних споруд для хвостосховищ та очистних споруд.

4.6 Висновки до розділу

Уперше для південної частини Криворізького залізничного басейну на основі повторних геоелектричних спостережень різних років виконано кількісну оцінку трансформації геоелектричного поля за тривалий період

техногенного навантаження та встановлено закономірності його просторової перебудови залежно від ефективної глибини зондування.

Уперше було доведено, що інтенсивність змін уявного питомого електричного опору має виражену вертикальну диференціацію: максимальні трансформації приурочені до приповерхневої частини розрізу, тоді як глибші горизонти характеризуються відносною стабільністю параметрів.

Встановлена закономірність дозволяє розглядати геоелектричне поле як індикатор довготривалих змін водного режиму геологічного середовища. Отримало подальший розвиток уявлення про структурний контроль фільтраційних процесів у межах Кривбасу: обґрунтовано, що тектонічно ослаблені зони виступають основними каналами вертикальної міграції інфільтраційних вод, що підтверджується узгодженістю аномалій ВЕЗ, природного електричного поля та конфігурації гідроізогіпс.

Удосконалено підхід до інтерпретації повторних матеріалів ВЕЗ шляхом використання карт різниць геоелектричних параметрів, що дозволило перейти від якісного зіставлення даних різних років до кількісної оцінки динаміки змін. Запропонований підхід забезпечує можливість виділення зон активного техногенного зволоження, дренажного розвантаження та гідродинамічної рівноваги.

Уперше для досліджуваної території доведено, що сучасна просторово-часова структура підтоплення формується внаслідок взаємодії трьох чинників: інфільтрації поверхневих і техногенних вод, структурного контролю з боку розломних зон та зміни гідравлічних градієнтів у результаті гірничих робіт.

Використання комплексу методів ВЕЗ і природного електричного поля як ефективного інструменту довгострокового геоекологічного моніторингу дозволяє уточнювати в умовах інтенсивного різноспрямованого техногенного впливу напрямки потоків у четвертинному та неогеновому водоносних горизонтах (рис. 4.8 та 4.10), які отримані за даними моніторингових спостережних гідрогеологічних свердловин АТ «ПВДГЗК».

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій виконано комплексне дослідження сучасного впливу тектонічної будови геологічного середовища Криворізького залізорудного басейну на процеси природного та техногенного підтоплення із використанням геофізичних, гідрогеологічних та дистанційних методів досліджень. Показано, що територія Кривбасу є складно побудованою геологічною структурою з сучасними активними тектонічними рухами, які суттєво впливають на фільтраційні властивості гірських порід. Саме поєднання тектонічних деформацій і техногенного навантаження створює складну гідрогеодинамічну систему, дослідження якої є важливим як у науковому, так і в практичному планах.

За результатами комплексної інтерпретації геофізичних матеріалів встановлено закономірності просторового розподілу геоелектричних параметрів, що пов'язані з техногенним водонасиченням і формуванням нових зон підтоплення. Виявлено нові ділянки підвищеної водопроникності, пов'язані з тектонічними порушеннями та техногенно зміненим середовищем. На основі аналізу геологічних, гідрогеологічних та геофізичних матеріалів встановлено закономірності просторового поширення зон підвищеної мінералізації підземних вод, які переважно приурочені до тектонічно ослаблених зон Криворізької системи глибинних розломів та їх опіряючих тріщин. Визначено, що розломні структури виступають основними шляхами інфільтрації та міграції підземних вод між водоносними горизонтами.

Вперше, запропоновано підхід до якісної інтерпретації результатів ВЕЗ, заснований на використанні еквівалентної глибини дослідження та диференціальних характеристик поля позірною питомого опору, що дозволило покращити візуалізацію верхньої частини геоелектричного розрізу та підвищити деталізацію геологічної будови меж водоносних горизонтів. Використання логарифмічного перетворення напіврозносів живильної лінії у еквівалентні глибини дозволило виконувати експрес аналіз глибин розташування водоносного горизонту при закладанні пошукових свердловин.

