

DOI 10.29254/2077-4214-2025-4-179-94-105

UDC 504.5:546.3 (477.74)

Oriekhova O. V., Kharlamova A. V., Pavlichenko O. F.**ENVIRONMENTAL AND CHEMICAL FEATURES OF WATER IN NATURAL WATER BODIES OF THE KRYVYI RIH IRON ORE BASIN****Separate Division “Scientific and Practical Medical Center of Occupational Health of the Shupyk National Healthcare University of Ukraine” (Kryvyi Rih, Ukraine)****orehovaoksana@ukr.net**

Water resources of the Kryvyi Rih iron ore basin are exposed to considerable anthropogenic pressure caused by the discharge of highly mineralized mine and quarry waters, which leads to degradation of the natural water bodies. Particular attention should be paid to monitoring the chemical composition in the Inhulets, Saksahan, and Dnipro rivers, which form the regional hydrographic network and serve as important sources for economic water use.

Aim is to provide a comprehensive assessment of the chemical composition and ecological status of surface waters within the Kryvyi Rih iron ore basin, using the Inhulets, Saksahan, and Dnipro rivers and the reservoirs of the city of Kryvyi Rih as case studies, with consideration of territorial and seasonal variations in mineralization, hardness, ionic composition, and organic pollution indicators.

Data from the state monitoring of surface waters (2020-2023) and protocols of departmental laboratory observations (2000-2023) were used. The analysis was performed based on the following parameters: pH, hardness, total dissolved solids, chloride and sulfate concentrations, BOD₅, BOD₂₀, COD, dissolved oxygen, and nitrogen forms. Data processing was carried out using descriptive statistical methods, with comparisons among sampling sites and seasonal dynamics, relative to the maximum permissible concentrations (Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 721, 2022).

It was established that the main factor contributing to non-compliance with water quality standards is increased mineralization due to elevated concentrations of Cl⁻ and SO₄²⁻ ions, particularly in areas affected by regulated mine water discharges. Dissolved oxygen, BOD, and COD values indicate a moderate organic load, while nitrogen compounds generally comply with regulatory limits.

River basins of the Inhulets and Saksahan are characterized by local areas with elevated mineralization levels, reflecting the technogenic impact of mining enterprises. Strengthening monitoring and implementing mine-water demineralization technologies are advisable to reduce ionic loading.

Key words: mine waters, natural water bodies, water chemical composition, technogenic impact, environmental monitoring.

Connection of the publication with planned research work.

The study was carried out within the framework of the research project “Conducting scientific research and searching for comprehensive environmentally acceptable solutions for systems of sequential and multiple use of water, including water supplied by other enterprises”, state registration number 0120U103938.

Introduction.

Changes in the chemical composition of water in natural water bodies of the Kryvyi Rih iron ore basin, caused by the long-term impact of mining enterprises (discharge of highly mineralized mine and quarry waters, dewatering of mining workings, filtration from sludge and tailings disposal sites), cause increased environmental risks for aquatic ecosystems and public health. Insufficient efficacy of treatment technologies, combined with periodic regulated discharges into recipient rivers (the Inhulets River basin and its tributary, the Saksahan River, which flows into the Inhulets River within the city of Kryvyi Rih), leads to regional and seasonal increases of salinity – chlorides (Cl⁻), sulfates (SO₄²⁻), dry residue – as well as to increased concentrations of certain heavy metals and deterioration of organoleptic properties of water [1-4].

Studies within the Kryvyi Rih iron ore basin demonstrate local areas with elevated anthropogenic pressure,

while the assessment of environmental risk associated with mine-water discharges into the Inhulets River confirm the significance of this problem for at least the last two decades [3-4]. An additional negative factor is the consequences of military actions during 2022-2025, in particular the destruction of the Kakhovka Hydropower Plant (June 2023), which resulted in large-scale resuspension of bottom sediments and transportation of pollutants in the Dnipro cascade, as well as a short-term impact on the north-western part of the Black Sea [5-6].

Ukraine is one of the countries with relatively low availability of internal renewable freshwater resources. According to the World Bank’s 2021 estimate, approximately 1,244 m³ per person per year [7]. This indicator places Ukraine in the zone of increased hydrological pressure according to the Falkenmark Water Stress Index, where threshold values are interpreted as critical limits of water availability: volumes below 1,700 m³ per person per year indicate water stress, while volumes below 1,000 m³ per person per year indicate water scarcity. The current level reflects systemic vulnerability of Ukraine’s water resources and the risk of transformation of local deficits into regular restrictions under unfavorable hydrometeorological conditions or increased anthropogenic pressure [8]. During 2010-2023, Europe demonstrated slow progress in achieving “good” water status under the Water Framework Directive (WFD). In

2021, only about 37% of surface water bodies reached good or high ecological status, while the main sources of pressure – municipal wastewater, agricultural and industrial pollution – continue to be systemic [9-11].

For Ukraine, River Basin Management Plans (RBMPs) for 2025–2030 were approved in 2024–2025, implementing WFD requirements. Priority measures include reducing discharges of untreated and under-treated wastewater, preventing eutrophication, and applying modern treatment technologies at wastewater facilities and in the mining industry [12-13]. This frames the technical and economic assessment of mine-water demineralization solutions in the Inhulets and Saksahan rivers basins and integration of relevant solutions into action plans. For areas of the Kryvyi Rih iron ore basin, desalination of mineralized wastewater and advanced treatment of mine waters remain relevant, as confirmed by recent applied and review studies [14-15].

Mine and quarry waters from the mining industry represent one of the main factors causing the salinisation of natural water bodies in Ukraine. In 2023, enterprises in the Kryvyi Rih iron ore basin were required to discharge excess return (mine) water into the Inhulets River through the Balka Svistunova storage pond, an artificial water collection reservoir that accumulates filtration and wash water from adjacent workings and disposal sites. The total volume of discharges was about 11.9 million m³, with the contribution of individual enterprises indicated [16]. At the end of 2024, one of the enterprises discharged about 5.20 million m³ (approximately 47.5% of the total regulated volume for the period) [17]. In the Dnieper River basin, the environmental quality standards (EQS) for cadmium and nickel in water, as well as for mercury (30.2 µg/kg for EQS 20 µg/kg) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in biota, were exceeded. At the same time, screening monitoring identified more than 600 organic micropollutants (including 161 identified compounds), confirming the multicomponent nature of basin pollution and substantiating the need for enhanced, targeted monitoring [18].

Intensive dewatering forms depression cones, alters the balance of surface and groundwater outflow, and increases the risks of secondary salinization in infiltration zones [19]. A significant number of technogenic objects are concentrated within the Kryvyi Rih iron ore basin: 17 large open pits, 8 mines, 9 tailings storage facilities, 37 waste rock dumps, and 3 slag dumps. Disturbed areas cover approximately 3,750 ha, while the volume of open-pit and subsidence voids exceeds 4.5 billion m³; waste dumps and tailings facilities provide for about 65% of land-surface alterations [20]. The project's design capacity for the new section of the tailings pond is approximately 29.4•10⁶ m³ for one of the largest enterprises in the region, and the total capacity is 34.8•10⁶ m³, which shows the scale of the projected capacities for storing tailings and technical water and justifies the need for enhanced environmental assessment of such facilities [21].

Current reviews of mine and quarry water treatment technologies indicate high efficiency in removing ions and heavy metals, however, there are also significant limitations: energy intensity of processes, cost and methods of concentrate handling, risks of membrane fouling and contamination, and the associated maintenance costs. Multistage combined processes are rec-

ommended: primary chemical pretreatment (pH adjustment, coagulation, flocculation, oxidation), followed by membrane stages with prefiltration (sand and carbon filters, ultrafiltration), and final precipitation or crystallization to convert dissolved salts into solid or paste-like forms suitable for disposal [22-23].

The water resources of the Kryvyi Rih region are formed by the Dnipro-Inhulets-Saksahan rivers and a cascade of reservoirs (Makortivske, Kresivske, Dzerzhynske). Long-term mining activities have caused the straightening and crossing of ravines, changed the surface flow and infiltration conditions, and formed man-made reservoirs and aeration zones, which significantly affect the hydrochemical regime of watercourses [20, 24]. The system of drainage and accumulation of mine water with controlled discharges during the inter-vegetation period and subsequent ecological releases from reservoirs is a compromise in the absence of economically efficient energy-saving technologies for deep purification; it causes seasonal and regional heterogeneity of Cl⁻, SO₄²⁻, dry residue and electrical conductivity indicators in the Inhulets-Saksagan system and downstream of the Dnipro River [3, 17, 25-26].

