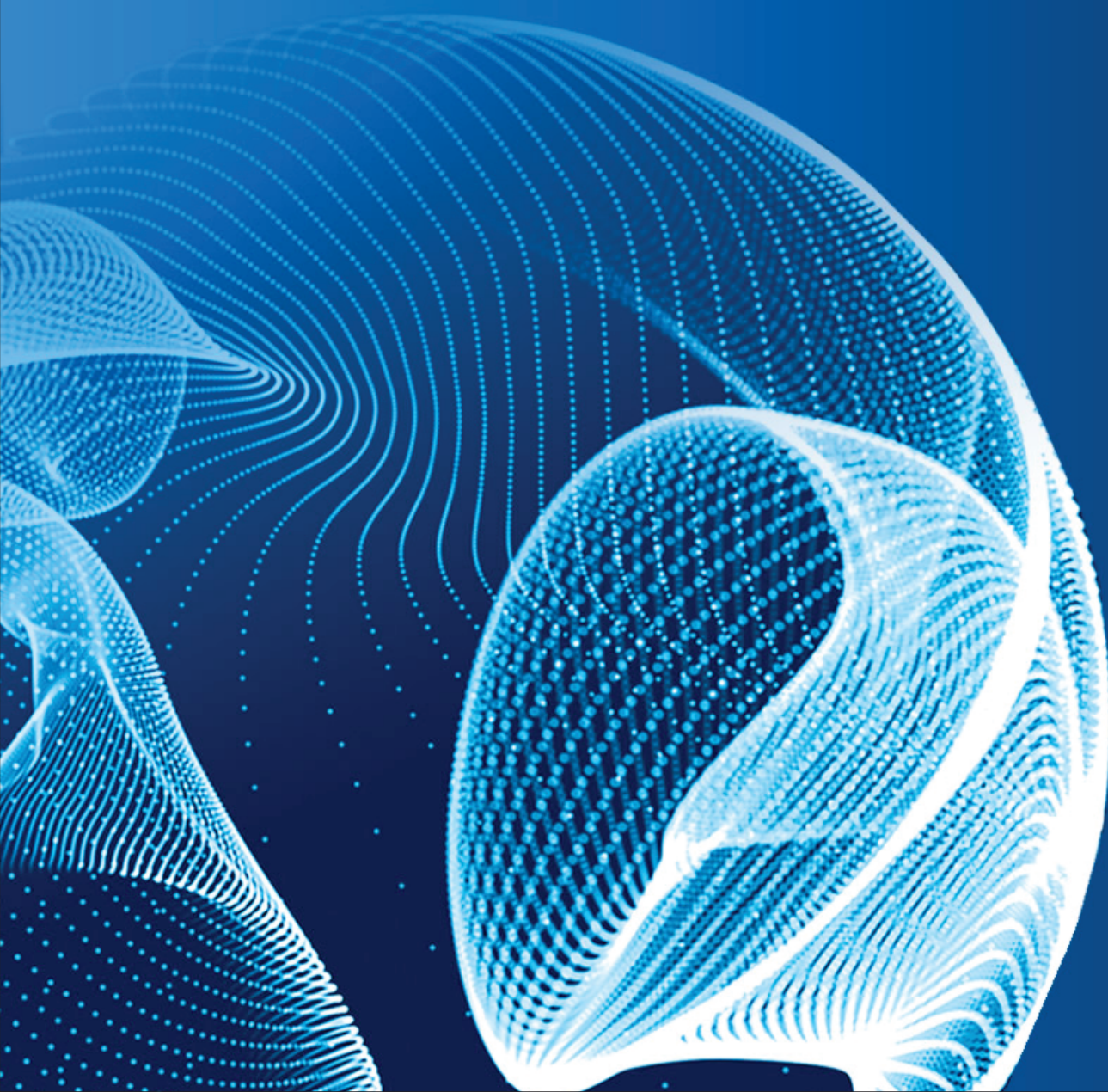


ENGINEERING JOURNAL of Satbayev University

Volume 146 (Issue 4)
August 2024



EDITOR-IN-CHIEF

Alma Bekbotayeva, PhD, associate professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Kanai Rysbekov, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Vasyl Lozinskyi, PhD, associate professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

MANAGING EDITOR

Gulziya Burshukova, PhD, associate professor, Satbayev University, Kazakhstan

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Ata Utku Akçil, PhD, professor, Suleyman Demirel University, Turkey

Adilkhan Baibatsha, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Atac Bascetin, PhD, professor, Istanbul Technical University, Turkey

Madina Barmenshinova, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Omirsirik Baigenzhanov, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Tatiana Chepushtanova, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, habilit.doctor, professor, Adam Mickiewicz University, Poland

Serik Moldabaev, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Brajendra Mishra, PhD, professor, Worcester Polytechnic Institute, USA

Suping Peng, professor, academician, Chinese Mining University, China

Reimar Seltsmann, PhD, professor, The Earth Sciences Department, Center for Russian and Central Asian Mineral Research (CERCAMS), Great Britain

Atsushi Shibayama, PhD, professor, Akita University, Japan

Olena Sdvizhkova, doctor of technical sciences, professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

Khalidilla Yusupov, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЛАРЫ

Қанай Рысбеков, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Василий Лозинский, PhD, қауымдастырылған профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

ЖАУАПТЫ ХАТШЫ

Гулзия Буршукова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Қазақстан

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА МҮШЕЛЕРІ

Ata Utku Akçil, PhD, профессор, Сүлейман Демирел Университеті, Түркия

Әділхан Байбатша, г-м.ғ.д., профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Ыстамбұл техникалық университеті, Түркия

Мадина Барменшинова, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Өмірсерік Байгенженов, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Адам Мицкевич Университеті, Польша

Серік Молдабаев, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустер политехникалық институты, АҚШ

Suping Peng, профессор, академик, Қытай тау-кен университеті, ҚХР

Reimar Selmann, PhD, профессор, Жер туралы ғылымдар бөлімі, Ресей және Орта Азия минералды зерттеулер орталығы (CERCAMS), Ұлыбритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Жапония

Олена Сдвижкова, т.ғ.д., профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

Халидилла Юсупов, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

ГЛАВНЫЙ НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, ассоц.профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Канай Рысбеков, к.т.н., ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Василий Лозинский, PhD, ассоц.профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Гулзия Буршукова, PhD, ассоц.профессор, Satbayev University, Казахстан

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Ata Utku Akçil, PhD, профессор, Университет Сулеймана Демиреля, Турция

Адилхан Байбатша, д.г-м.н., профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Стамбульский технический университет, Турция

Мадина Барменшинова, к.т.н., Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Омирсерик Байгенженов, PhD, ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Университет Адама Мицкевича, Польша

Серик Молдабаев, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустерский политехнический институт, США

Suping Peng, профессор, академик, Китайский горнопромышленный университет, КНР

Reimar Seltsmann, PhD, профессор, Отдел Наук о Земле, Центр Российских и Среднеазиатских Минеральных Исследований (CERCAMS), Великобритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Япония

Олена Сдвижкова, д.т.н., профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

Халидилла Юсупов, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

A mini review on key properties and requirements of vanadium electrolytes

I.O. Aimbetova¹, O.S. Baigenzhenov^{2*}, A.T. Dagubayeva³, A.V. Kuzmin⁴, M.T. Sarbayeva¹, D.K. Berdi¹

¹Akhmet Yassawi University, Turkestan, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

³National Center on complex processing of mineral raw materials, Almaty, Kazakhstan

⁴Institute for Engineering Thermal Physics, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: o.baigenzhenov@satbayev.university

Abstract. This article examines the key factors involved in the production of electrolytes for vanadium batteries. It delves into various important parameters, including the optimal concentration of vanadium in the electrolyte, the composition of the electrolyte itself, and the necessity of maintaining appropriate levels of ionic strength, viscosity, temperature, and electrical conductivity in the solution. Moreover, the article highlights the significance of preventing electrode wear and sediment formation, offering insights into different reagents used and their specific mechanisms of action. By providing such valuable information, this article emphasizes the utmost importance of manufacturing high-quality vanadium batteries and their essential electrolytes, especially considering the rapid advancements in this field. This comprehensive study sheds light on the crucial parameters that must be carefully considered during the production of electrolytes for vanadium batteries. It stresses the criticality of maintaining optimal concentrations, proper composition, and suitable levels of ionic strength, viscosity, temperature, and electrical conductivity. It is also underscoring the need to prevent electrode wear and sediment formation. Generally speaking, this article serves as an invaluable resource in the production of top-notch vanadium batteries and their indispensable electrolytes in light of the rapid progress in this domain.

Keywords: vanadium batteries, electrolyte concentration, electrolyte viscosity, redox processes, electrodes.

1. Introduction

Vanadium batteries have gained significant attention in recent years as a promising energy storage solution for renewable energy sources [1-3]. The ability to store and release energy efficiently is crucial for the integration of intermittent renewable energy sources into the electricity grid. Vanadium batteries, particularly the vanadium redox flow batteries (VRFBs), have emerged as a viable option due to their scalable design, long cycle life, and high energy efficiency. Central to the functioning of these batteries is the electrolyte composition, which plays a crucial role in determining their performance and overall efficiency [4].

Research efforts have been focused on improving the composition of electrolytes to enhance the storage capacity, charging efficiency, and stability of vanadium batteries. Electrolytes are critical components as they enable the flow of ions between the positive and negative electrodes during the charge and discharge processes. The choice of electrolyte composition affects the battery's performance, energy density, and overall efficiency. Thus, understanding and improving the electrolyte composition is of paramount importance for the development of more efficient vanadium batteries.

Several studies have investigated the effects of different electrolytes on the performance of vanadium batteries. For instance, Puleston et al. [5] conducted a comprehensive review of the electrolyte compositions used in VRFBs and highlighted the significance of optimizing the concentration

and composition of vanadium species. They emphasized the need for developing high-performance electrolytes with improved stability and higher energy density. Despite the growing interest in vanadium batteries and their electrolytes, there are still gaps in our knowledge. One area that requires further research is the development of low-cost and sustainable electrolyte solutions for large-scale applications. Traditional VRFBs utilize expensive and environmentally hazardous vanadium salts as electrolytes. However, recent studies have explored alternative electrolytes, such as organic compounds and non-vanadium redox couples. These alternative electrolytes offer the possibility of reducing costs, enhancing sustainability, and expanding the range of applications for vanadium batteries [6].

The schematic structure of vanadium batteries (Figure 1), specifically vanadium redox flow batteries (VRFBs), consists of several key components that enable their operation. These components include the electrolyte tanks, the stack of electrochemical cells, the flow loop, and the power management system. Understanding the principle of operation of VRFBs is crucial for comprehending their potential in energy storage applications.

At the heart of VRFBs are two separate electrolyte tanks, typically referred to as the positive electrolyte tank and the negative electrolyte tank. These tanks contain vanadium-based electrolyte solutions with different redox states. The positive electrolyte tank houses the positive electrolyte solu-

tion with vanadium ions in the +5 oxidation state (V^{5+}), while the negative electrolyte tank contains the negative electrolyte solution with vanadium ions in the (+2) oxidation state (V^{2+}). The distinction in redox states of the electrolytes is one of the distinguishing features of VRFBs [1,7].

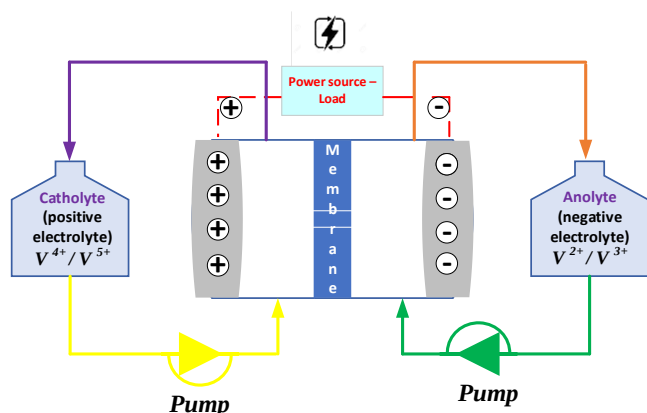
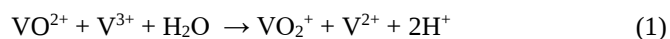


Figure 1. Schematic representation of vanadium batteries - redrawn from [1]

The electrochemical cells of a VRFB stack are the main units responsible for converting chemical energy to electrical energy and vice versa. Each cell consists of a positive and a negative electrode, separated by a membrane. The electrodes are typically made of carbon-based materials that provide a large surface area for the exchange of ions. The membrane, often made of an ion-conducting polymer, allows the selective passage of vanadium ions while preventing the crossover of other species [8].

During the charge process, the electrolytes flow through the stack of electrochemical cells in a continuous manner. The negatively charged vanadium ions (V^{2+}) from the negative electrolyte solution are oxidized at the positive electrode, releasing electrons and transforming into positively charged vanadium ions (V^{3+}). These electrons flow through the external circuit, providing electrical energy. Meanwhile, the positively charged vanadium ions (V^{5+}) in the positive electrolyte solution are reduced at the negative electrode, accepting the electrons and transforming into negatively charged vanadium ions (V^{4+}). Conversely, during the discharge process, the flow of electrolytes through the electrochemical cells is reversed. The negatively charged vanadium ions (V^{4+}) from the positive electrolyte solution are oxidized at the negative electrode, releasing electrons and transforming into positively charged vanadium ions (V^{5+}). These electrons again flow through the external circuit to provide electrical energy. Meanwhile, the positively charged vanadium ions (V^{3+}) in the negative electrolyte solution are reduced at the positive electrode, accepting the electrons and transforming into negatively charged vanadium ions (V^{2+}). The overall reaction can be represented as follow:



As the electrolytes flow through the cell stack, the vanadium ions undergo continuous oxidation and reduction reactions, enabling the storage and release of electrical energy. The flow loop, consisting of pumps and pipes, facilitates the circulation of the electrolytes between the electrolyte tanks and the stack of electrochemical cells. This flow-based design allows for flexible scalability and long cycle life [9].

The power management system of VRFBs controls the charging and discharging processes, ensuring efficient operation and preventing overcharging or overdischarging. It monitors and adjusts the flow rates of the electrolytes based on energy demand and manages the potential imbalances between the positive and negative electrolyte solutions.

2. Materials and methods

2.1. The essential requirements for the concentration of vanadium electrolyte in the usage of vanadium batteries

Figure 2 illustrates the increasing research efforts aimed at addressing the challenges associated with the concentration of vanadium electrolyte in vanadium batteries. These batteries are gaining popularity in various industries due to their high energy density and long service life. However, the strict requirements for the concentration of vanadium electrolyte pose a significant obstacle to their widespread use. Improving the conditions and properties of the electrolyte in vanadium batteries is crucial for further enhancing their existing advantages. Therefore, research work in this area is on the rise, with the aim of overcoming the problems and limitations associated with vanadium batteries and their electrolytes.