Вперше, були встановлені геоелектричні критерії слабких тектонічних зон, які контролюють напрямки руху підземних вод на різних стратиграфічних горизонтах та розроблено аналітичну модель тектонічно-індукованого підтоплення, що враховує сучасну геодинаміку району. Визначено, що різноспрямовані розломні зони, різного часу закладення, по-різному впливають на гідродинаміку та міграцію підземних вод між водоносними горизонтами як по латералі, так і на глибину.

Також вперше, встановлено, що у формуванні сучасного гідрогеологічного режиму на різних стратиграфічних рівнях території досліджень відіграють минулі та сучасні тектонічні процеси. Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом у межах Кривбасу формує у кристалічному фундаменті різнорангову, переважно субмеридіональну систему розломів. У верхній частині розрізу переважають розриви субширотного напрямку (четвертинний етап розвитку Причорноморського схилу); з глибин 25-30 метрів – палеогеновий.

Дрібні тектонічні порушення та пов'язані з ними зони підвищеної проникності впливають на формування і швидкість розвитку негативних геологічних та техногенних процесів – підтоплення, просідання ґрунтів, провалів і зсувів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованого комплексу геофізичних і гідрогеологічних методів для прогнозування процесів підтоплення, виявлення зон поширення високомінералізованих підземних вод, оцінки геоекологічного стану територій та вдосконалення систем моніторингу у межах інших гірничопромислових регіонів.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані під час проведення інженерно-геологічних, гідрогеологічних і геоекологічних досліджень, а також при обґрунтуванні природоохоронних заходів та оцінці впливу гірничотехнічних об'єктів на геологічне та природне середовище Криворізького залізрудного басейну.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білашенко О. Г. Визначення геоекологічного стану техногенно-навантажених територій за комплексом геофізичних даних: дис. ... канд. геол. наук: 04.00.22 / Державний ВНЗ «Національний гірничий університет». Дніпропетровськ, 2015. 176 с.
2. Вивчення активізації природної сейсмічності в умовах техногенно-навантажених територій (на прикладі Кривбасу) / А. Г. Шапар, П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, О. К. Тяпкін, О. С. Кирилюк. *Екологія і природокористування*. 2014. Вип. 18. С. 43–53.
3. Вивчення геоелектричними методами негативних явищ південно-західної частини Кривбасу / В. К. Свистун, Л. Й. Золотарьова, П. Г. Пігулевський, О. С. Кирилюк. *Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів: матеріали Восьмої міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпропетровськ, 6–9 жовт. 2015 р.)*. Дніпропетровськ: Монолит, 2015. С. 106–107.
4. Вивчення геоелектричними методами сучасної складової підтоплення південно-західної частини Кривбасу / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, С. О. Слободянюк, О. С. Кирилюк. *Geoinformatics 2017: XVI International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, 15–17 May 2017)*. Kyiv, 2017. 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
5. Вивчення геофізичними методами інженерно-геологічного стану південно-західної частини гірничо-промислового Кривбасу: звіт про геофізичне вивчення надр за 2007–2013 рр. Кн. 1 / Л. Й. Золотарьова, В. К. Свистун, О. О. Калініченко, Ю. П. Мечніков. Київ: Геоінформ України, 2013. 140 с.
6. Вивчення геофізичними методами інженерно-геологічного стану південно-західної частини Кривбасу / В. К. Свистун, Л. Й. Золотарьова, О. О. Калініченко, Ю. П. Мечніков, П. Г. Пігулевський, О. С. Кирилюк. *Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності*

підприємств ГМК: зб. наук. праць за результатами роботи III Міжнародної наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 19 черв. 2015 р.). Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2015. С. 193–194.

7. Вивчення негативних геоекологічних явищ південно-західної частини Кривбасу геофізичними методами / В. К. Свистун, Л. Й. Золотарьова, П. Г. Пігулевський, О. С. Кирилюк. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. № 49. С. 16–23.