For the Inhulets and Saksahan rivers, periodic exceeding of total hardness, mineralisation, sulphate and chloride content, as well as fluctuations in dissolved oxygen, biochemical oxygen demand over 5 days (BOD₅) and chemical oxygen demand (COD) are recorded. In reservoirs (especially Karachunivsky and Kresivsky), there is an accumulation of impurities and isolated exceedances for certain metals and phosphorus, which justifies increased control of sources and adjustment of the operating modes of hydraulic structures [1, 4, 27]. Studies on the Saksagan River have shown spatial heterogeneity in water quality and occasional exceedances in ion composition and mineralisation, which is consistent with the integrated assessment of the ecological status of the river [1].

Significant contributions are made by filtration leakage from tailings ponds and storage facilities (risks of underwatering, rising groundwater levels and secondary salinisation of coastal areas) and irrigation (about 18,000 hectares), which on loess plains with a weak gully-ravine structure increases the sensitivity of the system to changes in infiltration, evaporation and salt accumulation. Generalised criteria for impact on aquatic biota include indicators of total mineralisation, electrical conductivity and chloride and sulphate concentrations [27]. Reviews by the U.S. Geological Survey (2024) confirm the increasing risks of freshwater salinisation and the need for targeted monitoring and management of ion load sources [28-29].

Regardless of the considerable number of studies devoted to the environmental assessment of the Inhulets River basin, certain aspects related to the comprehensive assessment of the impact of mining activities on water quality are still unresolved. Generalized criteria for assessing seasonal variability of mineralization, hardness, and organic load indicators have not been established, which limits the effectiveness of environmental monitoring. Updated data on the ionic composition of water during periods of regulated discharges and flushing operations, which are of key importance for water management balance control, are lacking. Thus, the article is aimed to clarify scientific ideas about the patterns

of formation of the hydrochemical regime of surface waters in the Kryvyi Rih iron ore basin, taking into account anthropogenic load, seasonal factors and modern regulatory criteria for water quality.

The aim of the study.

A comprehensive assessment of the chemical composition and ecological status of surface waters of the Kryvyi Rih iron ore basin using the Inhulets, Saksahan, and Dnipro rivers and the reservoirs of the city of Kryvyi Rih as examples, taking into account territorial and seasonal differences in mineralization, hardness, ionic composition, and organic load indicators.

Object and research methods.

The object of the study is water quality indicators and the chemical composition of natural surface water bodies of the Kryvyi Rih iron ore basin – the Saksahan, Inhulets, and Dnipro rivers, as well as the Pivdenne and Karachunivske reservoirs.

The subject of the study includes territorial features of the formation of water chemical composition, levels of mineralization, hardness, and organic load depending on seasons, as well as compliance with hygienic standards.

Research methods. The main physical and chemical indicators, mineralization and salt composition, indicators of organic load, and the content of chemical substances in surface water bodies of the Kryvyi Rih iron ore basin – the Saksahan, Inhulets, and Dnipro rivers – as well as the waters of the Pivdenne and Karachunivske reservoirs were studied. The research was based on the generalization of results of state monitoring of surface waters conducted by the State Agency of Water Resources of Ukraine (2020-2023) and observations of industrial laboratories (2000-2023). The main sampling locations were determined taking into account the hydrology of the areas and anthropogenic influence. Sampling was carried out in accordance with the requirements of DSTU EN ISO 5667-6:2025 Water quality. Sampling. Part 6. Guidance on sampling of rivers and streams (EN ISO 5667-6:2016, IDT; ISO 5667-6:2014, IDT) and DSTU ISO 5667-3:2016 / ISO 5667-3:2024 regarding preservation, transportation, and storage of samples.

Indicators of water composition and properties were analyzed for the Pivdenne Reservoir, Karachunivske Reservoir, the Inhulets River (Novoselivka village), and the Saksahan River (mouth) during the summer period of 2020-2021; generalized minimum-maximum values of these indicators were obtained.

For 2020-2023, 1920 laboratory determinations of chemical indicators in surface waters were processed. Additionally, 48 protocols of departmental laboratory studies for 2000-2023 were analyzed for retrospective comparison and assessment of long-term dynamics of indicators over time.

Water quality assessment was performed using indicators sensitive to the impact of highly mineralized mine waters: hydrogen ion concentration (pH), total hardness, total dissolved solids, BOD₅, total biochemical oxygen demand (BOD₂₀), COD, as well as chloride (Cl⁻) and sulfate (SO₄²⁻) ions. Additionally, based on state

surface water monitoring data from the State Agency of Water Resources of Ukraine (2020-2023), dissolved oxygen, suspended solids, chloride and sulfate content, and nutrient forms of nitrogen – ammonium (NH₄⁺), nitrates (NO₃⁻), nitrites (NO₂⁻) – as well as phosphate ions were analyzed.

The comparison was made with regulatory indicators of water composition and properties of water bodies and maximum permissible concentrations (MPCs) in water bodies in accordance with Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 721 dated 02.05.2022 “Hygienic standards for water quality of aquatic bodies to meet the drinking, domestic, and other needs of the population” [30].

Data processing was performed using standardized descriptive statistical methods (determination of minimum, maximum, mean values, and standard deviation), followed by comparison with regulatory MPC values and hygienic standards for water bodies. Comparative analysis was carried out between sampling points and across observation seasons: during regulated discharges, “environmental releases” of fresh water, and during the summer (“stabilization”) period. For retrospective analysis of protocols, a comparison of the concentration ranges and trends in ionic composition and mineralization was performed, allowing interpretation of changes in indicators over time.

Research results and their discussion.

Generalized ranges of the main physicochemical indicators of water quality in the reservoirs of Kryvyi Rih and the Inhulets and Saksahan rivers for 2020–2021 in the summer period are presented in table. The obtained values reflect the spatial distribution of mineralization, hardness, and organic load influenced by mining enterprises of the region.

At the investigated locations, pH ranged from 6.61 to 8.57, i.e., from slightly acidic to alkaline. The lowest values were recorded at the mouth of the Saksahan River (6.61-7.56), probably due to local organic loading or mixing with surface discharge. In the Karachunivske Reservoir, pH was relatively stable and alkaline (8.20-8.57).

A pronounced increase in total water hardness was observed from the reservoirs to the control sampling sites in the rivers – from 4.5-5.3 mg-eq/dm³ in the Pivdenne Reservoir to 18.0-26.0 mg-eq/dm³ in the Inhulets River (Novoselivka village). This pattern reflects the accumulation of calcium (Ca²⁺) and magnesium (Mg²⁺) cations, which determine hardness and correlate with total mineralization. Potential factors contributing to the increase in mineralization include the filtration inflow of highly mineralized mine and groundwater, as well as the

Table – Indicators of water composition and properties in the reservoirs of Kryvyi Rih (minimum-maximum, 2020-2021)

Parameter (unit)	Pivdenne Reservoir	Karachunivske Reservoir	Riv. Inhulets (Novoselivka)	Riv. Saksahan (mouth)
pH	7,64-8,35	8,20-8,57	7,99-8,50	6,61-7,56
Total hardness, mg-eq/dm ³	4,5-5,3	9,7-12,2	18,0-26,0	11,2-17,8
Total dissolved solids, mg/dm ³	206-479	1 030-1 331	2 442-3 358	1 516-2 377
Cl ⁻ , mg/dm ³	34,0-68,0	120,0-143,0	760,0-1 070,0	201,0-400,0
SO ₄ ²⁻ , mg/dm ³	64,5-132,3	413,1-632,5	768,6-981,1	528,78-756,3
BOD ₂₀ mg O ₂ /dm ³	0,31-5,0	1,8-7,1	1,3-9,1	3,84-7,5
COD, mg O ₂ /dm ³	14,7-19,2	12,3-21,6	13,2-19,8	18,0-20,4

concentration effect of evaporation during the summer period.

Total dissolved solids varied from 206-479 mg/dm³ in the Pivdenne Reservoir to 2442-3358 mg/dm³ in the Inhulets River (Novoselivka village), exceeding the standard by approximately 2.4-3.4 times. Chloride concentrations changed from 34-68 mg/dm³ in the Pivdenne Reservoir to 760-1070 mg/dm³ in the Inhulets River, which is 2.2-3.1 times higher than the MPC. Sulfate concentrations increased from 64.5-132.3 mg/dm³ in the Pivdenne Reservoir to 768.6-981.1 mg/dm³ in the Inhulets River (Novoselivka village), exceeding the MPC by 1.5-2.0 times. Maximum values of Cl⁻ and SO₄²⁻ ions were recorded in the Inhulets and Saksahan river sections, reflecting intense technogenic pressure within the river basins and low water dilution potential in the summer period.

At the investigated observation points, BOD₂₀ ranged from 0.31 to 9.10 mg O₂/dm³. The highest values were recorded in the Inhulets River (up to 9.10 mg O₂/dm³) and at the Saksahan River (mouth) (up to 7.50 mg O₂/dm³), corresponding to exceedances of an indicative threshold by 3.0 and 2.5 times, respectively. In reservoirs, the maximum values were 7.10 mg O₂/dm³ in the Karachunivske (exceedance of about 2.4 times) and 5.00 mg O₂/dm³ in the Pivdenne (exceedance of about 1.7 times). Peak BOD₂₀ values at river observation points indicate a moderate organic load and the need for targeted control of its sources.