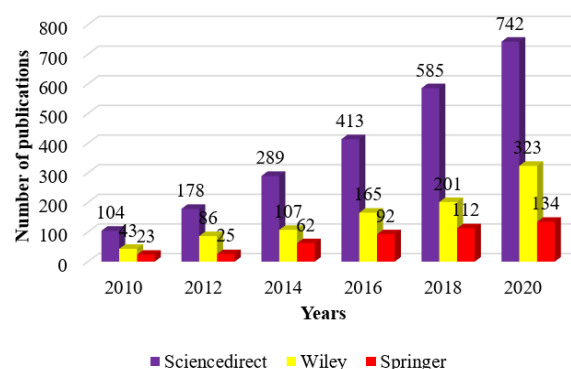


Figure 2. Scientific publications published from 2010 until mid-2020 on vanadium batteries - redrawn from [10]

Extensive research has established that the optimal concentration of vanadium in the electrolyte falls within the range of 1.5 to 2.0 m (molarity) [11,12]. Within this range, vanadium batteries exhibit the most favorable combination of energy density, specific power, and service life.

However, issues may arise if the concentration of vanadium electrolyte exceeds the recommended range. Primarily, a higher concentration elevates the viscosity of the electrolyte, impeding the movement of vanadium ions within the battery. This results in increased internal resistance and reduced overall efficiency. Moreover, utilizing a highly viscous solution necessitates additional operational requirements, consequently raising the costs associated with vanadium battery applications. Another drawback of excessive vanadium concentration in the solution is the formation of solid sludge or sediment-like precipitates within the battery. The formation of such a precipitate creates blockages in the flow channels within the battery, hindering the movement of vanadium ions. As a consequence, the battery's efficiency may decrease, and the functioning of the operational systems can be compromised [13].

Optimal performance of the battery necessitates maintaining the concentration of vanadium electrolyte within the recommended range. Insufficient concentration results in diminished energy density and restricts the battery's energy storage capacity. Additionally, a low vanadium concentration can result in decreased voltage, rendering the battery unsuitable for high-power applications. Insufficient electrolyte concentration also elevates the self-discharge rate of the battery, reducing its ability to retain stored energy over an extended period.

To emphasize the significance of maintaining the optimal concentration of vanadium electrolyte, let us consider an example. Suppose the concentration of vanadium in the battery electrolyte exceeds the recommended range. As a result of increased viscosity, the internal resistance of the battery rises, causing substantial energy losses during charge and discharge cycles. This decrease in overall efficiency leads to reduced operating time and diminished energy production. Furthermore, the elevated concentration can result in the formation of a precipitate within the battery, obstructing the movement of vanadium ions and clogging the flow channels. These negative effects significantly curtail the energy capacity of the battery, consequently shortening its lifespan [14].

Conversely, if the concentration of vanadium electrolyte falls below the specified effective range, the energy storage capacity of the battery will be diminished. Deviations in the vanadium electrolyte concentration from the recommended range can give rise to various issues, including increased electrolyte viscosity, sediment formation at the bottom of the battery, and decreased specific energy and power. Therefore, meticulous attention must be given to maintaining the appropriate concentration of vanadium electrolyte to ensure the efficiency and optimal functioning of batteries utilizing vanadium electrolytes.

2.2. The fundamental operational principle of vanadium batteries

Vanadium batteries consist of two cells: one with a low oxidation state electrolyte containing vanadium ions (V^{2+} and V^{3+}), and the other with a high oxidation state electrolyte containing vanadium ions (V^{4+} and V^{5+}). Maintaining the correct balance of these oxidation states is crucial for the long-term lifespan and overall efficiency of the battery.

The electrical energy in vanadium batteries is stored as chemical potential energy through reversible redox reactions at the positive and negative electrodes. During charging, electrons from an external power source convert V^{2+} ions in the negative electrolyte to V^{3+} ions, and V^{5+} ions in the positive electrolyte to V^{4+} ions. During discharge, these redox reactions are reversed, converting V^{3+} ions back to V^{2+} ions in the negative electrolyte and V^{4+} ions back to V^{5+} ions in the positive electrolyte. The ability of vanadium batteries to store and deliver electricity depends on redox reactions involving vanadium ions of different oxidation states. Therefore, maintaining the balance of these reactions is vital for the overall performance and cost-effectiveness of these batteries. Imbalances in the oxidation state balance can lead to capacity loss, reduced efficiency, and battery failure [15].

One of the key factors affecting the balance of oxidation states is the transfer of vanadium ions between the positive and negative electrolytes. This transfer occurs through an ion-selective membrane during a transition period. However, the use of low-quality diaphragm materials can disrupt the

oxidation state balance and decrease performance. This chaotic migration of vanadium ions between electrolytes is termed cross-movement. To address this issue, research is focused on using highly selective ion-selective membranes, such as Naphion, that prevent the chaotic mixing of vanadium ions by selectively transporting protons.

Another research [16] focus is optimizing the composition and concentration of electrolyte solutions to maintain the balance of vanadium ion oxidation states. Various additives can be incorporated to improve the selectivity of ion-selective membranes and reduce the negative mutual effects of vanadium ions. The design and configuration of vanadium batteries also play a role in oxidation state balance. Factors like electrode area, geometry, and electrolyte flow rate influence redox reactions and vanadium ion migration. Thus, correctly shaping the electrodes and controlling electrolyte flow aid in maintaining the proper distribution of vanadium ions in the solution. Other factors such as temperature, pH, and electrolyte composition can also impact redox reactions and vanadium ion migration. Therefore, managing and optimizing these operational parameters are crucial for achieving optimal battery performance.

Furthermore, the use of advanced materials and technologies can enhance battery efficiency and performance. Researchers are exploring the utilization of various electrode materials, such as carbon-based materials and metal oxides, to improve redox reactions and increase energy density. Additionally, the development of new ion-selective membranes with enhanced selectivity and stability can further enhance electrolyte balance and overall battery performance.

3. Results and discussion

3.1. Effect of ionic strength

The ionic strength is a critical factor in the utilization of vanadium redox batteries, directly impacting their efficiency and performance. It plays a vital role in determining the overall effectiveness of these batteries.

Firstly, the ionic strength significantly influences the conductivity of the electrolyte solution. Higher ionic strength results in increased conductivity, enhancing the overall efficiency of the battery. This improved conductivity facilitates faster transport of ions between the electrodes, reducing internal resistance and voltage losses. Additionally, higher ionic strength enhances the solubility of vanadium ions, which is crucial for maintaining the power and energy density of the battery. Insufficient solubility can lead to the formation of deposits on the electrodes, compromising the performance and overall integrity of the battery. Furthermore, the electrochemical reactions occurring at the electrodes are also impacted by the ionic strength. The speed of redox reactions involving vanadium ions is directly related to the ionic strength of the electrolyte. High ionic strength promotes faster charging rates for the battery. However, it is important to note that excessively high ionic strength can have detrimental effects on battery performance [17].

Elevated ionic strength can increase viscosity and reduce ion movement (diffusivity), ultimately slowing down the kinetics of redox reactions. Therefore, ongoing research is focused on finding the optimal balance of ionic strength that maximizes battery performance without compromising its overall efficiency.

3.2 Effect of conductivity of the electrolyte

Ionic conductivity refers to the capacity of an electrolyte to facilitate the flow of electric current via ion movement. In the case of vanadium batteries, the electrolyte solution comprises vanadium ions in different oxidation states (V^{2+}/V^{3+} and V^{4+}/V^{5+}). To ensure optimal conductivity, a strong acid, typically sulfuric acid, is commonly employed. As the movement of vanadium ions within the electrolyte greatly impacts the power output, efficiency, and overall performance of the battery, it is a crucial factor in the functionality of vanadium batteries [7].

The pace at which vanadium ions move through the electrolyte solution hinges on the ionic conductivity of the electrolyte. Higher conductivity translates into swifter ion mobility, resulting in amplified power generation and efficiency for vanadium batteries. Numerous elements influence conductivity, including the concentration of vanadium ions, temperature, electrolyte viscosity, and the presence of impurities in the electrolyte solution [1,18].

3.3 Effect of vanadium concentration

Raising the concentration of vanadium ions enhances ionic conductivity by providing additional ions for the conduction of electric current. However, exceedingly high concentrations can result in heightened viscosity, which inhibits the movement of ions and leads to a decline in ionic conductivity. The figure 3 clearly demonstrates a strong correlation between the concentration of vanadium in solution and its electrical conductivity.

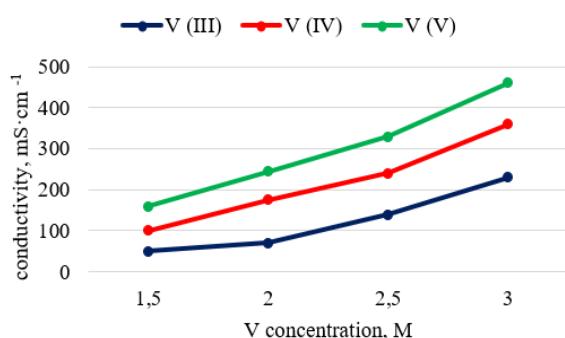


Figure 3. Conductivity due to different oxidation states of vanadium at 20 °C [19]

This relationship is supported by scientific evidence and can be explained by the oxidation states of vanadium. When comparing different degrees of oxidation of vanadium, it becomes evident that a higher degree of oxidation is associated with a higher electrical conductivity. This can be attributed to the alteration in electronic structure and charge distribution within the vanadium ions as they undergo oxidation. As the oxidation state of vanadium increases, so does the number of available valence electrons, enabling a higher mobility of charge carriers within the electrolyte. A concrete example of this phenomenon is observed when comparing vanadium electrolytes with different concentrations of vanadium ions. A higher concentration of vanadium ions results in a larger number of vanadium atoms available for oxidation and consequent increase in electrical conductivity. This can be visually represented in the figure, where higher concentrations are clearly associated with higher electrical conductivity values.

3.4 Effect of temperature

Temperature is a crucial factor in influencing electrolyte conductivity. Elevated temperatures generally enhance ion mobility, thereby increasing ionic conductivity. This occurs because higher temperatures provide the ions with greater kinetic energy to overcome electrostatic forces, allowing them to move more freely. However, excessive temperatures can lead to thermal degradation of the electrolyte and a subsequent decrease in battery performance (Table 1).

Table 1. The effect of electrolyte temperature on voltage efficiency and electrical conductivity [20]

№	Temperature, °C	Voltage efficiency, (%)	Conductivity, mS·cm ⁻¹
1	15	86,5	430
2	25	87,6	480
3	35	88,4	525
4	45	89,2	560
5	55	90,5	620

The rise in temperature induces an increase in kinetic energy, causing the movement of charged particles within the electrolyte to accelerate. This accelerated motion leads to more collisions between the charge carriers, resulting in enhanced ion mobility and increased electrical conductivity. The relationship between temperature and electrical conductivity can be mathematically described by the Arrhenius equation. According to this equation, the electrical conductivity (σ) of the electrolyte increases exponentially with increasing temperature (T), following the equation:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(E_a/RT) \quad (2)$$

Where σ_0 - represents the pre-exponential factor, E_a - the activation energy barrier, R - is the ideal gas constant, T - represents the absolute temperature.

From this equation, it is evident that an increase in temperature leads to a higher value for σ . The improved electrical conductivity at higher temperatures has several benefits for vanadium batteries. Firstly, it results in reduced internal resistance, allowing for more efficient charge transfer between the vanadium ions during the redox reactions. This increased efficiency translates into higher energy conversion and storage capabilities. Additionally, the enhanced electrical conductivity promotes better electrochemical kinetics and higher power output, making vanadium batteries more suitable for demanding applications that require rapid energy transfer.

However, it is important to note that excessively high temperatures can have detrimental effects on the overall performance and lifespan of vanadium batteries. Extreme temperatures can cause accelerated degradation of the electrolyte and electrode materials, leading to reduced capacity and decreased cycle life.

3.5 Effect of viscosity

Viscosity is a significant factor influencing the ionic conductivity of electrolytes. It refers to the internal resistance of a liquid. An increase in the viscosity of the electrolyte results in greater resistance for ions to move through the solution, leading to a decrease in ionic conductivity. Thus, maintaining an optimal range of viscosity is crucial to ensure adequate ion transport and efficient operation of vanadium batteries [20,21].

The presence of impurities in the electrolyte can also impact ionic conductivity. However, certain additives can increase ionic conductivity by enhancing the solubility and mobility of vanadium ions. These additives may include organic compounds, surfactants, or salts that can modify the properties of the electrolyte and enhance its ionic conductivity. In recent years, researchers have been exploring various methods and materials to enhance the ionic conductivity of electrolytes in vanadium batteries. Through their work, new electrolyte compositions have been developed that exhibit low viscosity and high ionic conductivity, without compromising the essential properties required for battery operation. For instance, researchers have investigated the addition of phosphoric acid and acetic acid to electrolytes, which has been found to increase their ionic conductivity and improve overall battery performance [22]. In addition to acid concentration, the vanadium content in the solution can also influence the viscosity of the electrolyte. For instance, as mentioned in article [23], the authors assert that an increase in vanadium concentration leads to a corresponding rise in the electrolyte's viscosity (Figure 4).

Overall, research efforts are focused on optimizing the composition and properties of electrolytes to enhance the ionic conductivity and efficiency of vanadium batteries.

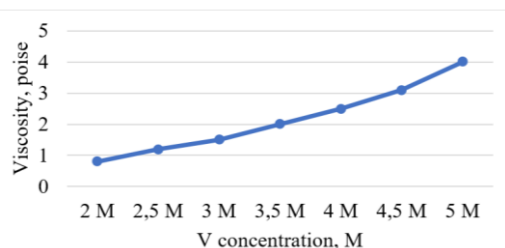


Figure 4. The effect of vanadium concentration on the electrolyte viscosity [23]

One area of research with promising results focuses on the development of ion-permeable membranes for use in vanadium batteries. These membranes are designed to separate the positive and negative electrolyte solutions, enabling the movement of vanadium ions. Researchers [24] are working to optimize the properties of these membranes, such as porosity, thickness, and chemical composition, in order to increase the ionic conductivity and improve the overall efficiency of vanadium batteries.

Another study has found that the incorporation of nanomaterials in vanadium batteries can enhance the ionic conductivity of the electrolytes. Nanomaterials such as carbon nanotubes, graphene, and metal oxides can be added to the electrolyte solution or used as additives to improve the transport properties of ions. These nanomaterials provide a large surface area for ion adsorption, leading to an increased rate of ion diffusion. This, in turn, improves the ion conductivity capacity and overall performance of vanadium batteries.

4. Conclusions

The review article presents a meticulous analysis of the requirements for vanadium electrolytes in batteries, consolidating data from various published works. The article extensively covers significant aspects related to the operation of vanadium batteries, including the impact of ionic force, vanadium con-

centration, temperature, and viscosity on battery performance. The findings highlight the crucial role played by these parameters in determining the efficiency and functionality of vanadium batteries. The article provides essential data on the optimal values for each of these variables, enabling researchers and industry professionals to enhance the overall performance of vanadium batteries. By synthesizing a multitude of research papers, this review article assumes a unique position as a valuable source of information. It serves as a comprehensive reference for individuals seeking to expand their knowledge and understanding of vanadium batteries.

Acknowledgements

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. AP19676897).