8. Вивчення сучасного підтоплення південно-західної частини Кривбасу геофізичними методами / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, О. С. Слободянюк, О. С. Кирилюк. *Geoinformatics 2016: XV International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, 10–13 May 2016)*. Kyiv, 2016. 1 електрон. опт. диск (CD-R).

9. Вивчення сучасного підтоплення південно-західної частини Кривбасу геофізичними методами / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, О. С. Слободянюк, О. С. Кирилюк. *Geoinformatics 2016 : XV International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, 10–13 May 2016)* / ВАГ. Kyiv, 2016. 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600477>.

10. Вижва С. А., Кожан О. М. Проблеми геофізичного моніторингу великих промислових агломерацій. *Геофизический журнал*. 2004. Т. 26, № 1. С. 80–86.

11. Геоекологічні проблеми Криворізького басейну в умовах реструктуризації гірничодобувної галузі / І. Д. Багрій, П. В. Блінов, Н. А. Белокопитова та ін. Київ: Фенікс, 2002. 192 с.

12. Гідросистема Криворізького басейну – стан і напрямки поліпшення / І. Д. Багрій, П. Ф. Гожик та ін. Київ: Фенікс, 2005. 216 с.

13. Гуляк О. І. Геолого-екологічні дослідження масштабу 1:50 000 території Кривбасу : звіт про НДР. Київ: Геоінформ України, 2007. 273 с.

14. Гуляк О. І. Моніторинг геологічного середовища Кривбасу. Звіт про результати гідрогеологічних і геолого-екологічних робіт, виконаних

Криворізькою КГП за період 2001–2006 рр. Кн. 1. Київ: Геоінформ України, 2006. 216 с.

15. Демчишин М. Г. Техногенні впливи на геологічне середовище території України. Київ: ТОВ Гнозіс, 2004. 214 с.

16. Державний реєстр потенційно небезпечних об'єктів України / ГНПП «Геоинформ Украины» Минприроды Украины. URL: <http://sfd.archives.gov.ua/RUS/page4.html>

17. Дніпропетровська обласна комплексна програма екологічної безпеки та запобігання змінам клімату на 2016–2025 роки: затверджена рішенням Дніпропетровської обласної ради від 21 жовт. 2015 р. № 680-34/VI. Дніпропетровськ, 2015. 50 с.

18. Досвід комплексної оцінки та картографування факторів техногенного впливу на природне середовище Кривого Рогу та Дніпродзержинська / І. Д. Багрій, Ю. Г. Білоус, Ю. Г. Вілкул та ін. Київ: Фенікс, 2005. 216 с.

19. Екологічний атлас Дніпропетровської області / Л. Зеленська та ін. Київ; Дніпропетровськ: Мапа ЛТД, 1995. 25 с.

20. Загострення проблем екологічної складової національної безпеки у техногенно навантажених регіонах України / А. Г. Шапар, О. О. Скрипник, П. Г. Пігулевський, М. В. Величко, О. С. Кирилюк. *Науковий вісник Національної академії Служби безпеки України*. 2014. № 53. С. 70–76.

21. Застосування геофізичних технологій при вирішенні різноманітних завдань техногенної безпеки / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, С. П. Пахомов, О. К. Тяпкін, О. С. Кирилюк. *Геоінформатика*. 2015. № 4 (56). С. 52–59.

22. Застосування геофізичних технологій при вирішенні різноманітних завдань техногенної безпеки / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, С. П. Пахомов, О. К. Тяпкін, О. С. Кирилюк. *Геоінформатика*. 2015. № 4. С. 52–59.

23. Захаров В. В., Мартинюк А. В., Токар Ю. Н. Державна геологічна карта України, масштаб 1:200 000. Серія Центральноукраїнська, аркуші: М-36-XXXIV (Жовті Води), L-36-IV (Кривий Ріг): пояснювальна записка. Київ: Геоінформ України, 2002. 101 с.