At the investigated observation points, COD ranged from 12.3 to 21.6 mg O₂/dm³, which generally corresponds to a moderate organic load. At the same time, most observation points showed partial exceedances of an indicative guideline value (15 mg O₂/dm³): in the Pivdenne and Karachunivske reservoirs and in the Inhulets and Saksahan rivers, maximum COD values were 18-22 mg O₂/dm³, i.e., approximately 20-45% above the threshold.

During the summer (stabilization) period in the river basins, elevated ion concentrations are generally recorded: chlorides – 137.4-980.9 mg/dm³, SO₄²⁻ – 493.0-784.0 mg/dm³. Upper limits exceed the MPC: for Cl⁻ by 2.8 times, for SO₄²⁻ by 1.6 times, which may reflect limited dilution during low-water period. In the lower reaches of the Inhulets River, minimum summer values were recorded: chlorides – 27.0 mg/dm³, sulfates – 61.6 mg/dm³, which correspond to the standard values. In contrast, in the Saksahan River (in summer), concentrations were: Cl⁻ – 500 mg/dm³ and SO₄²⁻ – 991.8 mg/dm³. This exceeds the respective MPCs by 1.4 and 2.0 times, indicating localized input sources and increased water residence time.

During the period of regulated discharge of mine waters into the Inhulets River (Shyroke area), chloride content was recorded at 2500 mg/dm³ (MPC exceedance by 7.1 times), sulfates – 741.8 mg/dm³ (MPC exceedance by 1.5 times), and total dissolved solids – 6000-8000 mg/dm³ (exceedance by 6-8 times). Similar levels of total dissolved solids were observed in the areas of Lativka and Mohylivka villages. The obtained values are extremely high and confirm a substantial contribution of highly mineralized mine waters to the water balance of the specified section.

In spring period (Shyroke-Lativka-Mohylivka areas), the dry residue indicator was 1,400-3,000 mg/dm³, which exceeds the regulatory levels by approximately

1.4-3.0 times. These values are significantly lower than the peaking levels during discharge, but still do not meet the requirements. During dilution with fresh water in the Inhulets River, chloride concentrations were 130-800 mg/dm³, sulfates – 500-900 mg/dm³: there is a decrease and approach to the levels of the Karachunivskiy Reservoir, but the upper limits still exceed the normative values – approximately 2.3 times for chlorides and 1.8 times for sulfates.

Based on government monitoring data, the chemical composition of the Inhulets River was analyzed and the background concentrations of the main indicators were determined. Dissolved oxygen levels at all stations were 8.48-10.51 mg O₂/dm³, which exceeds the standard of 4 mg O₂/dm³; no signs of oxygen deficiency were found. Locally, BOD₅ peak values were recorded mainly at station 3 (3.19-3.92 mg O₂/dm³), indicating episodic inflows of organic substances. Overall, the oxygen regime meets hygiene requirements, and the organic load is assessed as moderate.

A persistent exceedance of the MPC for sulfates was noted at Station 1: 628-753 mg/dm³ (approximately 1.3-1.5 times), and at Station 4: 1446-1613 mg/dm³ (approximately 2.9-3.2 times). Significant exceedances of chloride content were also recorded at Station 1: 1263-2659 mg/dm³ (peak values in 2022), which is approximately 3.6-7.6 times above the MPC. At Station 4, chloride concentrations exceeded the MPC by approximately 1.3-1.5 times. Concentrations of NH₄⁺, NO₃⁻, and NO₂⁻ ions at all stations were substantially lower than the corresponding standards.

Thus, the main factor causing non-compliance with water quality requirements is increased ionic mineralization, primarily due to chlorides and sulfates at observation stations 1 and 4. This is consistent with the hydrochemical profile of the section and indicates the influence of highly mineralized discharges (regulated discharges of mine and quarry waters) and filtration inflow from man-made reservoirs. Within this context, the oxygen regime and organic load (BOD, COD) indicators generally correspond to a moderate level, although episodic peak values are recorded, which requires targeted control of sources.

Analysis of oxygen regime indicators and organic load in the Dnipro River shows that during 2020-2023, dissolved oxygen concentrations at all stations were 8.6-11.6 mg O₂/dm³, i.e., significantly higher than the standard of 4 mg O₂/dm³. No signs of systemic oxygen deficit were detected. Most BOD₅ values were within 1.5-3.2 mg O₂/dm³, corresponding to low-moderate organic load.

The analysis of mineralization indicators showed that sulfate concentrations were in the range of 33-63 mg/dm³; these values are substantially below the MPC. Chloride content in most cases was 22-52 mg/dm³, less often 76-304 mg/dm³; these values also do not exceed the MPC. Concentrations of nutrient forms of nitrogen – ammonium, nitrates and nitrites – complied with hygienic standards at all observation posts.

The content of suspended solids in most cases was 5.0-9.7 mg/dm³; no signs of systemic turbidity increase were recorded. Phosphate ion concentrations were determined within the range of 0.14-0.37 mg/dm³; isolated lower values (0.10-0.20 mg/dm³) and single increases (0.34-0.37 mg/dm³) were observed at certain stations.

Thus, in 2020-2023, the water in the Dnieper River at the monitored stations is characterized by a stable oxygen regime and a predominantly moderate organic load, low and moderate levels of mineralization ions, and low concentrations of nitrogen forms. Overall, this indicates that most indicators meet regulatory requirements.

Conclusions.

1. The obtained results confirm pronounced spatial variability of water quality indicators in the Kryvyi Rih iron ore region caused by mining activities. The most contrasting differences are observed between reservoirs (predominantly with low to moderate mineralization) and river sections of the Saksahan and Inhulets, where a substantial increase in total mineralization, hardness, and concentrations of major ions (primarily Cl^- and SO_4^{2-}) was recorded.

2. The main factor of non-compliance with hygienic standards is increased ionic mineralization, in particular due to Cl^- and SO_4^{2-} ions. The maximum exceedances of the MPC were recorded in the Inhulets River sections: SO_4^{2-} by 2–3 times and Cl^- up to 7.6 times. These levels are likely caused by the influence of highly mineralized mine and groundwater, as well as filtration inflows from technogenic reservoirs.

3. BOD_{20} and COD indicators point to a moderate organic load: in the Inhulets and Saksahan rivers, local increases are periodically observed up to 9.1 $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$ (BOD_{20}) and 21.6 $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$ (COD). Dissolved oxygen concentrations (8.48-10.51 $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$) in the Inhulets River consistently exceed the standard by approximately 2.1-2.6 times.

4. For the Dnipro River (2020-2023), a stable oxygen regime was established: dissolved oxygen 8.6-11.6 $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$. Levels of mineralization ions remain below the MPC: chlorides not exceeding 304 mg/dm^3 and sulfates not exceeding 63 mg/dm^3 . BOD_5 and COD values remain within 1.5-3.2 $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$ and 12-20 $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$, respectively. At the investigated sampling sites of the Dnipro River, no evidence of significant anthropogenic impact was detected for the considered indicators.

5. The main pressure on water bodies within the Inhulets basin is formed by highly mineralized mine waters, filtration leakages from technogenic storage facilities, and limited dilution potential in the summer period, which increases concentration effects and the growth of ionic mineralization (primarily due to chlorides and sulfates).

6. To improve the state of water bodies, it is advisable to implement: modernization of mine-water treatment and demineralization systems; monitoring of Cl^- , SO_4^{2-} ions, and total dissolved solids within the Inhulets and Saksahan river basins; application of regulated discharge regimes; integration of local monitoring results into regional river basin management plans (RBMPs 2025-2030).

Prospects for further research.

It is advisable to continue monitoring the composition and properties of water in aquatic objects of Kryvyi Rih during the war and post-war periods in order to make an analytical comparison of the contribution of industrial pollution and the effects caused by military activities.

DOI 10.29254/2077-4214-2025-4-179-94-105

УДК 504.5:546.3 (477.74)

Орехова О. В., Харламова А. В., Павліченко О. Ф.

ЕКОЛОГІЧНІ ТА ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВОДИ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО БАСЕЙНУ

Відокремлений підрозділ «Науково-практичний медичний центр професійного здоров'я Національного університету охорони здоров'я України імені П. Л. Шупика» (м. Кривий Ріг, Україна)

orehovaoksana@ukr.net

Водні ресурси Криворізького залізорудного басейну зазнають суттєвого техногенного навантаження внаслідок скидання високомінералізованих шахтних та кар'єрних вод, що призводить до погіршення якості природних водойм. Особливої уваги потребує моніторинг хімічного складу вод річок Інгулець, Саксагань і Дніпро, які формують регіональну гідромережу та забезпечують господарське водокористування.