References

- [1] García-Quismondo, E., Almonacid, I., Cabañero Martínez, M.Á., Miroslavov, V., Serrano, E., Palma, J. & Alonso Salmerón, J.P. (2019). Operational Experience of 5 kW/5 kWh All-Vanadium Flow Batteries in Photovoltaic Grid Applications. *Batteries*, 5(3), 52. <https://doi.org/10.3390/batteries5030052>
- [2] Kumar, S., Nag, N., Kumari, S., Sarkar, I.J.R. & Singh, A. (2023). Vanadium Redox Flow Batteries for Large-Scale Energy Storage. In: Pal, D.B. (eds) Recent Technologies for Waste to Clean Energy and its Utilization. *Clean Energy Production Technologies*, 79-109. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3784-2_5
- [3] Gundlapalli, R., Jayanti, S. (2021). Dataset on performance of large-scale vanadium redox flow batteries with serpentine flow fields. *Data in Brief*, 35, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106835>
- [4] Aramendia, I., Fernandez-Gamiz, U., Martinez-San-Vicente, A., Zulueta, E. & Lopez-Guede, J.M. (2021). Vanadium Redox Flow Batteries: A Review Oriented to Fluid-Dynamic Optimization. *Energies*, 14(1), (176). <https://doi.org/10.3390/en14010176>
- [5] Puleston, T., Clemente, A., Costa-Castelló, R. & Serra, M. (2022). Modelling and Estimation of Vanadium Redox Flow Batteries: A Review. *Batteries*, 8(9), 121. <https://doi.org/10.3390/batteries8090121>
- [6] Trovò, A., Guarnieri, M. (2020). Standby thermal management system for a kW-class vanadium redox flow battery. *Energy Conversion and Management*, (226), 113510. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113510>
- [7] Jirabovomwisut, T., Arpornwicheanop, A. (2019). A review on the electrolyte imbalance in vanadium redox flow batteries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (45), 24485-24509. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.106>
- [8] Zhang, C., Zhao, T.S., Xu, Q., An, L., Zhao, G. (2015). Effects of operating temperature on the performance of vanadium redox flow batteries. *Applied Energy*, (155), 349–353. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.002>
- [9] Zhang, Q., Dong, Q.-F., Zheng, M.-S. & Tian, Z.-W. (2012). The preparation of a novel anion-exchange membrane and its application in all-vanadium redox batteries. *Journal of Membrane Science*, 421(422), 232–237. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.07.024>
- [10] Iwakiri, I., Antunes, T., Almeida, H., Sousa, J.P., Figueira, R.B. & Mendes, A. (2021). Redox Flow Batteries: Materials, Design and Prospects. *Energies*, 14(18), (5643). <https://doi.org/10.3390/en14185643>
- [11] Wu, X., Liu, J., Xiang, X., Zhang, J., Hu, J. & Wu, Y. (2014). Electrolytes for vanadium redox flow batteries. *Pure and Applied*

- Chemistry, 86(5), 661-669. <https://doi.org/10.1515/pac-2013-1213>
- [12] Lourenssen, K., Williams, J., Ahmadpour, F., Clemmer, R. & Tasnim, S. (2019). Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, (25), 100844. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100844>
- [13] Jirabovornwisut, T., Kheawhom, S., Chen, Y.-S., Arpornwichanop, A. (2020). Optimal operational strategy for a vanadium redox flow battery. *Computers and Chemical Engineering*, (136), 106805. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106805>
- [14] Roznyatovskaya, N., Noack, J., Pinkwart, K. & Tübke, J. (2020). Aspects of electron transfer processes in vanadium redox-flow batteries. *Current Opinion in Electrochemistry*, (19), 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.10.003>
- [15] Liu, Y., Wu, X. (2020). Review of vanadium-based electrode materials for rechargeable aqueous zinc ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, (56), 223-237. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.08.016>
- [16] Loskutov, A., Kurkin, A., Kuzmin, I. & Lipuzhin, I. (2022). Ways to Ensure Parallel Operation of Vanadium Flow Batteries to Create High Power Energy Storage Systems. *Batteries*, 8(9), 120. <https://doi.org/10.3390/batteries8090120>
- [17] Gubler, L. (2019). Membranes and Separators for Redox Flow Batteries. *Current Opinion in Electrochemistry*, (18), 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.08.007>
- [18] Gentil, S., Reynard, D. & Girault, H. H. (2020). Aqueous organic and redox-mediated redox flow batteries: A review. *Current Opinion in Electrochemistry*, (21), 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.12.006>
- [19] Roznyatovskaya, N.V., Fühl, M., Roznyatovsky, V.A., Noack, J., Fischer, P., Pinkwart, K. & Tübke, J. (2020). The Influence of Free Acid in Vanadium Redox-Flow Battery Electrolyte on «Power Drop» Effect and Thermally Induced Degradation. *Energy Technology*, 8(10), 2000445. <https://doi.org/10.1002/ente.202000445>
- [20] Martínez-López, J., Portal-Porras, K., Fernández-Gamiz, U., Sánchez-Diez, E., Olarte, J. & Jonsson, I. (2024). Voltage and Overpotential Prediction of Vanadium Redox Flow Batteries with Artificial Neural Networks. *Batteries*, 10(1), 23. <https://doi.org/10.3390/batteries10010023>
- [21] Vynnycky, M., Assuncao, M. (2022). Vanadium Redox Flow Batteries: Asymptotics and Numerics. In: Ehrhardt, M., Günther, M. (eds) Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2021. ECMI 2021. *Mathematics in Industry*, (39), 365–371. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11818-0_48
- [22] Roznyatovskaya, N., Noack, J., Mild, H., Fühl, M., Fischer, P., Pinkwart, K., Tübke, J. & Skyllas-Kazacos, M. (2019). Vanadium Electrolyte for All-Vanadium Redox-Flow Batteries: The Effect of the Counter Ion. *Batteries*, 5(1), 13. <https://doi.org/10.3390/batteries5010013>
- [23] Rahman, F., Skyllas-Kazacos, M. (1998). Solubility of vanadyl sulfate in concentrated sulfuric acid solutions. *Journal of Power Sources*, 72(2), 105–110. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02692-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02692-X)
- [24] Wang, F., Zhang, Z. & Jiang, F. (2021). Dual-porous structured membrane for ion-selection in vanadium flow battery. *Journal of Power Sources*, (506), 230234. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230234>

Ванадий электролиттерінің негізгі қасиеттері және оларға қойылатын талаптар бойынша шағын шолу

И.О. Аимбетова¹, О.С. Байгенженов^{2*}, А.Т. Дагубаева³, А.В. Кузмин⁴, М.Т. Сарбаева¹, Д.К. Берди¹

¹Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

³Минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы, Алматы, Қазақстан

⁴Инженерлік термодинамика институты, Киев, Украина

*Корреспонденция үшін автор: o.baigenzhenov@satbayev.university

Андатпа. Мақалада ванадий батареяларында қолданылатын электролиттерді өндіруге қадағаланатын негізгі факторлар талданған. Электролиттер өндірісі барысында сақталатын параметрлерді, соның ішінде электролиттегі ванадийдің тиімді концентрациясын, электролиттің құрамын және ерітіндідегі иондық беріктіктің, тұтқырлықтың, температураның және электр өткізгіштіктің тиісті деңгейлерін сақтау қажеттілігін айқындайды. Сонымен қатар, мақалада электродтардың тозуын және шөгінділердің пайда болуын болдырмаудың маңыздылығы көрсетіліп, осы мақсатта қолданылатын әртүрлі реагенттер және олардың әсер ету механизмдері туралы түсінік берілген. Осындай құнды ақпаратты қамтыған мақалада жоғары сапалы ванадий батареялары мен олардың маңызды электролиттерін өндірудің, әсіресе осы саладағы қарқынды жетістіктерді ескере отырып, осы өндірістің маңыздылығына баса назар аударылады. Бұл жан-жақты әдеби зерттеу жұмысы ванадий батареяларына арналған электролиттерді өндіру кезінде мұқият қарастырылуы керек маңызды параметрлерді анықтайды. Сонымен қатар мақалада электродтардың тозуын және шөгінділердің пайда болуын болдырмау жолында жасалатын іс-шаралар туралы негізгі процестер сипатталған. Жалпы айтқанда, бұл мақала осы саладағы қарқынды прогрестерді ескере отырып, жоғары сапалы ванадий батареяларын және олардың электролиттерін өндіруде құнды ресурс ретінде қызмет етеді.

Негізгі сөздер: ванадий батареялары, электролит концентрациясы, электролит тұтқырлығы, тотығу-тотықсыздану процестері, электродтар.

Мини-обзор основных свойств и требований к ванадиевым электролитам

И.О. Аимбетова¹, О.С. Байгенженов^{2*}, А.Т. Дагубаева³, А.В. Кузмин⁴, М.Т. Сарбаева¹, Д.К. Берди¹

¹Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Казахстан

³Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья, Алматы, Казахстан

⁴Институт инженерной теплофизики, Киев, Украина

*Автор для корреспонденции: o.baigenzhenov@satbayev.university

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые факторы, связанные с производством электролитов для ванадиевых аккумуляторов. В нем рассматриваются различные важные параметры, включая оптимальную концентрацию ванадия в электролите, состав самого электролита и необходимость поддержания соответствующих уровней ионной силы, вязкости, температуры и электропроводности в растворе. Кроме того, в статье даны методы предотвращения износа электродов и образования осадка, дается представление о различных используемых реагентах и их специфических механизмах действия. Предоставляя вышеописанную информацию, эта статья подчеркивает исключительную важность производства высококачественных ванадиевых аккумуляторов и их основных электролитов, особенно учитывая стремительный прогресс в этой области. Это исследование охватывает важнейшие параметры, которые необходимо тщательно учитывать при производстве электролитов для ванадиевых аккумуляторов. В нем проиллюстрировано важность поддержания оптимальных концентраций, надлежащего состава и подходящих уровней ионной силы, вязкости, температуры и электропроводности. Также подчеркивается необходимость предотвращения износа электродов и образования осадка. В общем, статья является значимым ресурсом информации для производства ванадиевых аккумуляторов и их неотъемлемых электролитов, особенно учитывая быстрый прогресс в данной сфере.

Ключевые слова: ванадиевые батареи, концентрация электролита, вязкость электролита, окислительно-восстановительные процессы, электроды.

Received: 28 March 2024

Accepted: 15 August 2024

Available online: 31 August 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i4.02>

Extraction of zinc from dust from electric arc furnaces by high-temperature chlorinating sintering

G.M. Koishina¹, N.K. Dosmukhamedov^{1*}, V.A. Kaplan², E.E. Zholdasbay³, A.A. Argyn³, Yu.B. Icheva³¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan²Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel³Zhezkazgan University named after O.A. Baikonurov, Zhezkazgan, Kazakhstan*Corresponding author: nurdos@bk.ru

Abstract. The paper presents the results of comprehensive studies of the processing of ferrous metallurgy dust by high-temperature sintering together with CaCl_2 . Using modern research methods of X-ray fluorescence spectroscopy, inductively coupled plasma mass spectroscopy ICP-MS (Agilent 7700s ICP-MS System Technologies), powder X-ray diffraction (Ultima III (Rigaku Corporation, USA), the composition of dust and the forms of metals in them have been studied: zinc in dust is mainly represented in the form of zincite (ZnO) and in the form of franklinite (ZnFe_2O_4). Zinc chloride hydrates ($\text{Zn}_5\text{Cl}_2 \cdot (\text{OH})_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$) were found in a small amount. Lead was found in a metallic form. The results of the influence of temperature and consumption of CaCl_2 on the distribution of Zn, Pb between sintering products (clinker, sublimate) are presented. The optimal process parameters were established: $t = 900^\circ\text{C}$, $\tau = 60$ minutes, the consumption of CaCl_2 is 1.3 times higher than its consumption from the SRQ. High quality zinc sublimate was obtained, % by weight: 40.87 Zn; 0.16 Pb; 44.82 Cl; 13.04 O; others. A high recovery of zinc in distillates has been achieved – 98.9%. The presence of a minimum lead content in the distillates will not significantly affect their quality. New data on the extraction and distribution of zinc and lead between the products of high-temperature sintering of clinker together with CaCl_2 have been obtained. It was found that at temperatures above 700°C , the zinc content in the clinker decreases sharply. The minimum zinc content in the clinker of 0.62% corresponds to a temperature of 900°C . An increase in temperature to 1000°C only slightly reduces the zinc content in the clinker to 0.6%.

Keywords: dust, sintering, temperature, calcium chloride, lead, zinc, thermodynamics, extraction, clinker, sublimate.

1. Введение

В современных условиях вопросы переработки текущей и накопленной пыли черной металлургии Казахстана являются не модным трендом, а требуют кардинального решения с целью «оздоровления» экологической ситуации страны. Основываясь на материалах, посвященных проблематике переработки техногенных отходов черной металлургии, можно выделить следующие важные аспекты. В Казахстане недостаточно уделяется внимания вопросу раздельной переработки многокомпонентной цинксоодержащей пыли. Организация их переработки сдерживается большим содержанием в них свинца, который варьируется в широких пределах и доходило до 6% [1, 2]. В результате этого большая часть потенциала вторичного сырья теряет свою пригодность к дальнейшей переработке. Отсутствие раздельной переработки пыли ведет к их накоплению, что всегда приводит к наибольшей загрязненности окружающей среды. Хотя на предприятиях черной металлургии и задействована локальная переработка пыли от производства стали и ферросплавов, они не решают проблемы в комплексе.

Известные технологии по возврату пыли в технологический процесс и переработка их известными способами агломерации и другими методами [2-9], сопровождаются значительными потерями ценных металлов за

счет их размазывания между продуктами производства. При этом происходит резкий рост цинка в общем производстве, наличие которого оказывает существенное влияние на качество товарной продукции. Это привело к отказу от такой переработки пыли, что привело к большому их накоплению и росту их объема в геометрической прогрессии. Сложившееся положение с пылью черной металлургии таково, что ее сбыт практически невозможен, ввиду большого содержания в них свинца. Ситуация требует кардинального решения.

По мнению большинства экспертов, если работа предприятий черной металлургии с большими их мощностями не будет поддержана государством в части улучшения экологической обстановки в крупных городах Караганда, Актюбинск, Темиртау и вокруг них, то жизнедеятельность заводов может быть приостановлена. Справедливости ради нужно подчеркнуть, что по стране регулярно проводятся различные экологические мероприятия и научные форумы совместно с местными представительными органами, общественностью и другими заинтересованными сторонами, повесткой дня которых является поиски решений по оздоровлению окружающей среды. Однако существенных сдвигов по решению проблемы утилизации пыли черной металлургии не наблюдается.

В настоящее время в Казахстане независимо от того, что ведется учет накопления вторичного сырья, в том

числе текущей и накопленной пыли черной металлургии, система раздельной комплексной их переработки и разработка новых технологий по утилизации пыли остается без должного внимания. Не отработаны моральный и экономический стимулы у предприятий для ведения раздельной переработки пыли и не актуализировано экологическое сознание, совершенно не развита система рынка вторичного сырья, которая могла бы оживить развитие «зеленых технологий» по их переработке. Основной проблемой является и то, что не ведется государственный статистический учет объемов истинного накопления, переработки и утилизации пыли, т.е. не реализуется эффективная система учета и отчетности о деятельности по обращению с получаемыми на предприятиях некондиционных полупродуктов и техногенных отходов.

В целом, в Казахстане должна быть развита политика государства четкого учета и регулирования полупродуктов и техногенных отходов предприятий и должна быть сформирована единая политика в этой сфере. Все начинания по данной проблеме находятся в зачаточном состоянии, хотя в мировой практике активное развитие получают новые доступные технологии, которые в рамках циркулярной экономики [10] успешно функционируют в развитых странах.