24. Зміни природного режиму підземних вод під впливом функціонування крупних водосховищ / О. К. Тяпкін, І. М. Подрезенко, П. Г. Пігулевський, Л. В. Бондаренко. *ЕКОФОРУМ – 2017. Актуальні проблеми та інновації: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 2017 р.)*. Івано-Франківськ, 2017. С. 49–50.

25. Золотарьова Л. Й., Калініченко О. О. Моніторинг сучасного карстоутворення на території селища Рахманівка (м. Кривий Ріг) геофізичними методами. *Теоретичні, регіональні, прикладні напрями розвитку антропогенної географії та геології: матеріали 3-ої Міжнародної наукової конференції*. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2011. С. 147–152.

26. Золотарьова Л. Й., Калініченко О. О. Умови формування ділянок постійного підтоплення в межах ландшафту промислового міста. *Фізична географія та геоморфологія*. 2008. С. 150–153.

27. Кирилюк О. С. Геоекологічний вплив на комунікації соціуму. Комунікативні стратегії інформаційного суспільства: лінгвістика, право, інформаційна безпека: *мат-ли VII Всеукр. наук. конф. (Київ, 6 квіт. 2016 р.)* / Нац. акад. СБУ. Київ, 2016. 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). С. 70–75.

28. Кирилюк О. С. Деякі геоекологічні аспекти геофізичного вивчення екзогенних геологічних процесів в умовах Кривбасу. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*. 2016. № 4. С. 70–78.

29. Кирилюк О. С., Пігулевський П. Г., Свистун В. К. Використання геоелектричних методів під час вивчення впливу техногенних споруд на гідрогеологічний режим південного Кривбасу. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*. 2016. № 2. С. 137–144.

30. Кузьменко Е. Д., Кулик С. М., Пігулевський П. Г. Електрометрія: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. 367 с.

31. Кулькова Т. М. Гідрогеологічне довивчення масштабу 1:200 000 аркушу L-36-IV. Звіт про гідрогеологічне довивчення площ масштабу 1:200 000. Кн. 1. Київ: Геоінформ України, 2007. 243 с.
32. Максимова Н. М. Вплив відвалів гірничорудної промисловості на екологічну безпеку прилеглих територій: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 21.06.01. Дніпропетровськ, 2014. 18 с.
33. Малахов І. М. Техногенез у геологічному середовищі. Кривий Ріг: ОКТАНТ-ПРИНТ, 2003. 252 с.
34. Маяков Й. Д. Екологічна оцінка стану геологічного середовища. *Деякі чинники техногенезу: Геологічне середовище антропогенної екосистеми: наук. зб.* Кривий Ріг: Окта-прінт, 2001. С. 34–46.
35. Методичні рекомендації з проведення гідрогеологічних, інженерно-геологічних та еколого-геологічних досліджень у процесі розвідки родовищ твердих корисних копалин. Київ: Державна геологічна служба, Півн. ДРГП «Північгеологія», 2007. 111 с.
36. Міщенко В. С., Виговська Г. П. Організаційно-економічний механізм поводження з відходами та шляхи його вдосконалення. Київ: Наукова думка, 2009. 295 с.
37. Морфоструктурно-неотектонічний аналіз території України (концептуальні засади, методи і реалізація) / за ред. В. П. Палієнко. Київ: Наукова думка, 2013. 263 с.
38. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2011 р. Київ, 2012. 302 с.
39. Определение природных и техногенных показателей влияния производственной деятельности ПАО «ЮГОК» на территорию Новолатовского сельского совета: отчет о научно-исследовательской работе / науч. руководитель А. Г. Шапар; ИППЭ НАНУ. Днепр, 2016. 185 с.
40. Особливості диз'юнктивної тектоніки Криворізького залізорудного району / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, Ю. П. Мечніков, О.

С. Кирилюк, Ю. В. Лісовий. *Геофизический журнал*. 2016. Т. 38, № 5. С. 154–163.