Мета – комплексна оцінка хімічного складу та екологічного стану поверхневих вод Криворізького залізорудного басейну на прикладі річок Інгулець, Саксагань, Дніпро та водосховищ м. Кривого Рогу з урахуванням територіально-сезонних відмінностей показників мінералізації, жорсткості, іонного складу та органічного навантаження.

Використано дані державного моніторингу поверхневих вод (2020-2023 рр.) та протоколів відомчих лабораторних спостережень (2000-2023 рр.). Аналіз виконано за показниками рН, жорсткості, сухого залишку, вмісту хлоридів і сульфатів, БСК5, БСК20, ХСК, розчиненого кисню та азотних форм. Оброблення даних проводилось методами описової статистики з порівнянням між пунктами відбору та в сезонній динаміці, відносно гранично допустимих концентрацій (Наказ МОЗ України № 721, 2022).

Встановлено, що основним чинником невідповідності якості води є підвищена мінералізація за рахунок іонів Cl^- та SO_4^{2-} , особливо в районах регламентованого скидання шахтних вод. Значення розчиненого кисню, БСК і ХСК свідчать про помірне органічне навантаження, тоді як азотні сполуки переважно відповідають нормативам.

Для басейнів річок Інгульця та Саксагані характерні локальні ділянки перевищення за мінералізацією, що відображає техногенний вплив гірничодобувних підприємств. Доцільним є посилення моніторингу і впровадження технологій демінералізації шахтних вод для зменшення іонного навантаження.

Ключові слова: шахтні води, природні водойми, хімічний склад води, техногенний вплив, екологічний моніторинг.

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами.

Дослідження виконано в рамках НДР «Проведення наукових досліджень та пошук комплексних екологічно прийнятних рішень щодо систем послідовного та повторного використання води, в тому числі води, що надходить від інших підприємств» за номером Державної реєстрації 0120U103938.

Вступ.

Зміни хімічного складу води природних водойм Криворізького залізорудного басейну, зумовлені тривалним впливом гірничодобувних підприємств (скиданням високомінералізованих шахтних і кар'єрних вод, осушенням гірничих виробок, фільтрацією зі шламових та хвостових полігонів), формують підвищені екологічні ризики для водних екосистем і здоров'я населення. Недостатня ефективність очисних технологій у поєднанні з періодичними регламентованими скидами в річки-приймачі (басейн р. Інгулець та її притока р. Саксагань, що впадає в р. Інгулець у межах м. Кривий Ріг) призводить до локальних і сезонних перевищень солоності – хлоридів (Cl^-), сульфатів (SO_4^{2-}), сухого залишку, а також до підвищення вмісту окремих важких металів і погіршення органолептичних властивостей води [1-4].

Дослідження в межах Криворізького залізорудного басейну демонструють локальні ділянки з підвищеним антропогенним навантаженням, а оцінки екологічного ризику від скидання шахтних вод в р. Інгулець підтверджують значущість цієї проблеми протягом щонайменше останніх двох десятиліть [3-4]. Додатковим негативним фактором є наслідки воєнних дій 2022-2025 рр., зокрема руйнування Каховської ГЕС (червень 2023 р.), що спричинило масштабне повторне підняття донних відкладів і перенесення забруднювачів у каскаді Дніпра та короткостроковий вплив на північно-західну частину Чорного моря [5-6].

Україна належить до країн із порівняно невисокою забезпеченістю внутрішніми відновлюваними прісноводними ресурсами: за оцінкою Світового банку за 2021 р. – близько 1244 м^3 на людину на рік [7]. Цей показник відносить Україну до зони підвищеного гідрологічного навантаження за шкалою Фалькенмарка, де порогові інтервали індексу трактується як критичні межі доступності води: обсяг менше ніж $1\,700 \text{ м}^3$ на людину на рік відповідає стану водного стресу, а менше ніж $1\,000 \text{ м}^3$ на людину на рік характеризує водний дефіцит; поточний рівень свідчить про системну вразливість водних ресурсів України і ризик перетворення локальних дефіцитів у регулярні обмеження за несприятливих гідрометеорологічних умов або підвищених антропогенних навантажень [8]. У 2010-2023 рр. Європа демонструє повільний прогрес у досягненні «доброго» стану вод за Водною рамковою директивою (Water Framework Directive, WFD): у 2021 р. лише приблизно 37% поверхневих водних масивів досягли доброго та високого екологічного статусу, а пріоритетні джерела навантаження – комунальні стоки, аграрне та промислове забруднення – зберігають свій системний характер [9-11].

Для України у 2024-2025 рр. затверджені Плани управління річковими басейнами (ПУРБ) 2025-2030, що імплементують вимоги WFD: пріоритети – зменшення скидання неочищених і недоочищених стоків,

протидія евтрофікації, застосування сучасних технологій очищення на об'єктах водовідведення та у гірничодобувній галузі [12-13]. Це задає рамку для техніко-економічної оцінки рішень з демінералізації шахтних вод у басейнах р. Інгульця та р. Саксагані та інтеграції відповідних рішень у плани заходів. Для районів Криворізького залізорудного басейну залишаються актуальними опріснення мінералізованих стічних вод та комплексне доочищення шахтних вод, що підтверджено останніми прикладними та оглядовими роботами [14-15].

Шахтні та кар'єрні води гірничодобувної промисловості – один із ключових чинників засолення природних водних об'єктів України. Для підприємств Криворізького залізорудного басейну в 2023 р. регламентовано розміщення надлишків зворотних (шахтних) вод у р. Інгулець через ставок-накопичувач Балка Свистунова – штучний водозбірний резервуар, який акумулює фільтраційні й промивні води з прилеглих виробок і полігонів; сумарний обсяг скидів становив близько $11,9 \text{ млн м}^3$ із зазначенням внеску окремих підприємств [16]. Наприкінці 2024 р. одне з підприємств здійснило приблизно $5,20 \text{ млн м}^3$ скидів (приблизно 47,5% від загального регламентованого обсягу за період) [17]. У басейні р. Дніпро зафіксовано перевищення екологічних нормативів якості (EQS) для кадмію та нікелю у воді, а також для ртуті ($30,2 \text{ мкг/кг}$ за EQS 20 мкг/кг) і полібромованих дифенілових ефірів (PBDEs) у біоті. Одночасно під час скринінгового моніторингу ідентифіковано понад 600 органічних мікрополіютантів (зокрема 161 визначену сполуку), що підтверджує багатокomпонентний характер забруднення басейну та обґрунтовує необхідність посиленого, цільового моніторингу [18].

Інтенсивне осушення формує депресійні лійки, змінює баланс поверхневого та підземного стоку й підвищує ризики вторинного засолення у зонах інфільтрації [19]. У межах Криворізького залізорудного басейну зосереджено значну кількість техногенних об'єктів: 17 великих кар'єрів, 8 шахт, 9 хвостосховищ, 37 відвалів породи та 3 шлакові відвали; порушення охоплюють близько 3 750 га, а об'єм кар'єрних і просядкових порожнин перевищує $4,5 \text{ млрд м}^3$; відвали та хвостосховища забезпечують приблизно 65% трансформацій земної поверхні [20]. Для одного з найбільших підприємств регіону проєктна корисна ємність нової секції хвостосховища становить приблизно $29,4 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, а загальна місткість – $34,8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, що ілюструє масштаб планованих ємностей для складування хвостів і технічної води та обґрунтовує необхідність посиленої екологічної оцінки таких об'єктів [21].

Сучасні огляди технологій очищення шахтних і кар'єрних вод визначають високу ефективність вилучення іонів і важких металів, але й суттєві обмеження: енергоємність процесів, вартість і способи поводження з концентратом, ризики відкладення та забруднення мембран і пов'язані витрати на обслуговування. Рекомендовано застосовувати багатоступеневі комбіновані схеми: первинна хімічна підготовка (регулювання водневого показника рН, коагуляція, флокуляція, окиснення), далі мембранні стадії з передфільтрацією (піщані та карбонові фільтри, ультрафільтрація), і фінальне осадоутворення або кристалі-

зація для переведення розчинених солей у тверді чи пастоподібні форми, придатні до утилізації [22-23].

Водні ресурси Криворізького регіону формуються річками Дніпро-Інгулець-Саксагань і каскадом водосховищ (Маковтоське, Кресівське, Дзержинське). Тривала гірничодобувна діяльність спричинила випрямлення та перерізання балок, змінила умови поверхневого стоку та інфільтрації, сформувала техногенні ємності й зони аерації, що істотно впливають на гідрохімічний режим водотоків [20, 24]. Схема відведення та акумуляції шахтних вод із регламентованими скидами у міжвегетаційний період і подальшими екологічними попусками з водосховищ є компромісом за відсутності економічно доцільних енергоефективних технологій глибокого очищення; вона зумовлює сезонно-просторову неоднорідність показників іонів Cl^- , SO_4^{2-} , сухого залишку та електропровідності в системі Інгулець-Саксагань і нижче за течією р. Дніпра [3, 17, 25-26].