В мировой практике в направлении переработки пыли черной и цветной металлургии активно ведутся работы по применению новых доступных технологий, направленных на расширение экономического, социального развития и охрану окружающей среды, которые являются тремя взаимосвязанными и подпирющими друг друга основами устойчивого развития общества. В научной литературе известно достаточное количество работ, посвященных комплексной переработке пыли черной и цветной металлургии пиро-, гидро- и комбинированными способами их переработки [11-16]. В последние годы для переработки сложного по составу многокомпонентного техногенного сырья широкое распространение получают хлорирующие технологии [17, 18, 19], отличающиеся высокой эффективностью и соответствующие стандартам «зеленых технологий».

Результаты ранее проведенных нами исследований по переработке пыли с использованием хлорирующего спекания [20] показали принципиальную возможность селективного извлечения свинца и цинка из пыли от переработки черного лома в электродуговой печи путем двухстадийного ее спекания: на первой стадии – с хлоридом аммония при низких температурах (до 600°C) с получением чистых свинцовых возгонов, на второй – хлоридом кальция при высоких температурах 800-1000°C с выделением цинка в возгоны в виде его хлорида.

Предложенные в работе технологические решения направлены, в первую очередь, на вывод токсичного свинца и его соединений в начальной стадии технологической схемы с полной утилизацией вредных веществ. Использование высокотемпературного спекания, полученного после первой стадии клинкера совместно с хлоридом кальция, позволяет с высокой эффективностью получать цинковые возгоны с минимальным содержанием в них примесей. Использование при спекании пыли безопасных и дешевых хлорсодержащих реагентов (NH_4Cl , CaCl_2) придает технологии особую привлекательность с технологической и экологической точек зрения.

Использование разработанной технологии наиболее эффективно для переработки пыли с высоким содержанием свинца. При низких содержаниях свинца представляется целесообразным проводить технологию в одну стадию с использованием высокотемпературного спекания пыли совместно с CaCl_2 с селективным извлечением цинка в возгоны в виде хлоридов. При этом незначительное количество свинца в получаемых цинковых возгонах существенного влияния на их качество не окажет.

Цель настоящей работы – исследование поведения цинка и свинца в условиях высокотемпературного прямого спекания пыли совместно с CaCl_2 с установлением оптимальных параметров технологии, обеспечивающей высокое селективное извлечение цинка в возгоны в виде хлоридов, и получение клинкера с высоким содержанием железа, пригодного для производства чугуна и стали.

2. Материалы и методы

2.1. Исходный материал

В качестве исходного материала использованы пыли от переработки железорудного сырья от электросталеплавильной печи казахстанского металлургического завода. Состав пыли до и после обработки характеризовали методом рентгенофлуоресцентной (РФА) спектроскопии (ручные XRF-анализаторы Niton, R.B.M. Control & Mechanization Ltd, Израиль). Количественное определение элементов в пыли обеспечивали с помощью масс-спектропии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS (Agilent 7700s ICP-MS System Technologies) после 24-часового растворения пыли и порошков клинкера в царской водке при комнатной температуре в условиях непрерывного перемешивания.

Порошковую рентгеновскую дифракцию (РФА) проводили на дифрактометре Ultima III (Rigaku Corporation, США). Идентификацию фаз и количественный фазовый анализ проводили с использованием программного обеспечения Jade Pro (MDI, Калифорния) и базы данных неорганических кристаллических структур (ICSD).

Результаты проведенных исследований показаны на рисунке 1.

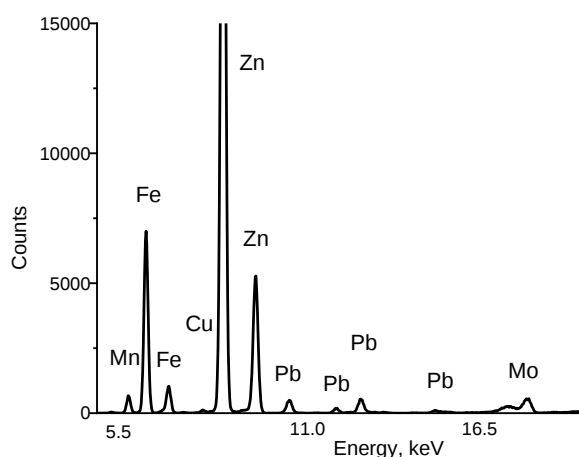
Установлено, что цинк в пыли представлен, в основном, в виде цинкита (ZnO) и в форме франклинита (ZnFe_2O_4). В незначительном количестве в пыли обнаружены гидраты хлорида цинка ($\text{Zn}_5\text{Cl}_2 \cdot (\text{OH})_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Свинец обнаружен в металлической форме. Из-за низкого содержания в пыли примесей они на рентгенограмме не отображаются.

Химический состав исходной пробы пыли по данным ICP-MS представлен в таблице 1.

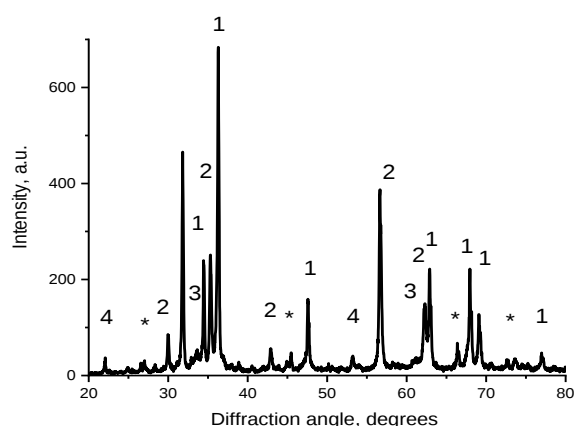
Таблица 1. Химический состав исходной пыли

Содержание, % масс.									
Zn	Pb	Cu	Fe	Cd	As	Sb	Sn	Au	Ag
37.69	1.36	0.2	8.48	0.054	0.004	0.017	0.031	0.008	0.004

Полученные результаты по формам нахождения металлов в пыли были использованы для установления физико-химических закономерностей, протекающих в процессе спекания пыли совместно с хлоридом кальция.



а)



б)

Рисунок 1. Рентгенограмма исходной пыли (а) и РФА-спектры исходной пыли (б): 1 – Цинкит, ZnO ; 2 – Франклинит, $ZnFe_2O_4$; 3 – Свинец, Pb ; 4 – Гидрат хлорида цинка, $Zn_5Cl_2(OH)_8 \cdot H_2O$; * – Неидентифицированные пики

Изучение механизма процесса проводили на основе термодинамических расчетов, которые сводились к определению свободной энергии Гиббса ($\Delta G^\circ T$) реакций взаимодействия компонентов пыли с хлоридом кальция в интервале температур 673-1473 К (400-1200°C). Расчеты проводили с помощью программного обеспечения HSC Chemistry 8.1.5, Outotec.

2.2. Экспериментальная часть

Для спекания использовался изготовленный по индивидуальному заказу кварцевый трубчатый реактор и лабораторная печь с контролируемой температурой.

Схема лабораторной установки показана на рисунке 2.

Опыты проводили при температуре 973, 1073, 1173 и 1273 К. Во всех опытах время было постоянным и составляло 60 минут. Для исследования влияния хлорида кальция к исходной навеске пыли добавляли заданный его расход из расчета в 1.1; 1.3 и 1.5 раза превышающий его количество от стехиометрического необходимого количества (СНК) для хлорирования цинка. Количество исходной навески пыли во всех опытах составляло 100 г. Методика проведения опытов заключалась в следующем. Смесь пыли и хлорида кальция загружали в алундовый тигель 9 и помещали в кварцевый реактор 7, который размещали в печи 8.

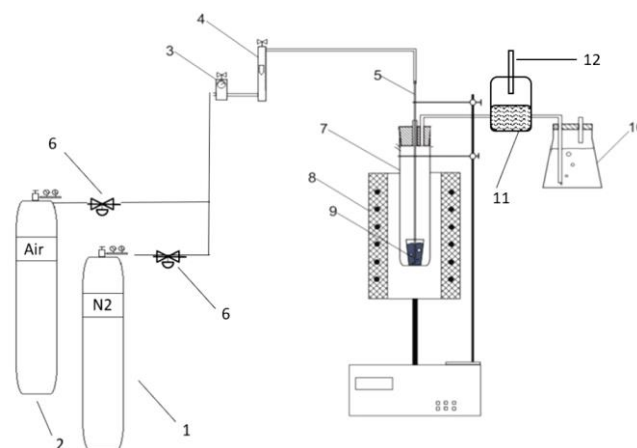


Рисунок 2. Схема лабораторной установки: 1 – баллон с азотом; 2 – баллон с воздухом; 3 – газовый сборник; 4 – расходомер; 5 – трубка для газа; 6 – клапан; 7 – кварцевый реактор; 8 – печь с регулятором температуры; 9 – тигель с навеской; 10 – сосуд для поглощения газов; 11 – фильтр для улавливания возгонов и коллектор; 12 – трубка для ввода воздуха

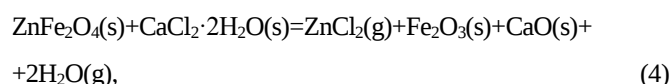
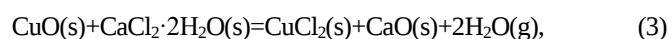
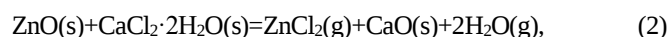
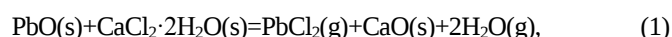
Перед нагревом печи кварцевый реактор очищали потоком сухого газообразного азота, который подавали из баллона 1 со скоростью 100 мл/мин в течение 15 минут. Расход азота регулировали с помощью газового сборника 3 и расходомера 4. Далее печь нагревали с равномерной скоростью до заданной температуры. По достижении необходимой температуры начинали подачу воздуха в кварцевый реактор из баллона 2 и выдерживали печь в атмосфере воздуха в течение 60 минут.

Возгоны улавливали с помощью фильтра 11 в коллекторе 12. Отходящие газы поглощали в сосуде 10. По истечении необходимого времени печь охлаждали в атмосфере воздуха. После остывания печи извлекали навеску, взвешивали, измельчали и полученный материал (клинкер) подвергали анализу на содержание в нем металлов. Каждый опыт при заданных параметрах – температура, расход $CaCl_2$ повторяли три раза. За конечный результат принимали среднее значение по данным трех опытов. С учетом количества исходной навески и полученного клинкера и содержания в них металлов рассчитывали материальный баланс и извлечение свинца и цинка в продукты спекания (возгоны, клинкер).

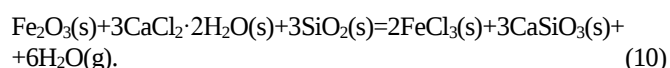
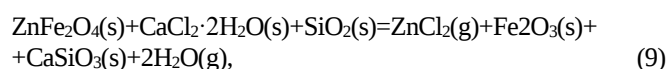
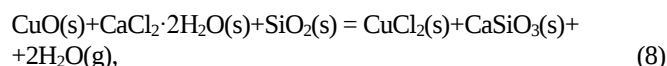
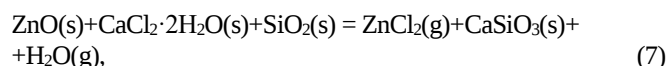
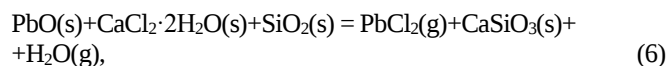
3. Результаты и обсуждение

3.1. Термодинамический анализ реакций взаимодействия компонентов пыли со смесью хлорида аммония и кальция

Механизм взаимодействия компонентов пыли с $CaCl_2$ удобно рассматривать с точки зрения протекания двух групп реакций. К первой группе можно отнести протекание реакций (1)-(6), которые имеют вид (здесь и далее: (s) – стандартное состояние вещества – твердое; g – газ):



Протекание реакций (1)-(6) смещается в сторону образования хлоридов металлов при связывании образующегося оксида кальция с кремнеземом. При этом в пределах высоких температур можно ожидать увеличения скорости протекания реакций (1)-(6) и полноты перевода цинка в возгоны в виде его хлорида. Для проверки данного положения нами проведен термодинамический анализ реакций взаимодействия компонентов пыли с CaCl_2 с участием кремнезема, представляющих вторую группу реакций. Механизм этой группы процессов описывается системой реакций:



Сравнительный анализ убыли свободной энергии Гиббса, $\Delta G^\circ T$ от температуры для реакций (1)-(10) показан на рисунке 3.

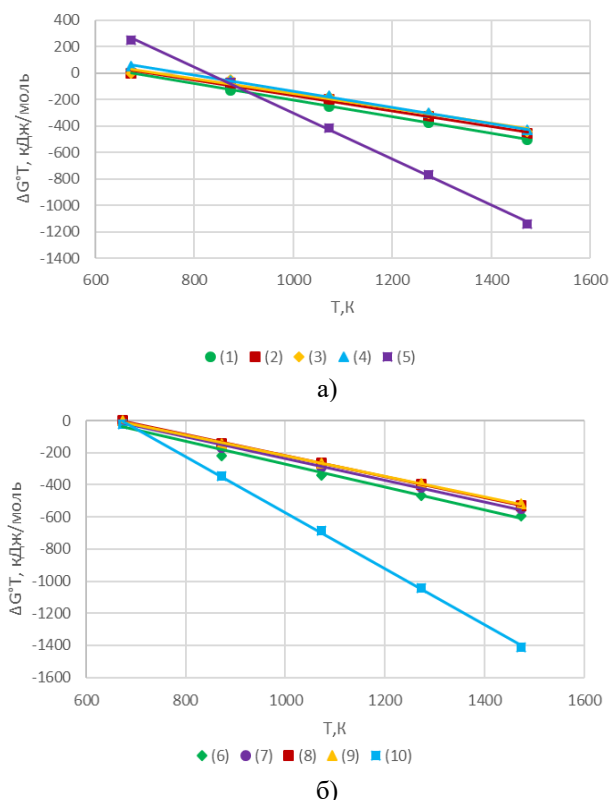


Рисунок 3. Изменение убыли свободной энергии Гиббса ($\Delta G^\circ T$) от температуры: А) – прямое хлорирование, реакции (1) – (5); Б) – хлорирование в присутствии SiO_2 , реакции (6) – (10)

На рисунке 3 видно, что протекание реакций первой группы (1)-(5) в интервале температур 673-873К затруднено, о чем свидетельствуют положительные значения свободной энергии Гиббса.

Дальнейшее повышение температуры (выше 873 К) ведет к резкому росту $\Delta G^\circ T$ реакций (1)-(5). Значения свободной энергии Гиббса указанных реакций в интервале температур 873-1473 К показывают примерно равные высокие отрицательные значения, $\Delta G^\circ T \approx -50...-450$ кДж/моль. При этом протекание реакции (5) наиболее предпочтительнее, о чем свидетельствуют более высокие отрицательные значения свободной энергии Гиббса ($\Delta G^\circ T \approx -72...-1141$ кДж/моль).