41. Остапчук І. О. Оцінка геоекологічних ризиків території Криворізького природничо-господарського району: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. географ. наук: спец. 11.00.11 «Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів». Сімферополь, 2010. 16 с.

42. Палиенко В. П. Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. Киев: Наукова думка, 1992. 116 с.

43. Палиенко В. П., Спица Р. А. Неотектонічна геодинаміка як чинник просторово-часових змін геоморфогенезу. *Український географічний журнал*. 2013. № 4. С. 21–25.

44. Паранько І. С., Маяков Й. Д., Кулькова Т. М. Кривбас – потенційна зона виникнення надзвичайних ситуацій. Сучасні небезпечні геологічні процеси. Вплив на довкілля. Нові технології прогнозування та захисту: матеріали другої науково-технічної конференції (Алушта, 27 верес. – 1 жовт. 2004 р.) / НПЦ «Екологія. Наука. Техніка» Товариства «Знання» України. Київ, 2004. С. 34–36.

45. Паранько І. С., Смирнова Г. Я., Іванова О. В. Кривий Ріг – потенційна зона виникнення техногенно-природних і техногенних надзвичайних ситуацій. *Геолого-мінералогічний вісник*. 2005. № 1. С. 5–9.

46. Паранько І. С., Стеценко В. В. Техногенна тектоніка – потенційний чинник виникнення надзвичайних ситуацій. Екологічна безпека техногенно перевантажених регіонів та раціонального використання надр: матеріали науково-практичної конференції (Коктебель, 4–8 черв. 2007 р.) / НПЦ «Екологія Наука Техніка». Київ, 2007. С. 23–25.

47. Перспективи реагування на зовнішні терористичні загрози техногенного характеру / І. М. Рижов, М. В. Величко, М. В. Мірошник, О. С. Кирилюк. *Збірник наукових праць Національної академії Служби безпеки України*. 2015. № 54. С. 111–116.

48. Пігулевський П. І., Свистун В. К., Щербина С. В. О тектоническом строении, геодинамических и сейсмологических особенностях Кривбасса. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 17. С. 37–46.
49. Пігулевський П. Г., Свистун В. К. Геофізичні дослідження процесів підтоплення в промисловому Кривбасі : монографія. Харків: ФОП Мезіна В. В., 2018. 210 с.
50. Пігулевський П. Г., Свистун В. К. Сучасні геофізичні методи для виявлення зон ослаблення гірських порід. *Геоінформатика*. 2022. № 6. С. 58–69.
51. Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилюк О. С. Вплив сучасної неотектонічної активності на формування зон підтоплення в межах Кривбасу. *Геоінформатика*. 2020. № 2 (74). С. 45–54.
52. Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилюк О. С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 4. Використання потенціальних полів при вивченні сучасної тектоніки. *Геоінформатика*. 2017. № 3 (63). С. 48–55.
53. Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилюк О. С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану Південно-Західного Кривбасу. Частина 1. Фізико-геологічні передумови досліджень. *Геоінформатика*. 2016. № 3 (59). С. 69–75.
54. Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилюк О. С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану Південно-Західного Кривбасу. Частина 2. Результати застосування геоелектричних методів при обстеженні ділянок підтоплення. *Геоінформатика*. 2016. № 4 (60). С. 62–74.
55. Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилюк О. С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану Південно-Західного Кривбасу. Частина 3. Результати застосування геоелектричних методів при вирішенні інженерно-геологічних задач. *Геоінформатика*. 2017. № 2 (62). С. 55–63.

56. Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилюк О. С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану Південно-Західного Кривбасу. Частина 4. Використання потенціальних полів при вивченні сучасної тектоніки. *Геоінформатика*. 2017. № 3 (63). С. 48–55.

57. Пігулевський П.Г. Дослідження геоелектричними методами інженерно- геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 3. Результати застосування геоелектричних методів при вирішенні інженерно-геологічних задач / П.Г. Пігулевський, В.К. Свистун, О.С. Кирилюк // *Геоінформатика*. – 2017. – №2 (62). – С. 55-63.