Для річок Інгулець і Саксагань періодично фіксуються перевищення загальної жорсткості, мінералізації, вмісту сульфатів і хлоридів, а також коливання розчиненого кисню, біохімічного споживання кисню за 5 днів (БСК_5) і хімічного споживання кисню (ХСК). У водосховищах (зокрема Карачунівському та Кресівському) спостерігаються накопичення домішок і поодинокі перевищення за окремими металами та фосфором, що обґрунтовує посилений контроль джерел і коригування режимів експлуатації гідроспоруд [1, 4, 27]. Дослідження на р. Саксагань засвідчили просторову неоднорідність якості води та епізодичні перевищення за іонним складом і мінералізацією, що узгоджується з інтегральною оцінкою екологічного стану річки [1].

Вагомі внески формують фільтраційні витоки з хвостосховищ і накопичувачів (ризиків підтоплення, підйому рівня ґрунтових вод і вторинного засолення прибережних зон) та зрошення (близько 18 тис. га), що на лесових рівнинах зі слабкою яружно-балковою сіткою підвищує чутливість системи до змін інфільтрації, випаровування і накопичення солей. До узагальнених критеріїв впливу на водну біоту належать показники загальної мінералізації, електропровідності та концентрації хлоридів і сульфатів [27]. Огляди U.S. Geological Survey (2024) підтверджують зростаючі ризики засолення прісних вод і потребу в цільовому моніторингу та керуванні джерелами іонного навантаження [28-29].

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених екологічній оцінці басейну р. Інгульця, залишаються невирішеними окремі аспекти, що стосуються комплексної оцінки впливу гірничодобувної діяльності на якість води. Не сформовано узагальнених критеріїв оцінки сезонної варіабельності показників мінералізації, жорсткості та органічного навантаження, що обмежує ефективність екологічного моніторингу. Відсутні актуалізовані дані щодо іонного складу води у період регламентованих скидань і промивань, які мають ключове значення для управління водогосподарськими балансами. Таким чином, стаття спрямована на уточнення наукових уявлень про закономірності формування гідрохімічного режиму поверхневих вод Криворізького залізрудного басейну з урахуванням техногенного навантаження,

сезонних факторів і сучасних нормативних критеріїв якості води.

Мета дослідження.

Комплексна оцінка хімічного складу та екологічного стану поверхневих вод Криворізького залізрудного басейну на прикладі річок Інгулець, Саксагань, Дніпро та водосховищ м. Кривого Рогу з урахуванням територіально-сезонних відмінностей показників мінералізації, жорсткості, іонного складу та органічного навантаження.

Об'єкт і методи дослідження.

Об'єкт дослідження: показники якості води та хімічний склад природних поверхневих вод Криворізького залізрудного басейну – річок Саксагань, Інгулець і Дніпро, а також Південного та Карачунівського водосховищ.

Предметом дослідження є територіальні особливості формування хімічного складу води, рівень її мінералізації, жорсткості, органічного навантаження у залежності від сезонів, а також на відповідність гігієнічним нормативам.

Методи дослідження. Досліджено основні фізико-хімічні показники, мінералізація та сольовий склад, показники органічного навантаження води, вміст хімічних речовин у поверхневих водоймах Криворізького залізрудного басейну – річок Саксагань, Інгулець і Дніпро – а також води Південного та Карачунівського водосховищ. Дослідження базувалося на узагальненні результатів державного моніторингу поверхневих вод, проведеного Державним агентством водних ресурсів України (2020-2023 рр.), та спостережень виробничих лабораторій (2000-2023 рр.). Основні пункти відбору визначено з урахуванням гідрології ділянок та техногенних впливів. Відбір проб здійснювався відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 5667-6:2025 Якість води. Відбирання проб. Частина 6. Настанови щодо відбирання проб із річок і струмків (EN ISO 5667-6:2016, IDT; ISO 5667-6:2014, IDT) та ДСТУ ISO 5667-3:2016 / ISO 5667-3:2024 щодо консервування, транспортування та зберігання проб.

Проаналізовано показники складу та властивостей води для Південного водосховища, Карачунівського водосховища, р. Інгулець (с. Новоселівка) та р. Саксагань (гирло) у літній період 2020-2021 рр.; узагальнені мінімальні-максимальні значення цих показників.

За 2020-2023 рр. опрацьовано 1920 лабораторних визначень хімічних показників у поверхневих водах. Додатково проаналізовано 48 протоколів відомчих лабораторних досліджень за 2000-2023 рр. з метою ретроспективного порівняння та оцінки довгострокової динаміки показників упродовж років.

Оцінку якості води виконано за показниками, чутливими до впливу високомінералізованих шахтних вод: водневий показник (рН), загальна жорсткість, сухий залишок, БСК_5 , повне біохімічне споживання кисню (БСК_{20}), ХСК, а також за вмістом іонів Cl^- і SO_4^{2-} . Додатково, за матеріалами державного моніторингу поверхневих вод Державного агентства водних ресурсів України (2020–2023 рр.), проаналізовано розчинений кисень, завислі речовини, вміст Cl^- та SO_4^{2-} , вміст біогенних форм азоту – амонію (NH_4^+), нітратів (NO_3^-), нітритів (NO_2^-) – та фосфат-іонів.

Порівняння виконано щодо нормативних показників складу та властивостей води водного об'єкту

та гранично допустимих концентрацій (ГДК) у воді водних об'єктів згідно з Наказом МОЗ України від 02.05.2022 № 721 «Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» [30].

Оброблення даних проводили методами стандартизованої описової статистики (визначення мінімуму, максимуму, середніх значень, стандартного відхилення) з подальшим порівнянням із нормативними значеннями ГДК та гігієнічних нормативів для води водних об'єктів. Порівняльний аналіз проводили між пунктами відбору та за сезонами спостережень: під час регламентованих скидів, «екологічних попусків» прісної води та у літній («стабілізаційний») період. Для ретроспективного аналізу протоколів виконано порівняльне співставлення діапазонів концентрацій і тенденцій змін іонного складу та мінералізації, що дозволило інтерпретувати зміни показників у динаміці.

Результати дослідження та їх обговорення.

Узагальнені діапазони основних фізико-хімічних показників якості води водоймищ м. Кривий Ріг та річок Інгулець і Саксагань за 2020-2021 рр. у літній період представлені у таблиці. Отримані значення відображають просторовий розподіл за ступенем мінералізації, жорсткості та органічного навантаження, зумовлений впливом гірничодобувних підприємств регіону.

У досліджених пунктах рН коливався в межах 6,61-8,57, що відповідає від слабкокислого до лужного. Найнижчі значення зафіксовано в гирлі р. Саксагань (6,61-7,56), ймовірно через локальне органічне навантаження або змішування з поверхневими стоками. У Карачунівському водосховищі рН був відносно стабільним і лужним (8,20-8,57).

Відзначено виразне зростання загальної жорсткості води від водосховищ до контрольних місць відбору проб річок: від 4,5-5,3 мг-екв/дм³ у Південному водосховищі до 18,0-26,0 мг-екв/дм³ у р. Інгулець (с. Новоселівка). Така динаміка відображає накопичення катіонів кальцію (Ca²⁺) та магнію (Mg²⁺), що визначають показник жорсткості та корелюють із загальною мінералізацією. Ймовірними чинниками зростання мінералізації є фільтраційний притік високмінералізованих шахтних і підземних вод, а також концентраційний ефект випаровування у літній період.

Показник сухого залишку варіював від 206-479 мг/дм³ у Південному водосховищі до 2442-3358 мг/дм³ у р. Інгулець (с. Новоселівка), що перевищує норматив приблизно у 2,4-3,4 рази. Концентрації Cl⁻ змінювалися від 34-68 мг/дм³ у Південному водосховищі до 760-1070 мг/дм³ у р. Інгулець, що у 2,2-3,1 рази вище за ГДК. Вміст сульфатів зростав від 64,5-132,3 мг/дм³ у Південному водосховищі до 768,6-981,1 мг/дм³ у р. Інгулець (с. Новоселівка), перевищуючи ГДК у 1,5-2 рази. Максимальні значення іонів Cl⁻ та SO₄²⁻ фіксувалися на ділянках річок Інгулець і Саксагань, що відображає інтенсивне техногенне навантаження

Таблиця – Показники складу та властивостей води водоймищ м. Кривого Рогу (мінімальні-максимальні, 2020-2021)

Показник, од. виміру	Південне водосховище	Карачунівське водосховище	Інгулець (с. Новоселівка)	р. Саксагань (гирло)
рН	7,64-8,35	8,20-8,57	7,99-8,50	6,61-7,56
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	4,5-5,3	9,7-12,2	18,0-26,0	11,2-17,8
Сухий залишок, мг/дм ³	206-479	1 030-1 331	2 442-3 358	1 516-2 377
Cl ⁻ , мг/дм ³	34,0-68,0	120,0-143,0	760,0-1 070,0	201,0-400,0
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	64,5-132,3	413,1-632,5	768,6-981,1	528,78-756,3
БСК ₂₀ , мг O ₂ /дм ³	0,31-5,0	1,8-7,1	1,3-9,1	3,84-7,5
ХСК, мг O ₂ /дм ³	14,7-19,2	12,3-21,6	13,2-19,8	18,0-20,4

басейну річок та низький потенціал розбавлення у літній період.