В присутствии кремнезема восстановление соединений металлов хлоридом кальция до их хлоридов протекают более интенсивно. Об этом свидетельствуют установленные большие отрицательные значения свободной энергии Гиббса для реакций (6)-(10), значения которых в 1.5 раза превышает аналогичные значения $\Delta G^\circ T$ реакций (1)-(5), протекающих без участия кремнезема.

Полученные результаты показывают, что при высокотемпературном спекании пыли совместно с хлоридом кальция вполне могут быть достигнуты высокие результаты по извлечению цинка в возгоны в виде его хлорида. При этом в возгонах следует ожидать концентрации хлорида свинца. Железо остается в клинкере, и вполне может быть использовано в качестве сырья для производства чугуна и стали. Для проверки установленных закономерностей нами проведены лабораторные исследования по оценке влияния хлорида кальция на распределение Zn и Pb при высокотемпературном спекании пыли.

3.1. Лабораторные опыты по высокотемпературному спеканию пыли совместно с хлоридом кальция

3.1.1. Исследование влияния температуры на извлечение цинка и свинца из клинкера

Динамика изменения содержания Zn и Pb в продуктах спекания зависимости от температуры показана на рисунке 4. Условия спекания: $\tau=60$ минут, расход CaCl_2 в 1.3 раза превышающий стехиометрическое необходимое его количество (СНК) для восстановления оксида цинка до хлорида. Избыток хлорида кальция выбран с учетом его разложения до оксида и образования газообразного хлора в присутствии кислорода в системе.

На рисунке 4(а) видно, что в интервале температур 600-700°C наблюдается монотонное снижение содержания цинка в клинкере с 49.46% до ~30%. В рассматриваемом отрезке температур можно предположить о начале образования хлорида цинка за счет взаимодействия оксида цинка с хлоридом кальция с незначительным переходом цинка в возгоны в виде хлорида. Данное явление хорошо согласуется с теорией процесса разложения хлорида кальция в присутствии кислорода по реакции: $2\text{CaCl}_2 + \text{O}_2 = 2\text{CaO} + 2\text{Cl}_2$. Образующийся активный газообразный хлор, вступая во взаимодействие с оксидом цинка, восстанавливает его до хлорида цинка. В области температур 600-700°C упругость диссоциации образующегося хлорида цинка не велика, тем не менее, можно ожидать незначительной его возгонки. По достижении точки кипения хлорида цинка (732°C) и выше, следует ожидать, как интенсификации процесса разложения хлорида кальция, так и образования газообразного хлорида цинка за счет взаимодействия хлора с оксидом цинка. Образующийся при этом хлорид цинка, обладает высокой упругостью пара, что ведет к резкому его переходу в возгоны. Это видно на рисунке 5: при температурах выше 700°C содержание цинка в клинкере резко снижается с ~30%, и при температуре 800°C доходит до 8%.

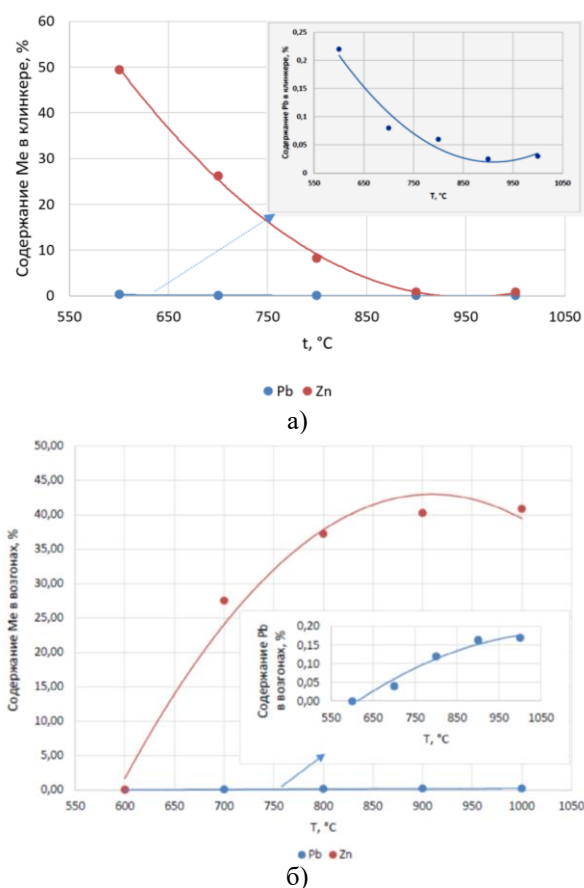


Рисунок 4. Динамика изменения содержания цинка и свинца в клинкере (а) и в возгонах (б) от температуры

Минимальное содержание цинка в клинкере равно 0.62% достигнуто при температуре 900°C. Дальнейший рост температуры до 1000°C ведет лишь к незначительному снижению содержания цинка в клинкере до 0.6%. Это свидетельствует о том, что в условиях высокотемпературного спекания в интервале температур 700-900°C процесс разложения хлорида кальция с образованием газообразного хлора завершается практически полностью, что обеспечивает полное восстановление оксида цинка до хлорида и максимальную возгонку цинка в виде его хлорида из клинкера.

В исследованном интервале температуры установленное снижение содержания свинца в клинкере (рисунок 4(а)). При этом, учитывая незначительное содержание свинца в исходном материале (0.19%) можно утверждать, что количество выделяющегося свинца в виде его хлорида в возгоны, существенного влияния на качество получаемых цинковых возгонов не окажет. Это нетрудно видеть на рисунке 4б, где показана динамика изменения содержания цинка и свинца в возгонах от температуры.

Максимальное содержание цинка в возгонах равно 40.64% достигнуто при температуре 900°C. Дальнейшее увеличение температуры до 1000 °C лишь незначительно, до 40.88%, повышает содержание цинка в возгонах, однако при этом наблюдаются участки оплавления клинкера. Как видно на рисунке 4(б) при температуре 900°C, обеспечивающей максимальное содержание цинка в возгонах (40.64%), содержание свинца составляет всего лишь 0.1%, которой можно практически пренебречь.

Полученные результаты показывают, что для условий высокотемпературного спекания клинкера хлоридом

кальция наиболее приемлемой (оптимальной) температурой является 900°C. С другой стороны, наиболее значимым технологическим параметром технологии является расход хлорида кальция, определение оптимального расхода которого во многом влияет не только на технологические показатели технологии, но и экономические. С целью уточнения оптимального расхода хлорида кальция были проведены опыты по спеканию клинкера с различным расходом CaCl_2 при постоянной температуре 900°C и времени, $\tau=60$ минут.

3.1.2. Исследование влияния расхода CaCl_2 на извлечение цинка и свинца из клинкера

Динамика изменения содержания цинка и свинца в клинкере и в возгонах в зависимости от расхода хлорида кальция показана на рисунке 5.

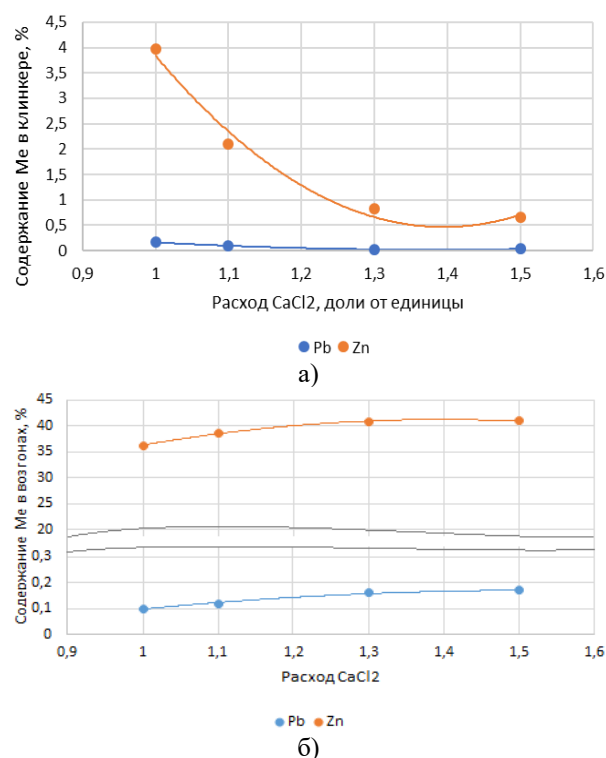


Рисунок 5. Зависимость изменения содержания Zn и Pb в клинкере (а) и в возгонах (б) от расхода хлорида кальция

Установлено, что содержание цинка в клинкере резко снижается при повышении расхода CaCl_2 от 1.0 до 1.3 раза, превышающего его СНК для восстановления оксида цинка до хлорида: содержание цинка в клинкере падает с ~4% до 0.62% (рисунок 5(а)). Дальнейший рост СНК существенного влияния на снижение содержания цинка в клинкере не оказывает: при расходе CaCl_2 в 1.5 раза превышающий его расход от СНК, содержание цинка в клинкере составляет 0.6%. Полученный результат указывает, что выбор оптимального расхода CaCl_2 равно в 1.3 раза превышающий его расход от СНК, является вполне обоснованным. Дальнейший рост расхода хлорида кальция экономически нецелесообразен.

Как отмечалось выше, незначительное изменение содержания свинца в сторону его снижения в клинкере в зависимости от роста расхода CaCl_2 , существенного влияния на технологические показатели технологии не окажет.

Как видно на рисунке 5(б) содержание цинка в возгонах повышается с увеличением расхода CaCl_2 . В интервале роста расхода CaCl_2 с 1.0 до 1.3 раза, превышающего его расход от СНК, содержание цинка в возгонах увеличивается с 36.23% до 40.64%. Дальнейший рост CaCl_2 до значения 1.5 раза превышающий его расход от СНК, лишь незначительно до 41.3% повышает содержание цинка в возгонах.

На основании полученных результатов рассчитаны значения извлечения цинка и свинца в продукты спекания. Зависимость извлечения цинка и свинца в продукты спекания от расхода CaCl_2 показана на рисунке 6.

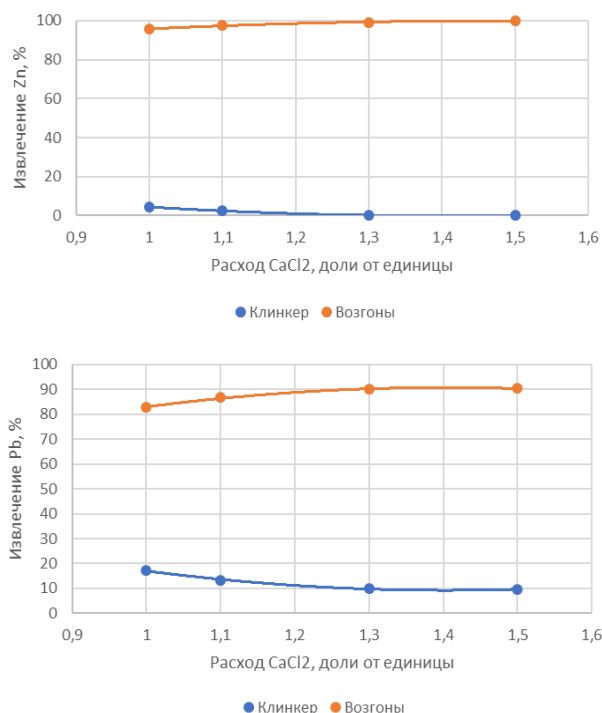


Рисунок 6. Зависимость извлечения Zn и Pb в продукты спекания от расхода CaCl_2

Наилучшие результаты по извлечению цинка в возгоны достигнуто при расходе CaCl_2 в 1.3 раза превышающем его расход от СНК, которое составило 98.9%. При этом, хотя и установлено высокое извлечение свинца в возгоны (84%), значительная его часть концентрируется в клинкере. При расходе $\text{CaCl}_2 = 1.3$ от СНК, извлечение свинца в клинкер составляет ~16%. Установленные данные показывают преимущественное удаление цинка из клинкера и получение возгонов хлорида цинка высокого качества.

Таким образом, на основании проведенных лабораторных опытов определены оптимальные технологические параметры высокотемпературного спекания клинкера, обеспечивающие получение чистых цинковых возгонов с минимальным содержанием свинца. При оптимальных параметрах процесса: $t=900^\circ\text{C}$, $\tau=60$ минут, расход CaCl_2 в 1.3 раза превышающий его расход от СНК, получены цинковые возгоны состава, % масс.: 40.64 Zn; 0.1 Pb; 44.82 Cl; 13.04 O; прочие. Полученные результаты полностью согласуются и подтверждают выводы термодинамического анализа о возможности селективного извлечения цинка из пыли в возгоны.

Отличительная особенность проведенных исследований и их оригинальность состоит в том, что в них более системно рассмотрены проблемы слабого функционирования системы накопления и управления пылью черной и цветной металлургии. Показаны недостатки к организации дальнейшей их рациональной переработки на основе последних достижений мирового опыта и практики. Достижение определенных результатов в области рациональной, эффективной, безотходной переработки пыли черной и цветной металлургии показывает путь к минимизации их отрицательного влияния на окружающую среду.

Использование выбранного в работе решения на практике позволит в дальнейшем использовать экологически чистую, безотходную комбинированную технологию, направленную на комплексное извлечение свинца и цинка в целевые товарные продукты (возгоны) высокого качества. Дальнейшее развитие и внедрение технологии будет способствовать исключению накопления пыли, что существенно улучшит состояние окружающей среды. Использование технологии скажется и на повышении социальной сферы в регионе за счет организации дополнительного производства с новыми рабочими местами.

Перспективы дальнейших исследований связаны с продолжением анализа проблем накопления тонкой пыли черной и цветной металлургии, и поиска путей их рационального решения на основе «зеленых технологий», к которым можно отнести предложенную в работе технологию.

4. Выводы

1. Получены новые данные по поведению цинка, свинца и сопутствующих металлов в условиях твердофазного спекания клинкера с CaCl_2 . Установлена возможность селективного извлечения цинка в возгоны в виде его хлорида по стадийному механизму восстановления оксида цинка хлоридом кальция: в пределах температур 673-873 К происходит образование твердого хлорида цинка, затем – с ростом температуры, происходит фазовый переход $\text{ZnCl}_2(\text{s}) = \text{ZnCl}_2(\text{g})$, связанный с температурой кипения хлорида цинка (732°C).

2. Получены новые данные по извлечению-распределению цинка и свинца между продуктами высокотемпературного спекания клинкера совместно с CaCl_2 . Установлено, что при температурах выше 700°C содержание цинка в клинкере резко снижается. Минимальное содержание цинка в клинкере 0.62% соответствует температуре 900°C . Рост температуры до 1000°C лишь незначительно снижает содержание цинка в клинкере до 0.6%.

3. Повышение расхода CaCl_2 с 1.0 до 1.3 раза, превышающего его расход от СНК, увеличивает содержание цинка в возгонах с 36.23% до 40.64%. Дальнейший рост расхода CaCl_2 на содержание цинка в возгонах влияет незначительно.

4. Установлены оптимальные параметры высокотемпературного спекания клинкера совместно с хлоридом кальция: $t=900^\circ\text{C}$, $\tau=60$ минут, расход CaCl_2 в 1.3 раза превышающий его расход от СНК. Получены цинковые возгоны высокого качества, % масс.: 40.87 Zn; 0.16 Pb; 44.82 Cl; 13.04 O; прочие. Извлечение цинка в возгоны составило 98.9%. Наличие минимального со-

держания свинца в возгонах на их качество существенного влияния не окажет.