58. Приходченко А. А., Вовк В. І., Заїка Н. І. Стратегія сталого розвитку: навч. посіб. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008. 413 с.

59. Результати використання геоелектричних методів при спостереженнях за станом підземних вод на території південного Кривбасу / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, О. С. Кирилюк, О. К. Тяпкін. *ЕКОФОРУМ – 2017. Актуальні проблеми та інновації : праці міжнародн. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 2017 р.)*. Івано-Франківськ, 2017. С. 31–32.

60. Рудько Г. И., Адаменко О. М. Екологічний моніторинг геологічного середовища. Львів: ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2001. 260 с.

61. Рудько Г. І. Техногенна екологічна безпека геологічного середовища. Львів: ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2001. 359 с.

62. Свистун В. К. Використання геофізичних методів при вирішенні геоекологічних проблем Кривбасу: дис. ... канд. геол. наук: 04.00.22 / Державний ВНЗ «Національний гірничий університет». Дніпропетровськ, 2016. 182 с.

63. Свистун В. К., Пигулевский П. И., Кирилюк А. С. Петрофизическая характеристика формаций и групп Криворожского железорудного района. *Геотехнічна механіка*. 2015. № 122. С. 67–79.

64. Свистун В. К., Пігулевський П. Г., Азімов О. Т. Актуальний комплекс геофізичних і аерокосмічних методів прогнозування небезпечних геологічних процесів у техногенній екосистемі Кривбасу. *Сучасні технології*

розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК : зб. наук. праць IV Міжнародн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 24 листоп. 2017 р.). Кривий Ріг: Вид. Роман Козлов, 2017. С. 146–147.

65. Свистун В. К., Пігулевський П. Г., Кирилюк О. С. До питання комплексних досліджень геоекологічних проблем Кривбасу. Роль вищих навчальних закладів у розвитку геології. Частина 1: матеріали Міжнародної наук. конф. до 70-річчя геологічного факультету КНУ імені Тараса Шевченка (Київ, 31 берез. – 3 квіт. 2014 р.) / КНУ імені Тараса Шевченка. Київ, 2014. 1 електрон. опт. диск (CD-R). С. 85–86.

66. Свистун В. К., Пігулевський П. Г., Тяпкін О. К. Результати вивчення геофізичними методами інженерно-геологічного стану південної частини Кривбасу. *Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК: зб. наук. праць IV Міжнародн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 24 листоп. 2017 р.).* Кривий Ріг: Вид. Роман Козлов, 2017. С. 154–155.

67. Складання методичного посібника по використанню геофізичних методів при пошуках підземних питних тріщинних і пластових вод (Титул 11): звіт про геофізичне вивчення надр. Кн. 1 / В. М. Пахомов. Київ: Геоінформ України, 2010. 176 с.

68. Ставок-накопичувач шахтних вод в балці Свистунова. Аналіз результатів спостережень контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) за станом греблі та аналіз результатів спостережень за мережею режимних свердловин навколо ставу протягом 2009–2013 р.: пояснювальна записка. Кн. 1 / ПАТ «Укрводпроект». Київ: Геоінформ України, 2014. 167 с.

69. Стадницький Ю. До проблеми екологічної політики України і механізму її реалізації. *Економіка України*. 2003. № 1. С. 75–79.

70. Стефанків О. М. Стратегічні напрями раціонального природокористування в АПК та забезпечення екологічної безпеки в соціумі. *Механізм регулювання економіки*. 2010. № 1. С. 32–37.