У досліджених пунктах спостереження показник БСК₂₀ варіював у межах 0,31-9,10 мг O₂/дм³. Найвищі значення зафіксовано в р. Інгулець (до 9,10 мг O₂/дм³) та р. Саксагань (гирло) – до 7,50 мг O₂/дм³, що відповідає перевищенню орієнтовного порогоу в 3,0 та 2,5 рази відповідно. У водосховищах максимуми становили 7,10 мг O₂/дм³ у Карачунівському (перевищення приблизно у 2,4 рази) та 5,00 мг O₂/дм³ у Південному (перевищення приблизно у 1,7 рази). Пікові значення БСК₂₀ у річкових точках спостереження вказують на помірне органічне навантаження і потребу в цільовому контролі його джерел.

У досліджених пунктах спостереження ХСК змінювався в межах 12,3-21,6 мг O₂/дм³, що загалом відповідає помірному органічному навантаженню. Водночас у більшості точок спостережень виявлено частковий перевищення орієнтовного нормативу (15 мг O₂/дм³): у Південному та Карачунівському водосховищах, а також у річках Інгулець та Саксагань максимальні значення становили 18-22 мг O₂/дм³, тобто приблизно на 20-45% вище за порогове.

У літній («стабілізаційний») період у басейні річок загалом фіксуються підвищені концентрації іонів: хлоридів – 137,4-980,9 мг/дм³, SO₄²⁻ – 493,0-784,0 мг/дм³. Верхні межі перевищують ГДК: для Cl⁻ – у 2,8 рази, для SO₄²⁻ – у 1,6 рази, що, можливо, відображає ефект обмеженого розбавлення у період маловоддя. У пониззі р. Інгулець зафіксовано мінімальні літні значення: хлориди – 27,0 мг/дм³, сульфати – 61,6 мг/дм³, що відповідає нормативним значенням. Натомість у р. Саксагань (літо) концентрації становили: Cl⁻ – 500 мг/дм³ і SO₄²⁻ – 991,8 мг/дм³; це перевищує відповідні ГДК у 1,4 та 2,0 рази, що вказує на локалізовані джерела надходжень і збільшений час водообміну.

У період регламентованого скидання шахтних вод у р. Інгулець (район с. Широке) зафіксовано вміст хлоридів на рівні 2500 мг/дм³ (перевищення ГДК у 7,1 рази), сульфатів – 741,8 мг/дм³ (перевищення ГДК у 1,5 рази), сухий залишок – 6000-8000 мг/дм³ (перевищення у 6-8 разів); аналогічні рівні сухого залишку спостерігалися в районах с. Латовка та с. Могилівка. Отримані значення є надзвичайно високими та підтверджують вагомий внесок високомінералізованих шахтних вод у водний баланс зазначеної ділянки.

У весняний період (ділянка Широке-Латовка-Могилівка) показник сухого залишку становив 1400-3000 мг/дм³, що перевищує нормативні рівні приблизно у 1,4-3,0 рази. Такі значення є суттєво нижчими порів-

няно з піками під час скидання, але усе ще не відповідають вимогам. Під час промивання прісною водою в р. Інгулець концентрації хлоридів становили 130-800 мг/дм³, сульфатів – 500-900 мг/дм³: спостерігається зниження та наближення до рівнів Карачунівського водосховища, однак верхні межі все ще перевищують нормативні значення – орієнтовно у 2,3 рази для хлоридів та у 1,8 рази для сульфатів.

На підставі даних державного моніторингу проаналізовано хімічний склад р. Інгулець і визначено фонові концентрації основних показників. Показники розчиненого кисню на всіх постах становили 8,48-10,51 мг О₂/дм³, що перевищує норматив 4 мг О₂/дм³; ознак кисневого дефіциту не виявлено. Локальні піки БСК₅ фіксувалися переважно на посту 3 (3,19-3,92 мг О₂/дм³), що свідчить про епізодичні надходження органічних речовин. Загалом кисневий режим відповідає гігієнічним вимогам, а органічне навантаження оцінюється як помірне.

Відмічено стійке перевищення ГДК за сульфатами на посту 1: 628-753 мг/дм³ (приблизно у 1,3-1,5 рази), на посту 4: 1 446-1 613 мг/дм³ (приблизно у 2,9-3,2 рази). Також зафіксовано значні перевищення вмісту хлоридів на посту 1: 1 263-2 659 мг/дм³ (пікові значення у 2022 р.), що становить приблизно у 3,6-7,6 рази вище за ГДК; на посту 4 концентрації хлоридів перевищували ГДК орієнтовно у 1,3-1,5 рази. Концентрації іонів NH₄⁺, NO₃⁻ та NO₂⁻ на всіх постах були суттєво нижчими за відповідні нормативи.

Таким чином, основним чинником невідповідності вимогам якості води є підвищена іонна мінералізація, насамперед за рахунок хлоридів та сульфатів у пунктах спостереження 1 і 4. Це узгоджується з гідрохімічним профілем ділянки та свідчить про вплив високомінералізованих скидань (регламентованих відведень шахтних та кар'єрних вод) та фільтраційного притоку з техногенних ємностей. На цьому тлі показники кисневого режиму та органічного навантаження (БСК, ХСК) загалом відповідають помірному рівню, хоча фіксуються епізодичні піки, що потребує адресного контролю джерел.

Аналіз показників кисневого режиму та органічного навантаження р. Дніпро свідчить, що за 2020-2023 рр. концентрації розчиненого кисню на всіх постах становили 8,6-11,6 мг О₂/дм³, тобто суттєво вище за норматив 4 мг О₂/дм³. Ознак системного кисневого дефіциту не виявлено. Більшість значень БСК₅ визначалися в інтервалі 1,5-3,2 мг О₂/дм³, що відповідає низько-помірному органічному навантаженню.

Вивчення показників мінералізації показало, що концентрації сульфатів визначалися в діапазоні 33-63 мг/дм³; такі значення є суттєво нижчими за ГДК. Вміст хлоридів у більшості випадків становив – 22-52 мг/дм³, рідше – 76-304 мг/дм³; ці значення також не перевищують ГДК. Концентрації біогенних форм азоту – іонів амонію, нітратів та нітритів – відповідали гігієнічним нормативам на всіх постах спостереження.

Вміст завислих речовин у більшості випадків становив 5,0-9,7 мг/дм³; ознак системного зростання мутності не зафіксовано. Концентрації фосфат-іонів визначалися в межах 0,14-0,37 мг/дм³; спостерігалися поодинокі нижчі значення (0,10-0,20 мг/дм³) та разові підвищення (0,34-0,37 мг/дм³) на окремих постах.

Таким чином, за 2020-2023 рр. вода у р. Дніпро на розглянутих постах характеризується стабільним кисневим режимом та переважно помірним органічним навантаженням, низькими та помірними рівнями іонів мінералізації та низькими концентраціями азотних форм. Сукупно це вказує на відповідність більшості показників нормативним вимогам.

Висновки.

1. Отримані результати підтверджують виражену просторову мінливість показників якості вод у Криворізькому залізорудному регіоні, зумовлену впливом гірничодобувної діяльності. Найбільш контрастні зміни спостерігаються між водосховищами (переважно з низькою або помірною мінералізацією) та річковими ділянками Саксагані та Інгульця, де зафіксоване суттєве зростання загальної мінералізації, жорсткості та концентрацій основних іонів (насамперед Cl⁻ і SO₄²⁻).

2. Основним чинником невідповідності гігієнічним нормативам є підвищена іонна мінералізація, зокрема за рахунок іонів Cl⁻ та SO₄²⁻. Максимальні перевищення ГДК зафіксовано на ділянках р. Інгулець: для SO₄²⁻ – у 2-3 рази, для Cl⁻ – до 7,6 разів. Такі рівні, ймовірно, зумовлені впливом високомінералізованих шахтних і підземних вод, а також фільтраційними притоками з техногенних ємностей.