5. Полученные результаты составляют основу заключительной стадии хлорирующей технологии переработки свинец содержащей цинковой пыли черной металлургии и использованы при построении общей технологии для селективного извлечения цинка и свинца в товарные продукты.

Финансирование

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023-2025 годы по приоритетному направлению «Рациональное использование водных ресурсов, животного и растительного мира, экология» проекта AP19679572 «Разработка новой технологии утилизации цинковой пыли сталеплавильных производств с получением товарных продуктов».

References / Литература

- [1] Kania, H., Saternus, M. (2023). Evaluation and Current State of Primary and Secondary Zinc Production-A Review. *Applied Sciences*, 13(3), 2003. <https://doi.org/10.3390/app13032003>
- [2] Toporkova, Y.I., Bludova, D., Mamyachenkov, S.V. & Anisimova, O.S. (2021). A review of processing methods for electric arc furnace dust. *Polytech Journal Metallurgy and materials science*, 25(5), 643-680. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>
- [3] Patrushov, A.E., Nemchinova, N.V., Chernykh, V.E. & Tyutrin, A.A. (2018). Modern processing methods of technogenic raw materials of electric furnace steelmaking. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 22(4), 183-190. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>
- [4] Simonyan, L.M., Alpatova, A.A. & Demidova, N.V. (2019). The EAF dust chemical and phase composition research techniques. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1601-1607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.005>
- [5] Dong, W., Wang, Y., Peng, J., Li, Y., Cao, X., Di, Y., Huang, Y. & Li, R. (2024). Extracting zinc from ironworking dust having a high zinc content by vacuum silicothermic reduction. *Process Safety and Environmental Protection*, (182), 1237-1249. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.036>
- [6] Wang, H., Gao, J., Liu, W., Zhang, M. & Guo, M. (2016). Recovery of metal-doped zinc ferrite from zinc-containing electric arc furnace dust: Process development and examination of elemental migration. *Hydrometallurgy*, (166), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.08.004>
- [7] Hamann, C., Piehl, P., Weingart, E., Stolle, D., Al-Sabbagh, D., Ostermann, M., Auer, G. & Adam, C. (2024). Selective removal of zinc and lead from electric arc furnace dust by chlorination-evaporation reactions. *Journal of Hazardous Materials*, (465), 133421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133421>
- [8] Gamutan, J., Koide, S., Sasaki, Y. & Nagasaka, T. (2024). Selective dissolution and kinetics of leaching zinc from lime treated electric arc furnace dust by alkaline media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111789. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111789>
- [9] Deng, X., Huang, R., Lv, X., Yang, J. & Yang, J. (2022). Separation and recovery of metallic zinc and iron concentrate from blast furnace dust by vacuum carbothermal reduction. *Process Safety and Environmental Protection*, (162), 746-751. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.050>
- [10] Vorotnikov, A.M., Lyzhin, D.N. & Ipatova, N.S. (2018). Waste management system as an integral part of circular economy. *Journal of economic research*, (10), 29-34
- [11] Grudinsky, P., Zinoveev, D., Kondratiev, A., Delitsyn, L., Kumbegov, R., Lysenkov, A., Kozlov, P. & Dyubarov, V. (2023). Reduction Smelting of the Waelz Slag from Electric Arc Furnace Dust Processing: An Experimental Study. *Crystals*, 13(2), 318. <https://doi.org/10.3390/cryst13020318>
- [12] Xiaolong, L., Zhiwei, P., Jiaxing, Y., Zhizhong, L., Jiann-Yang, H., Yuanbo, Z., Guanghui, L. & Tao, J. (2017). Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*, (149), 1079. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>
- [13] Xiong, Y., Wang, K., Qiu, D., Omran, M., Huang, R., Li, Y., Wei, S., Khan, I.U., Zhang, D., Ahmed, A. & Yu, Y. (2023). Recent Developments on the Removal of Zinc from Electric Arc Furnace Dust by Using Microwave Heating. *Preprint from Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2795609/v1>
- [14] Omran, M., Fabritius, T. & Heikkinen, E. (2019). Selective Zinc Removal from Electric Arc Furnace (EAF) Dust by Using Microwave Heating. *Journal of Sustainable Metallurgy*, (5), 331-340. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00222-0>
- [15] Reiter, W., Rieger, J., Raupenstrauch, H., Cattini, L., Maystrenko, N., Kovalev, D. & Mitrofanov, A.A. (2023). Recovery of Valuable Materials with the RecoDust Process. *Metals*, 13(7), 1191. <https://doi.org/10.3390/met13071191>
- [16] Małeck, S., Gargul, K., Warzecha, M., Stradomski, G., Hutny, A., Madej, M., Dobrzynski, M., Prajsnar, R. & Krawiec, G. (2021). High-Performance Method of Recovery of Metals from EAF Dust—Processing without Solid Waste. *Materials*, 14(20), 6061. <https://doi.org/10.3390/ma14206061>
- [17] Dosmukhamedov, N., Kaplan, V., Zholdasbay, E., Argyn, A., Kuldeyev, E., Koishina, G. & Tazhiev, Ye. (2022). Chlorination Treatment for Gold Extraction from Refractory Gold-Copper-Arsenic-Bearing Concentrates. *Sustainability*, 14(17), 11019. <https://doi.org/10.3390/su141711019>
- [18] Guo, X., Zhang, B., Wang, Q., Li, Zh. & Tian, Q. (2021). Recovery of Zinc and Lead from Copper Smelting Slags by Chlorination Roasting. *JOM*, 73(6), 1861-1870. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04680-4>
- [19] Kaplan, V., Dosmukhamedov, N., Zholdasbay, E., Daruesh, G. & Argyn, A. (2020). Alumina and Silica Produced by Chlorination of Power Plant Fly Ash Treatment. *JOM*, 72(10), 3348-3357. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04267-5>
- [20] Dosmukhamedov, N.K., Koishina, G.M., Zholdasbay, E.E. & Argyn, A.A. (2024). Extraction of lead during low-temperature firing of dust from melting scrap metal in an electric arc furnace together with ammonium chloride. *CIS Iron and Steel Review*, 2(28). In print.

Электр пештері шандарынан мырышты жоғары температуралы хлорлап күйдіру арқылы бөліп алу

Г.М. Қойшина¹, Н.К. Досмухамедов^{1*}, В.А. Каплан², Е.Е. Жолдасбай³, А.Ә. Арғын³, Ю.Б. Ичева³

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Вейцман атындағы ғылыми институты, Реховот, Израиль

³Ө.Ә. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті, Жезқазған, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: nurdos@bk.ru

Андатпа. Жұмыста қара металлургияның шаңын CaCl_2 -мен бірге жоғары температурада күйдіру арқылы өндеудің кешенді зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. Рентген-флуоресцентті спектроскопияны, индуктивті байланысқан ICP-MS плазмасымен масс-спектроскопияны (Agilent 7700s ICP-MS system Technologies), ұнтақты рентгендік дифракцияны (Ultima III (RIGAKU Corporation, АҚШ) зерттеудің заманауи әдістерін пайдалана отырып, шаңның құрамы және олардағы металдардың табылу формалары зерттелді: мырыш шаңда негізінен цинкит түрінде (ZnO) және франклинит түрінде (ZnFe_2O_4) табылған. Аз мөлшерде мырыш хлориді гидраттары ($\text{Zn}_5\text{Cl}_2 \cdot (\text{OH})_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$) табылған. Қорғасын металл түрінде кездеседі. Температура мен CaCl_2 шығынының күйдіру өнімдері (клинкер, сублимация) арасында Zn , Pb бөлініп таралуына әсері нәтижелері ұсынылған. Процестің оңтайлы параметрлері орнатылды: $t = 900^\circ\text{C}$, $\tau = 60$ минут, CaCl_2 шығыны СКМ-нен 1.3 есе көп. Жоғары сапалы мырыш ұшқындары алынды, % масса.: 40.87 Zn ; 0.16 Pb ; 44.82 Cl ; 13.04 O ; басқалары. Ұшқындарға мырыштың жоғары бөліп алуы жеткізілді – 98.9%. Ұшқындарда қорғасынның минималды мөлшерінің болуы олардың сапасына айтарлықтай әсер етпейді. CaCl_2 -мен бірге клинкерді жоғары температуралы күйдіру өнімдері арасында мырыш пен қорғасынды бөліп алу – бөлініп таралу бойынша жаңа деректер алынды. 700°C -тан жоғары температурада клинкердегі мырыш мөлшері күрт төмендейтіні анықталды. Клинкердегі мырыштың минималды мөлшері 0.62% 900°C температураға сәйкес келеді. Температураны 1000°C -қа дейін өсуі клинкердегі мырыштың мөлшерін 0.6% - ға дейін төмендетеді.

Негізгі сөздер: шаң, күйдіру, температура, кальций хлориді, қорғасын, мырыш, термодинамика, бөліп алу, клинкер, ұшқындар.

Извлечение цинка из пыли от электродуговых печей путем высокотемпературного хлорирующего спекания

Г.М. Қойшина¹, Н.К. Досмухамедов^{1*}, В.А. Каплан², Е.Е. Жолдасбай³, А.А. Арғын³, Ю.Б. Ичева³

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Научный институт им. Вейцмана, Реховот, Израиль

³Жезказганский университет им. О.А. Байконурова, Жезказган, Казахстан

*Автор для корреспонденции: nurdos@bk.ru

Аннотация. В работе приведены результаты комплексных исследований переработки пыли черной металлургии путем высокотемпературного их спекания совместно с CaCl_2 . С использованием современных методов исследования рентгенофлуоресцентной спектроскопии, масс-спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS (Agilent 7700s ICP-MS System Technologies), порошковой рентгеновской дифракции (Ultima III (Rigaku Corporation, США) изучены состав пыли и формы нахождения металлов в них: цинк в пыли представлен, в основном, в виде цинкита (ZnO) и в форме франклинита (ZnFe_2O_4). В незначительном количестве обнаружены гидраты хлорида цинка ($\text{Zn}_5\text{Cl}_2 \cdot (\text{OH})_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Свинец обнаружен в металлической форме. Представлены результаты влияния температуры и расхода CaCl_2 на распределение Zn , Pb между продуктами спекания (клинкер, возгоны). Установлены оптимальные параметры процесса: $t = 900^\circ\text{C}$, $\tau = 60$ минут, расход CaCl_2 в 1.3 раза превышающий его расход от СНК. Получены цинковые возгоны высокого качества, % масс.: 40.87 Zn ; 0.16 Pb ; 44.82 Cl ; 13.04 O ; прочие. Достигнуто высокое извлечение цинка в возгоны – 98.9%. Наличие минимального содержания свинца в возгонах на их качество существенного влияния не окажет. Получены новые данные по извлечению-распределению цинка и свинца между продуктами высокотемпературного спекания клинкера совместно с CaCl_2 . Установлено, что при температурах выше 700°C содержание цинка в клинкере резко снижается. Минимальное содержание цинка в клинкере 0.62% соответствует температуре 900°C . Рост температуры до 1000°C лишь незначительно снижает содержание цинка в клинкере до 0.6%.

Ключевые слова: пыль, спекание, температура, хлорид кальция, свинец, цинк, термодинамика, извлечение, клинкер, возгоны.

Received: 02 May 2024

Accepted: 15 August 2024

Available online: 31 August 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i4.03>

Analysis and research of flocculant reagents for thickening operations of flotation concentrate in the processing technology of fine-dispersed chrome ores

B.B. Abdurzakova*, L.S. Kauanova, N.K. Saimaganbetova

ERG Research and Engineering Center LLP, Khromtau, Kazakhstan

*Corresponding author: B.Abdurzakova@erg.kz

Abstract. This research presents a systematic review of innovative methods for determining the influence of the concentration of flocculant reagents TOPFLOC 714, NALCO 8172PULV, and Magnofloc 5250 in recycled water for the purpose of dewatering sludge from treatment facilities during the processing of fine-dispersed chrome ores using the gravity-flotation method of enriching aged tailings at the Donskoy GOK. It also examines the degree of influence of amine components of flocculants in recycled water on the technological processes of gravity and flotation beneficiation, as well as the corrosion resistance of equipment. A review of modern water treatment methods is provided. A systematic review and analytical assessment of the results of 10 selected scientific studies on the methodology for determining the efficiency of flocculants for dewatering sludge from treatment facilities in the processing of fine-dispersed chrome ores was conducted, covering the period from 2006 to 2023. The study results show the use of easily accessible, safe, and cheap biodegradable polymers through innovative methods. Additionally, the research demonstrates successful examples of thickening oxide minerals after gravity separators and flotation machines to achieve good results in sedimentation of sludge from treatment facilities in fine ore processing. The pH of the solution influences the behavior of polymer chains. The clarification of industrial wastewater from gravity and flotation processes depends on both the type and concentration of the applied flocculants. A systematic review of dewatering methods for sludge from treatment facilities processing fine-dispersed chrome ores was carried out with an analysis of the advantages and disadvantages of the selected methods. Overall, the results highlight the importance of using flocculant reagents and applying innovative methods for the sedimentation of fine-dispersed chrome ores to enhance beneficiation efficiency and improve resource utilization.

Keywords: *fine-dispersed chrome ores, processing, beneficiation methods, flocculant, flocc concentrate, thickening.*

1. Введение

ТОО «Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG» (ТОО НИИЦ ERG) был проведён ряд исследовательских работ по определению влияния аминных компонентов собирателя и полимерных флокулянтов класса полиакриламидов в оборотной воде на технологический гравитационно-флотационный процесс переработки хромосодержащих шламовых хвостов Донского ДГОКа». Флотация хромитов и хромшпинелидов является в настоящее время малоизученным процессом. В известных случаях для флотации хромовых минералов использовали оксигидрильные реагенты. Применение данных реагентов известно для гравитации и флотации близких по характеристикам типов руд, однако для лежалых хвостов гравитационных фабрик ранее не применялись. Для переработки мелких классов хромосодержащих шламовых продуктов ранее были рекомендованы только схемы и режимы, включающие гидрохимическую переработку.

Флокулянты усиливают эффект от коагулянтов: ускоряют отделение примесей от воды, формируют более крупный и плотный осадок, экономят расход коагулянтов. Они продлевают срок эксплуатации фильтров и

помогают станциям водоочистки обрабатывать больше жидкости.

Эти полимеры позволяют ускорить фильтровальный процесс, обеспечивают удаление примесей больших масштабов при минимальных затратах. Их принцип действия основан на разделении жидкой и твердой фазы. Для максимального эффекта следует применять такие реагенты после коагулянтов.

К основным достоинствам использования растворов флокулянтов для очистки воды относят следующие факторы:

- ускорение процесса осаждения, придание жидкости прозрачности;
- сокращение продолжительности процедуры фильтрации, что позволяет снизить затраты при значительных объемах;
- продление эксплуатационного срока фильтрующих систем за счет удаления крупных загрязнений;
- отсутствие влияния на показатель pH обрабатываемой субстанции;
- частичное удаление вирусов, бактерий, водорослей;
- повышение эффективности процедуры на 30% по сравнению с аналогичными методами.