71. Стецюк В. В., Рудько Г. І. Екологічна геоморфологія та охорона надр. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2004. 191 с.
72. Сучасні геодинамічні рухи та сейсмічність території Кривбасу / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, О. С. Кирилюк, Ю. В. Лісовий. *Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища: мат-ли VI Міжнар. наук. конф. (Львів, 20–23 верес. 2016 р.)*. Львів: Сполом, 2016. С. 226–228.
73. Фізична географія Криворіжжя: монографічна навчальна книга / І. С. Паранько, В. Л. Казаков, О. О. Калініченко, В. В. Смирнов та ін. Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2015. 272 с.
74. Чумаченко В. Є., Кулькова Т. Н. Оцінка регіональних змін інженерно-геологічних умов Кривбасу у зв'язку з розробкою залізрудних родовищ. Кн. 1. Київ: Геоінформ України, 2008. 196 с.
75. Шевченко О. Л., Кирилюк О. С., Пігулевський П. Г. Упорядкування стоків високомінералізованих вод з відвалів південного Кривбасу для подолання геоекологічної кризи. *Геоінформатика*. 2017. № 4 (64). С. 72–80.
76. Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih / P. G. Pihulevskyi, L. B. Anisimova, O. O. Kalinichenko, N. B. Panteleeva, O. V. Hanchuk. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1840. Article 012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018>.
77. Anisimova L., Babyi K., Pihulevskyi P. Some hydrochemical features of water filtration sources from under the left-bank dumps. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: XVI International Scientific Conference (Kyiv, 15–18 November 2022)* / Taras Shevchenko National University of Kyiv. Kyiv, 2022. 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
78. Application of Electrical Resistivity Method (ERM) in Groundwater Exploration / A. I. Riwayat, M. A. A. Nazri, M. H. Z. Abidin. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 995, No. 1. Art. 012094. doi :10.1088/1742-6596/995/1/012094.

79. Applications of Remote Sensing, Hydrology and Geophysics for Flood Analysis / M. T. Anees, K. Abdullah, M. N. M. Nawawi, N. N. Nik Ab Rahman, A. R. Mt. Piah, M. I. Syakir, A. K. Mohd. Omar, K. Hossain. *Indian Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 10, No. 17. DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i17/111541.
80. Bezliepkin M., Pigulevskiy P. The Searching For Sources Of Man-made Problems By Method Of Vertical Electrical Sounding. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment : Proceedings of XII International Scientific Conference (Kyiv, 13–16 November 2018)*. Kyiv, 2018. 1 электрон. опт. диск (CD).
81. Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity / P. H. Pihulevskyi, O. V. Kendzera, K. V. Babii, L. B. Anisimova, O. S. Kyryliuk. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. № 2. P. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005>.
82. Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity / P. H. Pihulevskyi, O. V. Kendzera, K. V. Babii, L. B. Anisimova, O. S. Kyryliuk. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. № 2. P. 5–10.
83. Fauchard C., Mériaux P. Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes. Guide for implementation and interpretation. Antony: Cemagref-Éditions ; IREX, 2007. 192 p.
84. Gołębiowski T., Piwakowski B., C'wiklik M. Application of Complex Geophysical Methods for the Detection of Unconsolidated Zones in Flood Dikes. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 3. Art. 538. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14030538>.
85. Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine : materials / V. Svistun, P. Pigulevskiy. *Geoinformatics 2021: 20th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, 11–14 May 2021)*. Kyiv, 2021.
86. Influence of technogenic objects on the development of landslides in the South of Kryvbass / P. Pigulevskiy, V. K. Svystun. *3rd EAGE Workshop on*

Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities (Kyiv, 20–23 September 2021). Kyiv, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1018>.

87. Pigulevskiy P. I., Stankevich S. A., Svideniuk M. O. Geo-environmental condition assessment of Kryvbas industrial area using satellite radar interferometry. *Innovative technologies in science and education. European experience: materials of International Scientific Conference (Helsinki, 12–15 November 2018)*. Helsinki, 2018. 1 електрон. опт. диск (CD).

88. Repeated geophysical researches of hazardous geocological processes near mining waste storage facilities of southern Kryvbas / P. Pihulevskiy, V. Svystun, O. Tiapkin, A. Tolkunov, S. Slobodianiuk. *Monitoring 2019: 13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Kyiv, 12–15 November 2019)*. Kyiv, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903219>.