3. Показники БСК₂₀ і ХСК свідчать про помірне органічне навантаження: у річках Інгулець і Саксагань періодично спостерігаються локальні підвищення до 9,1 мг О₂/дм³ (БСК₂₀) та 21,6 мг О₂/дм³ (ХСК). Концентрації розчиненого кисню (8,48-10,51 мг О₂/дм³) у р. Інгулець стабільно перевищують норматив приблизно у 2,1-2,6 рази.

4. Для р. Дніпро (2020-2023 рр.) встановлено стабільний кисневий режим: розчинений кисень – 8,6-11,6 мг О₂/дм³. Рівні іонів мінералізації залишаються нижчими за ГДК: хлориди – не більше ніж 304 мг/дм³, сульфати – не більше ніж 63 мг/дм³. Показники БСК₅ та ХСК залишаються у межах 1,5-3,2 і 12-20 мг О₂/дм³ відповідно. На досліджених точках забору проб р. Дніпро не виявлено ознак значного антропогенного впливу за розглянутими показниками.

5. Основне навантаження на водні об'єкти басейну Інгульця формують високомінералізовані шахтні води, фільтраційні витоки з техногенних накопичувачів і обмежений потенціал розбавлення у літній період, що посилює концентраційні ефекти та зростання іонної мінералізації (насамперед за рахунок хлоридів і сульфатів).

6. Для поліпшення стану водних об'єктів доцільно реалізувати: модернізацію систем очищення й демінералізації шахтних вод; моніторинг іонів Cl⁻, SO₄²⁻, сухого залишку в межах басейну річок Інгульця та Саксагань; застосування регульованих режимів скидів; інтеграцію локальних результатів моніторингу у регіональні плани управління річковими басейнами (ПУРБ 2025-2030).

Перспективи подальших досліджень.

Доцільно продовжити моніторинг складу та властивостей води водних об'єктів м. Кривого Рогу у воєнний і післявоєнний періоди з метою аналітичного порівняння внеску промислового забруднення та впливів, зумовлених веденням бойових дій.

References / Література

- Marenkov OM, Kurchenko VO, Nesterenko OS. Assessment of the quality and ecological status of the Saksagan River in the context of drinking water and fishery purposes. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023;31(4):907-916. Available from: <http://chemistry.dnu.dp.ua/article/view/291632>.
- Kovrov O, Pavlychenko A, Kulikova D. Development of the wastewater treatment technology for the mine 'Ternivska' of the Kryvyi Rih iron ore plant. *Environ Technol*. 2025;46(6):908-921. DOI: [10.1080/09593330.2024.2371080](https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2371080).
- Sherstiuik NP, Khilchevskiyi VK, Zabokrytska MR. Environmental risk assessment of Kryvbas mine water discharges into the Inhulets River (2005–2021). Proceedings of the 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment; 2023 Nov 7-10. Kyiv. Kyiv: European Association of Geoscientists & Engineers; 2023. p. 1-5. DOI: [10.3997/2214-4609.2023520002](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520002).
- Kovalchuk VP, Nechai OM, Balykhina HA, Voitovykh OP. Estimation of water loss for total evaporation from the surface of ponds and reservoirs in the Ingulets River basin. *Land Reclamation and Water Management*. 2025;1:36-49.
- Shumilova O, Osadcha N, Oreshchenko A, Grossart HP. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025;387(6739):1181-1186. DOI: [10.1126/science.adn8655](https://doi.org/10.1126/science.adn8655).
- Jiang D, Khokhlov V, Tuchkovenko Y, Kushnir D, Ovcharuk V, Spyraeos E, et al. Biogeochemical response of the north-western Black Sea after the Kakhovka collapse. *Commun Earth Environ*. 2025;6:185. Available from: <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02153-z>.
- World Bank. Renewable internal freshwater resources per capita (ER.H2O.INTR.PC). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2024. Available from: <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC>.
- Our World in Data. Per-capita renewable freshwater resources (WDI/AQUASTAT). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2025. Available from: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-renewable-freshwater-resources>.
- European Environment Agency (EEA). Europe's State of Water 2024. Copenhagen: EEA; 2024. Available from: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-state-of-water-2024>.
- Ecologic Institute. Europe's State of Water 2024: The need for improved water resilience. Berlin: Ecologic Institute; 2024. Available from: <https://www.ecologic.eu/19853>.
- Northern Ireland Audit Office. Water Quality in Northern Ireland's Rivers and Lakes. Belfast: Northern Ireland Audit Office; 2024. 66 p. Available from: https://www.niauditoffice.gov.uk/files/niauditoffice/documents/2024-03/00311423%20-%20NIA9797%20-%20Water%20Quality%20Report_%28WEB%29_V2.pdf.
- ICPDR. Ukraine adopts nine River Basin Management Plans (2025–2030). Vienna: ICPDR; 2025. Available from: <https://www.icpdr.org/>.
- Kabinet Ministriv Ukrainy. Rozporyadzhennya KMU № 1077-r Pro zatverdzhennya planiv upravlinnya rikhkovyymi baseynamy Dnipra ta Donu na 2025–2030 roky. Kyiv: KMU; 2024. Dostupno: [in Ukrainian].
- Bryl A, Vasko P, Kromplyas B. Main trends and indicators of the industrial implementation of water desalination technologies (according to the materials of the scientific and practical conference Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century 2024. Kyiv. Ukraine). *Vidnovlyvana Energetyka*. 2024;4(79):89-103. DOI: [10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).89-103](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).89-103). Available from: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/491>.
- Kovrov OS, Kulikova DV. Ukraine's Capacity to Implement the Sustainable Development Program in the Context of Full-Scale Armed Aggression. Vol. 2. Riga: Publishing House "Baltija Publishing"; 2025. Chapter, Justification of zero-liquid-discharge technologies for desalination of highly mineralized wastewater at Kryvyi Rih iron ore basin (Ukraine); p. 464-486. DOI: [10.30525/978-9934-26-570-9-41](https://doi.org/10.30525/978-9934-26-570-9-41).
- Kabinet Ministriv Ukrainy. Rozporyadzhennya № 42-r Pro skydannya nadlyshkiv zvorotnykh vod u r. Inhulets u mizhvehetatsiynnyy period 2023–2024 rokov. Kyiv: KMU; 2024. Dostupno: <https://zakon.rada.gov.ua/go/42-2024-%D1%80>. [in Ukrainian].
- Kabinet Ministriv Ukrainy. Rozporyadzhennya № 1179-r Pro zatverdzhennya obsyahiv skydiv zvorotnykh vod hirnychodobuvnykh pidpryemstv Kryvorizkoho zalizorudnogo baseynu u 2024 rotsi. Kyiv: KMU; 2025. Dostupno: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1179-2025-%D1%80>. [in Ukrainian].
- EUWI+ Result 2. Investigative Monitoring of the Dnieper River Basin: Pollutants Screening. Vienna: EU Member State Consortium; 2021. Available from: https://euneighbourseast.eu/wp-content/uploads/2021/07/ua_dnieper_river_basin_screeningfinalreport-eng.pdf.
- Barlow PM, Leake SA. Streamflow depletion by wells—Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow. *USGS Circular 1376*. Reston (VA): U.S. Geological Survey; 2012. 84 p. Available from: <https://pubs.usgs.gov/circ/1376>.
- Bazaluk O, Petlovanyi M, Sai K, Chebanov M, Lozynskiyi V. Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Front Environ Sci*. 2024;12:1480344. DOI: [10.3389/fenvs.2024.1480344](https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344).
- Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. Yedyny reyestr z OVD: sprava № 20214137683 — «Nove budivnytstvo khvostokhovyscha "III karta" PAT "ArselorMittal Kryvyi Rih"» (Povidomlennya 16.04.2021; Zvit 07.07.2021) Kyiv: Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy; 2021. Dostupno: <https://eia.menr.gov.ua/>. [in Ukrainian].
- Mosai AK, Ndllovu G, Tutu H. Improving acid mine drainage treatment by combining treatment technologies: A review. *Sci Total Environ*. 2024;919:170806. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.170806](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170806).
- Wang Y, Cao J, Biswas A, Fang W, Chen L. Acid mine wastewater treatment: A scientometrics review. *J Water Process Eng*. 2024;57:104713. DOI: [10.1016/j.jwpe.2023.104713](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104713).
- Institut telekomunikatsiy i hlobalnogo informatsiynoho prostoru NAN Ukrainy. Doslidzhennya ekolohichnogo stanu terytoriy u fazi postmayninhu: teoriya, metodolohiya, keysy. Kyiv: Institut telekomunikatsiy i hlobalnogo informatsiynoho prostoru NAN Ukrainy; 2021. 196 s. Dostupno: <https://itgip.org/>. [in Ukrainian].
- Kovalchuk PI, Sakhnenko VO, Sorokina OV. Balance method of integrated management of wastewater discharge by volume and mineralization of mine water in the Inhulets River basin. *Melioration and Water Management*. 2021;(1):23-32. DOI: [10.31073/mivg202101-274](https://doi.org/10.31073/mivg202101-274).
- Beliakhevych IL. Hidroekolohichnyy analiz vplyvu diyalnosti hirnycho-zbahachuvalnykh pidpryemstv Kirovohradskoyi oblasti na baseyn rikhky Inhulets [dysertatsiia]. Bila Tserkva: Bila Tserkva National Agrarian University; 2023. 72 s. Dostupno: <https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/12635/1/Белякевич%20.pdf>. [in Ukrainian].
- U.S. Environmental Protection Agency. National recommended water quality criteria – Aquatic life criteria table. Washington (DC): US EPA; 2025. Available from: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table>.
- U.S. Environmental Protection Agency. Ambient water quality criteria for chloride – 1988. EPA 440/5-88-001. Washington (DC): US EPA; 1988. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-08/documents/chloride-aquatic-life-criteria-1988.pdf>.
- Harvey JW, Conaway CH, Dornblaser MM, Gellis AC, Stewart AR, Green CT, editors. Knowledge gaps and opportunities in water-quality drivers of aquatic ecosystem health. U.S. Geological Survey Open-File Report 2023-1085. Reston (VA): USGS; 2024. 72 p. DOI: [10.3133/ofr20231085](https://doi.org/10.3133/ofr20231085).
- Ministerstvo okhorony zdorovya Ukrainy. Nakaz № 721 Pro zatverdzhennya Hihiyenichnykh normatyviv yakosti vody vodnykh ob'yektiv dlya zadovoleniya pytnykh, hospodarsko-pobutovykh ta inshykh potreb naselennya. Kyiv: MOZ Ukrainy; 2022. Dostupno: [in Ukrainian].