© 2024, B.B. Abdurzakova, L.S. Kauanova, N.K. Saimaganbetova

B.Abdurzakova@erg.kz; Lyazzat.Kauanova@erg.kz; Nurslu.Saimaganbetov@erg.kz

Engineering Journal of Satbayev University. eISSN 2959-2348. Published by Satbayev University

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Продукция также не требует подключения дополнительных очистных установок, что позволяет увеличить производительность предприятия. Может применяться там, где другие способы не работают. Не повышает концентрацию растворенных металлов, при соблюдении рекомендованных дозировок безопасна для здоровья.

Коагулянты способствуют удалению мелкодисперсного мусора, объединяя его частицы между собой и впоследствии осаждая их. Но они имеют немного другой механизм действия: в его основе лежит дестабилизация зарядов загрязняющих веществ и устранение электростатического взаимодействия.

Процесс флокуляции протекает за счет создания полимерной связи. В результате фильтруемые частички укрепляются и значительно увеличиваются в объеме, а затем с легкостью удаляются со дна емкости. Время воздействия данных реагентов тоже различается: коагуляция проходит в течение 1-3 минут при температуре 20-25°C после тщательного перемешивания, флокуляция – от 30 до 60 минут, так как требует большего времени для отстаивания. Это обусловлено продолжительной стадией формирования осадка. Концентрация водородных ионов (рН среды), при которой производится растворение, выбирается в зависимости от условий применения полимерных флокулянтов. Как правило, на ОФ для растворения используется техническая вода с практически нейтральной средой. Часто применяется также щелочной гидролиз флокулянтов. При гидролизе ПАА щелочь добавляется на первой стадии растворения в количестве 0.0375 кг на 1 кг 8%-ного флокулянта и перемешивается до полного растворения. Полученный раствор выдерживают 16 часов при температуре 50-80°C.

Концентрация водородных ионов в оборотных водах ОФ близка к нейтральной, что, как правило, благоприятно для применения полимерных флокулянтов с различной ионной активностью.

С повышением степени дисперсности частиц в суспензии, при прочих равных условиях, повышается расход полимерных флокулянтов, необходимый для получения заданного технологического эффекта.

Крупность флокулируемых частиц должна учитываться при выборе полимерного флокулянта с молекулярной массой, оптимальной для данных условий. Если размеры твердых частиц и макромолекул сильно различаются между собой, то вслед за адсорбцией последних флоккулы не образуются. Следовательно, для наиболее высокодисперсных частиц эффективными должны быть полимерные флокулянты с низкой (<105) или средней (105-106) молекулярной массой.

Концентрация твердой фазы в обрабатываемых суспензиях изменяется от 20-50 кг/м³ (отходы флотации, сгущенные перед центрифугированием; флотоконцентраты, направляемые на фильтры). При сгущении шламов в осветительных устройствах, действие которых основано на использовании силы тяжести (сгустители, отстойники), применение флокулянтов оказывается неэффективным, если концентрация твердого превышает в среднем 100 кг/м³. В центрифугах, где сфлокулированный осадок уплотняется центробежной силой, содержание твердого в суспензиях, обрабатываемых флокулянтами, может достигнуть 400 кг/м³. Повышение концентрации суспензии до 500 кг/м³ и более оказывается целесообразным и при их фильтровании.

Целью исследования является определить наилучший реагент флокулянт по сгущению флотационного концентрата из перечисленных полиакриламидов:

Флокулянт Topfloc RHH 714 (производитель Solutions, Венгрия), предложена ТОО «НИИЦ ERG» для сгущения флотационного концентрата;

Флокулянт Nalco 8172 PULV (производитель Нидерланды), подобран Донским ГОКом для сгущения концентратных хвостов, и для сгущения подготовки питания тонких фракции-0.120+0.03 мм;

Флокулянт Magnofloc 5250 (производитель Basf, Германия), подобран «Agseptence Group» производителем оборудования фильтров-пресса, сгустителей.

2. Материалы и методы

2.1. Подготовка проб к лабораторным исследованиям. Гранулометрическая характеристика продуктов

При проведении исследований по сгущению флотационного концентрата применяли следующие вспомогательные лабораторные оборудования как мерные цилиндры объемом 1000 мл. В мерных цилиндрах емкостью 1000 мл пульпы - флотационный концентрат с содержанием 13% твердого (130 грамм сухого концентрата довели до 1000 грамм водой в цилиндре), с концентрацией 0.05% (1 грамм флокулянта довели до 200 грамм воды) на разных расходах: 10 г/т, 20 г/т, 25 г/т, 30 г/т и 40 г/т с одинаковыми условиями перемешивания.

В результате проведенных опытов оценивалась скорость сгущения, высота сгущенного слоя, чистота осветления верхнего слоя. Результаты анализировались и сравнивались между собой для определения эффективного подбора флокулянта. В настоящее время для определения алкиламинов в водных средах применяют газовую хроматографию (ГХ), высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ), ионную хроматографию (ИХ) и капиллярный электрофорез (КЭ). В газовой хроматографии определение аминов может осуществляться с различными типами детекторов: азотно-фосфорным, пламенно-фотометрическим, электронного захвата и масс-спектрометрическим. Как правило, ГХ широко используется для определения низкомолекулярных аминов из-за его высокой разрешающей способности, чувствительности, короткого времени анализа.

При определении высокомолекулярных аминов вследствие их полярности, а также из-за их разложения в хроматографической колонке чувствительность детектирования снижается.

Техническая характеристика флокулянтов:

Topfloc RHH 714 (Solutions, Венгрия) – это гранулированное твердое вещество, ионный характер - анионный, молекулярный вес материала - очень высокий, заряд материала - средний, запах - без запаха, размер частиц - 2 мм = 2%; <0.15 мм = 6%, объемная плотность – 0.71мм, рН-6-8:5g/L, рабочая концентрация - 3г/л, время растворения (минуты) в деионизированной воде при 5 г/л и 25 градусов.

Приготовление раствора:

время растворения 60 минут в деионизированной воде при 5 г/л и 25 градусов, срок годности-12 месяцев, несовместимо с сильными кислотами и окисляющими средствами, при высоких температурах может привести к образованию: оксидов азота (NOx), оксидов углерода,

оксиды серы, цианид водорода, токсичность- LD 50 (орально)>5000 мг/кг;

LC 50 (96 часов)>100 мг/л, не раздражает, не является быстро разлагающим, биоккумуляция не накапливается, храниться в сухом месте, при стабильной температуре от 5-30 градусов.

Nalco 8172 (NalCO, Нидерланды) - это порошок, с анионным характером, высокомолекулярный на основе акриловых кислот 95-100%, содержание акриламида 75 ppm, имеет средний заряд, химическое наименование - полимер проп-2-еновой кислоты с проп-2-енамидом натриевая соль, химическая формула- $[[C_3H_4O_2]m[C_3H_5NO]n[Na]y]x$ [9], cas-25987-30-8, без запаха, рабочая концентрация перед дозировкой 0.05-0.1%, время растворения (минуты) в деионизированной воде при 5 г/л и 25 градусов- готовят в две стадии: 40 минут 0.25-0.5%, перед дозировкой 0.05-0.1%, стабильность деионизированных растворов стабильная при соблюдении условий, несовместимые материалы контактировать с сильными окислителями (например, хлором, пероксидами, хроматами, азотной кислотой, перхлоратами, жидким кислородом, перманганатами) может сопровождаться нагреванием, вспышкой, выделением взрывоопасных и/или токсичных паров, при пожаре могут выделяться оксиды углерода (сох), аммиак и оксиды азота (пох) [1], токсичность материала малоопасная продукция по степени воздействия на организм по гост 12.1.007, 4-ый класс опасности. Может загрязнять объекты окружающей среды, может вызвать у лиц с повышенной чувствительностью, изменчивость в почве продукции может загрязнять окружающую среду: водоемы, почвы, атмосферный воздух. Попадая в водную среду, может нанести урон водным организмам, биоккумуляция продукта то что данное вещество не считается очень устойчивым и не обладает высокой способностью к биоккумуляции, пдк р.з.мг/м³-10*, анионные полимеры и сополимеры на основе акриловых и метакриловых мономеров, аэрозоль, класс опасности - 4, условие хранения это избегание высоких температур.

Magnofloc 5250 (Basf, Германия) – это порошок, имеет анионный характер, также высокомолекулярный вес, заряд - 30% (средний), без запаха, размер частиц - 98%< 1000мк, объемная плотность, pH-7.2 (при 1% раствор при 25 град), рабочая концентрация – 0.25-0.5% max 0.025-0.1% max, стабилен при нормальном хранении, срок годности - 4 года, несовместимые материалы - сильные кислоты, концентрированные основы, сильные оксиданты, опасные продукты при разложении. В случае соблюдения предписаний указаний по хранению, опасные продукты не распадаются. В случае пожара выделяются оксиды углерода, оксиды азота, очень скользкий во влажном состоянии, токсичность- LD 50 (орально)>5000 мг/кг; LC 50 (48х)>100 мг/л. Раздражающее действие - не раздражает, нелегко поддается биологическому распаду, следует ожидать адсорбции в твердую фазу почвы, продукт не содержит веществ, которые удовлетворяют РВТ-критериям (устойчивый, биоаккумулятивный, токсичный), на больших стандартных конструкционных материалов слабее, однако следует избегать контакта с алюминиевым продуктом и деталями с гальваническим покрытием.

Техническая характеристика данных полиакриламидов состоит в том, что Магнофлок 5250 имеет плотность

заряда 30%, который относится к классу средних 50%. В остальных флокулянтов описано, что в трех марки флокулянтов схожие свойства: анионного типа, в характеристике флокулянта Nalco 8172 есть высокомолекулярные, белого цвета, не имеют запаха, требуют при хранении избегать высоких температур.

В случае образуются оксиды азота (NOx), оксиды углерода. Из литературного обзора выяснено, что на качество оборотной воды, смена марки флокулянта не влияет, но на процесс сгущения и фильтрации эффект может быть существенным. Для выбора начальных концентраций были использованы данные экспериментов по измерению остаточной концентрации реагентов в водной фазе операций сгущения и флотации, а также разбавление сливов и фильтратов в условиях внутреннего водооборота. С учетом возможного накопления реагентов для опытов по биоокислению выбраны исходные концентрации флокулянта и собирателя 5 и 30 мг/л. Начальные концентрации флокулянта при исследованиях измеряли в специально отобранной в начале эксперимента пробе одновременно с измерением концентрации в первом опробовании (через 4 часа), чтобы учесть фактор химического разложения флокулянта в пробе под действием компонентов оборотной воды.

Всё определяет конкретное соотношение молекулярного веса и заряда, и то, на сколько «узко» выделен заряд. Бывает, что во флокулянте присутствуют молекулы с 20% и 40% анионности, и пишут, что заряд составляет 30% в среднем, а бывает узко выделенный продукт с 30% заряда. Такие продукты, даже при одинаковом молекулярном весе будут работать по-разному.

В таблице 1 представлена гранулометрическая характеристика флотационного концентрата.

Таблица 1. Гранулометрическая характеристика флотационного концентрата

Класс крупности, мм	Выход, %
+0.071	6.10
-0.071+0.040	20.70
-0.040+0.026	20.10
-0.026	53.10
Итого	100.00

Согласно, гранулометрической характеристике флотационного концентрата содержание класса крупности - 0.040+0 мм составляет 73.20%.

3. Результаты и обсуждение

По результатам анализов сгущения флотационного концентрата представлены результаты тестирования на разных флокулянтах Torpfloc RHN 714, Nalco 8172, Magnofloc 5250 с концентрацией 0.05% с расходами: 10 г/т, 20 г/т, 25 г/т, 30 г/т и 40 г/т. В таблице 2 и на рисунке 1 представлена сравнительная характеристика полиакриламидов при расходе 10 г/т. Высота пульпы флокконцентрата заняло в цилиндре 325 мм.

Измерения концентрации флокулянтов проводились в пробах оборотной воды Акжар, Гигант и ФООР, в которые дозировали флокулянты Torpfloc 714, Nalco 8172PULV и Magnofloc 5250. Следует отметить, что при проведении эксперимента при одновременном дозировании флокулянта скорость биоокисления равна или пре-

вышает скорость окисления чистого флокулянта, что возможно связано с улучшением условий действия био-организмов (рост количества питательной массы).

Таблица 2. Сравнительная характеристика полиакри- ламидов при расходе 10 г/т

Время осаждения, сек	Высота осветленного слоя, мм		
	расход 10 г/т		
	Topfloc 714	Nalco 8172	Magnofloc5250
20	15	20	60
40	25	70	200
60	40	215	250
80	55	235	260
100	75	240	265
120	105	243	267

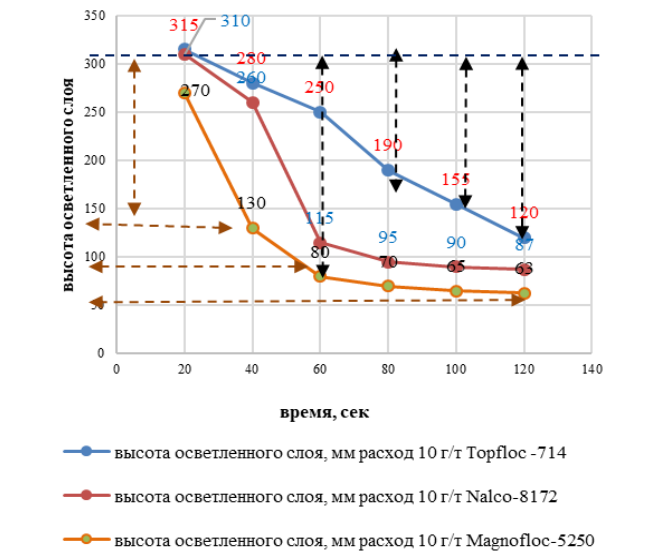


Рисунок 1. График осветленного слоя сгущения с применением флокулянтов с расходом 10г/т

Как видно из рисунка 2, высота осветленного слоя (зоны свободного осаждения), выше при сгущении с применением флокулянта Magnofloc-5250 с расходом 10 г/т в сравнении с другими исследуемые флокулянтами. На графике видно, что критической точкой осаждения с Magnofloc-5250 -является время на 40 сек. С 40 сек по 60 сек образуется зона уплотнения осадка. С увеличением времени, с 60 секунды образуется слой осадка. Полное время осаждения и уплотнения осадка -120 сек.

Среднюю скорость (м/с) осаждения частиц определяют по формуле с использованием параметров:

$V_{ср}$ – зона осаждения – зона уплотнения осадка / время осаждения в момент, когда зона осаждения достигнет зоны уплотнения.

Средняя скорость осаждения твердых частиц флото-концентрата с применением Magnofloc 5250 с расходом 10 г/т, получилось $((250-200)/1000)/40=1.25\cdot10^{-3}$ м/с.