89. Studying of modern flooding of southwestern part Krivbass by geophysical methods / P. Pigulevskiy, V. Svistun, S. Slobodyaniuk, A. Kyryliuk. *Geoinformatics 2016 : 15th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, 10–13 May 2016)*. Kyiv, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600477>.

90. Studying the dynamics of technogenic changes in water objects of the South Kryvbass with the complex of remote methods / P. Pigulevskiy, V. Svystun. *2nd EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities (Kyiv, 8–11 September 2020)*. Kyiv, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055007>.

91. The study of geoelectric methods of the current component of the flooding of the southwestern part of Kryvbas / P. Pigulevskiy, V. Svistun, S. Slobodyaniuk, O. Kyryliuk. *Geoinformatics 2017: 16th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, 15–17 May 2017)*. Kyiv, 2017.

92. The Use of GIS Techniques and Geophysical Investigation for Flood Management at Wadi Al-Mafraq Catchment Area / H. Al-Amoush, A. R. Al-Shabeeb, R. Al-Adamat, A. Al-Fugara, S. Al Ayyash, A. Shdeifat, E. Al-Tarazi, J. Abu Rajab. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2017. Vol. 8, No. 2. P. 97–103.

93. Tiapkin O. K., Pihulevskyi P. H., Dovbnich M. M. Taking into account of influence of earth crust faults in solving geological and geoecological tasks by geophysical methods. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017. № 6. P. 11–18.

ДОДАТОК А

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

головний інженер Придніпровської
геофізичної розвідувальної експедиції
кандидат геологічних наук
Заслужений працівник промисловості України

В. К. СВИСТУН

«21» квітня 2026 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Яремія Сергія Олександровича

Комісія в складі:

Голова комісії: Головний геолог ПГРЕ Лазебник В.П.Члени комісії: Начальник геофізичної партії Шубний В.О.Провідний геофізик виробничого відділу Голубев В.М.

склали цей акт про те, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Яремія Сергія Олександровича на тему: «ВПЛИВ ТЕКТОНІЧНОЇ БУДОВИ ТЕРИТОРІЇ КРИВБАСУ НА ПРОЦЕСИ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ПІДТОПЛЕННЯ (ЗА ГЕОФІЗИЧНИМИ ДАНИМИ)», яка представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 «Науки про Землю», прийняті до впровадження та використання у виробничій діяльності Придніпровської геофізичної розвідувальної експедиції ДГП «Укргеофізика».

Зокрема, у виробничу діяльність експедиції впроваджено:

1. Методику камеральної обробки та інтерпретації кривих вертикального електричного зондування (ВЕЗ) з розрахунком диференціальних характеристик розрізу, що дозволяє локалізувати обводнені структурно послаблені і розломні зони у кристалічному фундаменті та осадовому чохлі.
2. Комплексну методику спільної інтерпретації наземних електророзвідувальних даних (ВЕЗ, ПП) та матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для оцінки динаміки техногенного водонасичення ґрунтів і підняття рівня ґрунтових вод.
3. Карти-схеми прогнозування ризиків природно-техногенного підтоплення територій Криворізького залізорудного басейну.

Ефект від впровадження:

Використання запропонованих здобувачем методичних підходів та картографічних матеріалів дозволило підвищити точність геофізичного моделювання фільтраційних каналів у межах гірничопромислових районів та доповненню спеціалізованої геоінформаційної системи безперервного дистанційного моніторингу стану масивів порід у межах відводів діючих та закритих гірничовидобувних підприємств, оптимізувати планування моніторингових досліджень небезпечних геологічних процесів, а також підвищити достовірність прогнозних оцінок екологічного стану геологічного середовища Кривбасу при складанні звітів про результати геофізичних робіт експедиції.

Голова комісії: Лазебник О.П.
(підпис) (ПІБ)

Члени комісії: Шубний В.О.
(підпис) (ПІБ)
Голубев В.М.
(підпис) (ПІБ)