ЕКОЛОГІЧНІ ТА ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВОДИ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО БАСЕЙНУ

Орехова О. В., Харламова А. В., Павліченко О. Ф.

Резюме. Якість поверхневих вод Криворізького залізорудного басейну зазнає тривалого техногенного впливу, зумовленого скиданням високомінералізованих шахтних і кар'єрних вод та фільтраційними витока-

ми з техногенних ємностей. Ці процеси спричиняють зростання мінералізації, жорсткості та концентрацій хлоридів і сульфатів у водоймах річок Інгулець і Саксагань та прилеглих водосховищах. Додаткові ризики посилюються наслідками воєнних подій та гідрологічними змінами у басейні Дніпра.

Мета – комплексна оцінка хімічного складу та екологічного стану поверхневих вод Криворізького залізрудного басейну на прикладі річок Інгулець, Саксагань, Дніпро та водосховищ м. Кривого Рогу з урахуванням територіально-сезонних відмінностей показників мінералізації, жорсткості, іонного складу та органічного навантаження.

Використано дані державного моніторингу Державного агентства водних ресурсів України (2020-2023 рр.) та протоколи виробничих лабораторій (2000-2023 рр.). Проаналізовано: водневий показник рН, загальну жорсткість, сухий залишок, хлориди (Cl^-), сульфати (SO_4^{2-}), показники органічного забруднення (BCK_5 , BCK_{20} , ХСК), розчинений кисень, завислі речовини, біогенні форми азоту (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) та фосфат-іони. Порівняння виконано відповідно до гігієнічних чинних нормативів (Наказ МОЗ України № 721 (2022)). Статистична обробка включала описову статистику та порівняння між пунктами відбору і сезонами.

Встановлено значну хімічну неоднорідність складу поверхневих вод: відносно низьку мінералізацію у водосховищах та високі концентрації іонів у р. Інгулець (сухий залишок 2442-3358 мг/дм³; Cl^- – 760-1070 мг/дм³; SO_4^{2-} – 769-981 мг/дм³). У період регламентованих скидів концентрації Cl^- та SO_4^{2-} зростають до 3-7 разів вище за ГДК. Показники BCK_{20} та ХСК відповідають помірному органічному навантаженню при стабільно високому рівні розчиненого кисню (8,5-10,5 мг O_2 /дм³). Для р. Дніпро зафіксовано низькі рівні мінералізації та відсутність ознак значущого антропогенного впливу за розглянутими показниками.

Основним чинником погіршення якості вод є підвищена іонна мінералізація у річках Інгулець і Саксагань, зумовлена надходженням шахтних вод і низьким потенціалом розбавлення в літній період. Стан р. Дніпро залишається стабільним. Для покращення якості води доцільні модернізація систем очищення та демінералізації шахтних вод і посилення цільового моніторингу іонного складу.

Ключові слова: шахтні води, природні водойми, хімічний склад води, техногенний вплив, екологічний моніторинг.

ENVIRONMENTAL AND CHEMICAL FEATURES OF WATER IN NATURAL WATER BODIES OF THE KRYVYI RIH IRON ORE BASIN

Oriekhova O. V., Kharlamova A. V., Pavlichenko O. F.

Abstract. The quality of surface waters in Kryvyi Rih iron ore basin has been impacted by long-lasting anthropogenic effects caused by the discharge of highly mineralised mine and quarry waters and filtering leaks from industrial reservoirs. These processes are leading to increased mineralisation, hardness and chloride and sulphate concentrations in the Inhulets and Saksahan rivers and surrounding reservoirs. The additional risks are enhanced by the military conflict and hydrological changes within the Dnipro River basin.

Aim is to provide a comprehensive assessment of the chemical composition and environmental state of the Kryvyi Rih iron ore basin's surface waters, specifically the Inhulets, Saksahan and Dnipro rivers and the reservoirs in Kryvyi Rih, considering the regional and seasonal differences in mineralisation, hardness, ionic composition and organic load indicators.

Data from the State Agency of Water Resources of Ukraine for 2020-2023, as well as agency protocols from the industrial laboratories (2000-2023), have been used. The following indicators have been analyzed: acid-alkaline status (pH), total hardness, dry residue, chlorides (Cl^-), sulphates (SO_4^{2-}), organic pollution indicators (BOD_5 , BOD_{20} , COD), dissolved oxygen, suspended solids, biogenic forms of nitrogen (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) and phosphate ions. The comparison was made in accordance with current hygiene standards (Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 721 (2022)). Statistical processing included descriptive statistics and comparisons between sampling locations and seasons.

Significant chemical variability in the composition of surface waters was observed: relatively low mineralisation of reservoirs and high concentrations of ions in the Inhulets River (dry residue 2442-3358 mg/dm³; Cl^- – 760-1070 mg/dm³; SO_4^{2-} – 769-981 mg/dm³). During the period of regulated discharges, the concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} increase 3-7 times above the Maximum Permissible Concentration (MPC). The BOD_{20} and COD values indicate a moderate organic loading while the level of dissolved oxygen remains consistently high (8.5-10.5 mg O_2 /dm³). The Dnipro River has low mineralisation and no significant anthropogenic impact.

The primary factor contributing water quality degradation is the elevated ionic mineralization in the Inhulets and Saksahan rivers, driven by mine water discharge and the low dilution potential during the summer period. The condition of the Dnipro River remains stable. Improving water quality requires modernization of mine-water treatment systems and strengthened of monitoring of ionic composition.

Key words: mine water, natural water bodies, water chemical composition, anthropogenic impact, environmental monitoring.

ORCID and contributionship / ORCID кожного автора та його внесок до статті:

Oriekhova O. V.: <https://orcid.org/0000-0003-2068-7869>^{ABCF}

Kharlamova A. V.: <https://orcid.org/0009-0007-8721-638X>^{BDE}

Pavlichenko O. F.: <https://orcid.org/0009-0000-8383-1157>^{BD}

Conflict of interest / Конфлікт інтересів:

The authors declare no conflict of interest / Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Corresponding author / Адреса для кореспонденції

Oriekhova Oksana Viktorivna / Орехова Оксана Вікторівна

Separate Division "Scientific and Practical Medical Center of Occupational Health of the Shupyk National Healthcare University of Ukraine" / Відокремлений підрозділ «Науково-практичний медичний центр професійного здоров'я НУОЗ України імені П. Л. Шупика»

Ukraine, 50096, Кривий Ріг, 40 Vynohradova str. / Адреса: Україна, 50096, м. Кривий Ріг, вул. Виноградова 40

Tel.: 0671605307 / Тел.: 0671605307

E-mail: orehovaoksana@ukr.net

A – Work concept and design, **B** – Data collection and analysis, **C** – Responsibility for statistical analysis, **D** – Writing the article, **E** – Critical review, **F** – Final approval of the article / **A** – концепція роботи та дизайн, **B** – збір та аналіз даних, **C** – відповідальність за статичний аналіз, **D** – написання статті, **E** – критичний огляд, **F** – остаточне затвердження статті.

Received 29.07.2025 / Стаття надійшла 29.07.2025 року
Accepted 12.11.2025 / Стаття прийнята до друку 12.11.2025 року