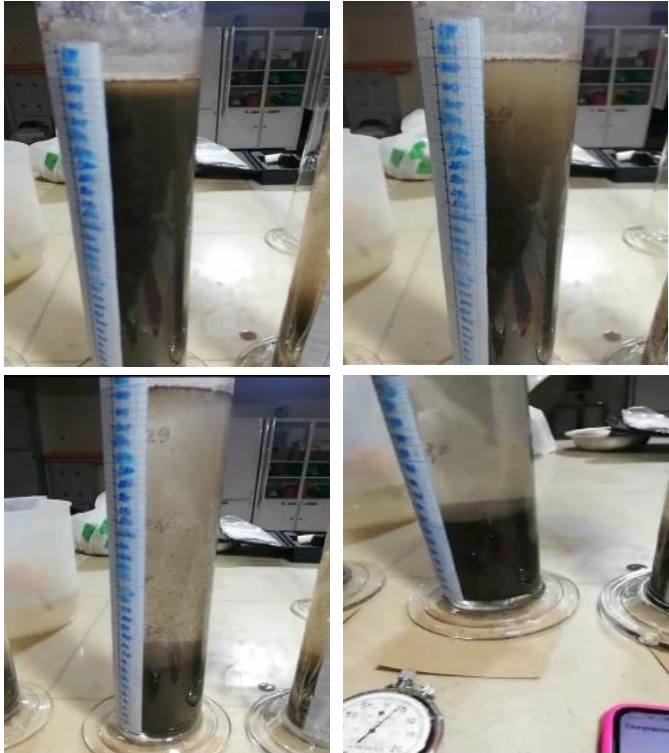


Рисунок 2. Фотографии осаждения частиц по времени

В таблице 3 и на рисунке 3 представлена сравнительная характеристика полиакриламидов при расходе 20 г/т.

Таблица 3. Сравнительная характеристика полиакри- ламидов при расходе 20 г/т

Время осаждения, сек	Высота осветленного слоя (зона осаждения частиц), мм		
	расход 20 г/т		
	Topfloc 714	Nalco 8172	Magnofloc 5250
20	20	30	70
40	220	210	240
60	230	240	247
80	240	247	250
100	245	250	254
120	250	255	260

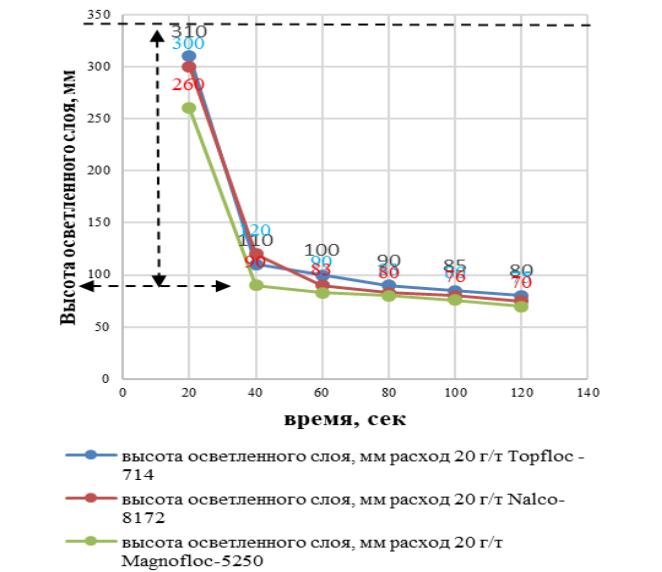


Рисунок 3. График осветленного слоя сгущения с применением флокулянтов с расходом 20 г/т

Из рисунка 3 видно, что осаждения частиц со всеми исследуемыми флокулянтами происходит быстрее с расходом 20 г/т и на 20 сек. На 40 сек видим, что столб высоты осветленного слоя выше у флокулянта Magnofloc 5250. Средняя скорость осаждения получается $115/40 \cdot 10^{-3} = 0.003$ м/с.

В таблице 4 и на рисунке 4 представлена сравнительная характеристика полиакриламидов при расходе 25 г/т.

Таблица 4. Сравнительная характеристика полиакриламидов при расходе 25 г/т

Время осаждения, сек	Высота осветленного слоя, мм расход 25 г/т		
	Topfloc 714	Nalco 8172	Magnofloc 5250
20	40	50	60
40	230	240	215
60	247	250	230
80	250	257	245
100	255	260	248
120	255	265	251

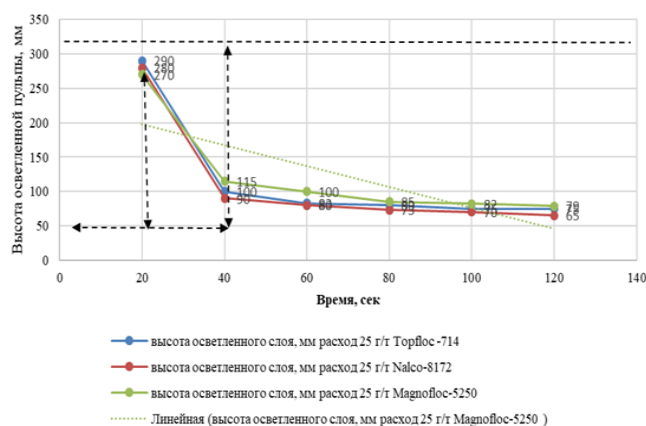


Рисунок 4. График осветленного слоя сгущения с применением флокулянтов с расходом 25 г/т

По результатам исследования сгущения флокулянтов с расходом 25 г/т, видим, что осаждение происходит у всех флокулянтов быстрее уже на 20 сек. На 40 сек наблюдаем, что высота осветленного слоя выше с использованием флокулянтов Nalco 8172 и Topfloc 714.

В таблице 5 и на рисунке 5 представлена сравнительная характеристика полиакриламидов с расходом 30 г/т.

Таблица 5. Сравнительная характеристика полиакриламидов при расходе 30 г/т

Время осаждения, сек	Высота осветленного слоя, мм расход 30 г/т		
	Topfloc 714	Nalco 8172	Magnofloc 5250
20	50	60	70
40	230	220	240
60	240	250	255
80	243	255	260
100	247	257	263
120	250	260	265

Из рисунка 5, видим, что с расходом флокулянтов 30 г/т, осаждение частиц замедляется по сравнению с расходами 25 и 20 г/т. Высота осветленного слоя почти у всех исследуемых флокулянтов одинаковое.

Рассмотрим данное наблюдения по графику рисунок 6.

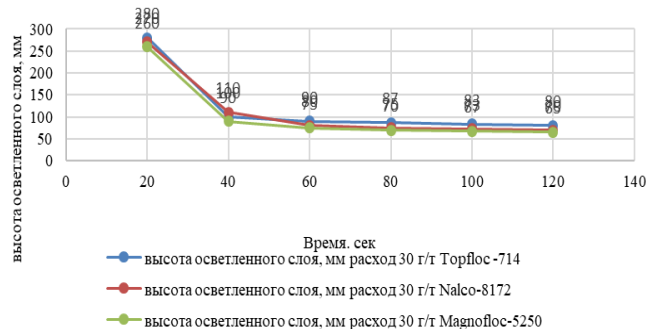


Рисунок 5. График осветленного слоя сгущения с применением флокулянтов с расходом 30 г/т

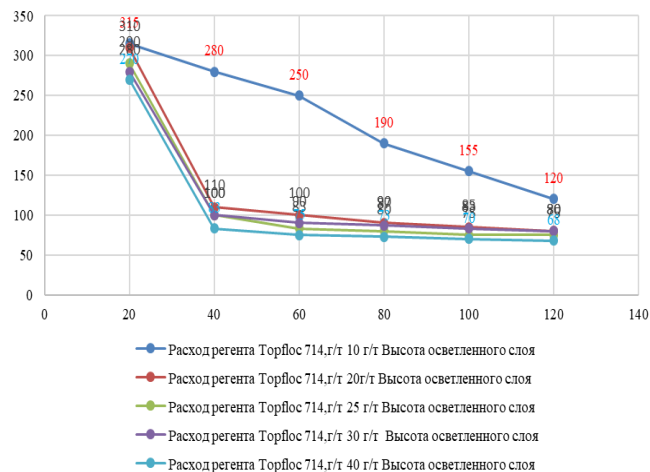


Рисунок 6. Динамика осаждения частиц с применением Topfloc- 714 на разных расходах

Из рисунка 6 видно, что скорость осаждения частиц с флокулянтom Topfloc- 714 почти одинаковое с расходом 20 г/т и выше.

Рассмотрим исследование по сгущаемости с применением флокулянта Magnofloc -5250 по графику (рис. 7).

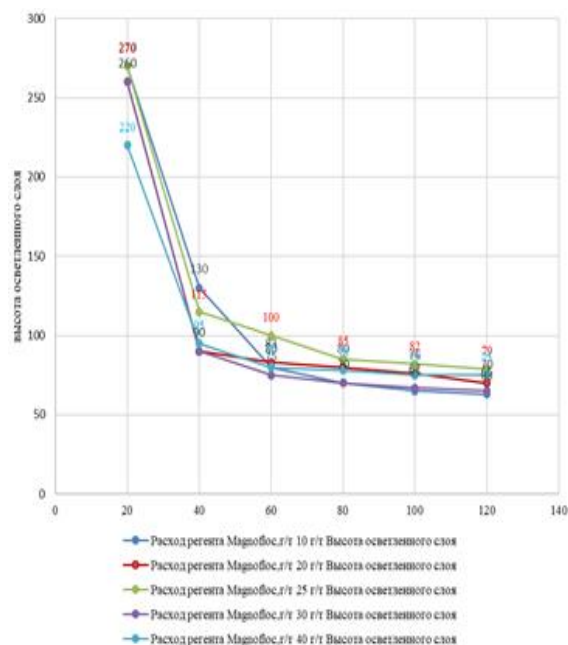


Рисунок 7. Динамика осаждения частиц с применением Magnofloc -5250 на разных расходах

Из рисунка 7 видно, что с применением флокулянта Magnofloc -5250 лучшее осаждение частиц происходит с расходом 20 г/т. При больших дозах осаждения частиц медленнее.

Сравним еще раз результаты Magnofloc -5250 и Torpfloc- 714 с дозировкой 20г/т.

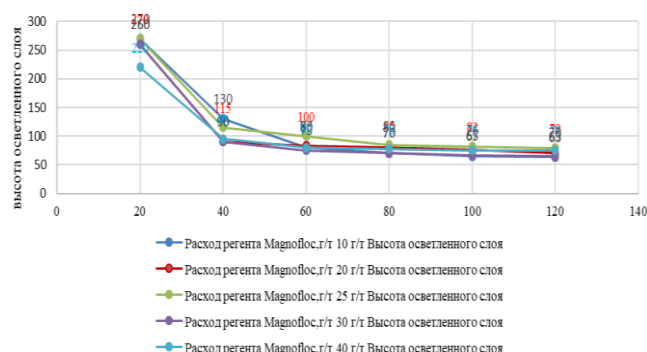


Рисунок 8. Сравнительная характеристика полиакриламидов с расходом 20 г/т

Как видим, что Magnofloc 5250 показывает лучшее осаждение частиц с расходом 20 г/т. Таким образом, наиболее эффективным флокулянт при сгущении является реагент Magnofloc 5250. Современные производственные процессы, в том числе и процессы обогащения полезных ископаемых, предусматривают сгущение и обезвоживание шламов. Целью при этом является оптимальное разделение жидкой и твердой фаз при максимально возможной чистоте жидкой фазы и наиболее низкой влажности сухого вещества твердой фазы. Для достижения этой цели при сгущении угольно-глинистых суспензий в радиальных сгустителях, а также при обезвоживании шлама на камерных и ленточных фильтр-прессах, дисковых вакуум-фильтрах, центрифугах применяются органические синтетические флокулянты. Флокулянты ряда MAGNAFLOC® химического концерна BASF отвечают этим многогранным требованиям: оптимальная надежность процесса, максимально возможная чистота осветленной фазы, наибольшее содержание твердого, разумная стоимость полимеров. Так как обрабатываемые шламы имеют различный состав, флокулянты ряда MAGNAFLOC имеют заряд от высокоанионного через неионогенный до высококатионного. Диапазон молекулярной массы этих продуктов также очень широк: от низкомолекулярных (около 1 млн.) до высокомолекулярных (около 27 млн.).

Суммарное содержание собирателя с флокулянт можно определять спектрофотометрическим методом с БФС, а также использовать ХПК (химического потребления кислорода). Химическое потребление кислорода является показателем содержания органических веществ в воде, выражается в миллиграммах кислорода (или другого окислителя в пересчете на кислород), пошедшего на окисление органических веществ, содержащихся в литре (1 дм³) воды. ХПК используется для оценки степени загрязнения природных и сточных вод органическими соединениями. Потребление кислорода определяется как такая масса окислителя в пересчете на кислород, выраженная в мг/л, при которой весь углерод, водород, сера, фосфор и другие элементы, если они присутствуют в

органическом веществе, окисляются до высших оксидов, а азот превращается в аммонийную соль.

При применении методики определения химического потребления кислорода в процессах атмосферного окисления для оценки концентраций органических загрязнений в воде, а также отслеживания изменений, происходящих с органической массой (реагентами) в процессе атмосферного окисления, определяется бихроматная окисляемость. Стандартизованные методы предусматривают обработку пробы воды серной кислотой и бихроматом калия при определённой температуре в присутствии катализатора окисления.

References / Литература

- [1] Frolov, D.V. (2015). Laboratornye metodiki issledovaniya jeffektivnosti dejstviya flokuljantov. Retrieved from: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2015/RM15/pages/Articles/GI/4/7.pdf>
- [2] Abdulvaliev, R.A., Abdykirova, G.Zh., Dyusenova, S.B. & Imbargaliev, L.M. (2017). Concentration of chromite-containing slimes. *Obogashchenie Rud*, (6), 15-19. <https://doi.org/10.17580/or.2017.06.03>
- [3] Avery, M.J., Junk, G.A. (1987). Procedure for the determination of amines in small urine samples. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*, (420), 379-384. [https://doi.org/10.1016/0378-4347\(87\)80193-7](https://doi.org/10.1016/0378-4347(87)80193-7)
- [4] Pietsch, J., Hampel, S., Schmidt, W., Brauch, H.-J. & Fresenius, E.W. (1996). Determination of aliphatic and alicyclic amines in water by gas and liquid chromatography after derivatization by chloroformates. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, (355), 164-173. <https://doi.org/10.1007/s0021663550164>
- [5] Alekseev, V.N. (1972). *Kolichestvennyj analiz. M.: Himija*
- [6] Lur'e, Ju.Ju., Rybnikova, A.I. (1974). *Himicheskij analiz proizvodstvennyh stochnyh vod. M.: «Himija»*
- [7] Yüit, E., Saridede, Muhlis & Özçimen, D. (2014). The flotation of South African chromite ores in acidic media. *METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 1357-1361
- [8] Pstryak, I.V. (2015). Modeling and analysis of physicochemical processes in recirculating water conditioning. *Journal of mining science*, 51(4), 811-818
- [9] Serebrennikova, M.K., Tudvaseva, M.S. & Kujukina, M.S. (2015). Biologicheskie sposoby ochistki neftezagryaznennyh stochnyh vod (obzor). *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologija*, (1), 15-30
- [10] Gencler, G.L., Sharkov, A.M. (2004). Ochistka stochnyh vod v nefte-pererabatyvajushhej promyshlennosti. *Ekologija i promyshlennost'*, (10), 15-17
- [11] Kongricharoen, N., Polprasert, C. (1995). Electrochemical precipitation of chromium (Cr6+) from an electroplating wastewater. *Water Science Technology*, 31(9), 109 – 117
- [12] Monser, L., Adhoum, N. (2002). Modified activated carbon for the removal of copper, zinc, chromium, and cyanide from wastewater. *Separation and Purification Technology*, (26), 137 – 146
- [13] Amirov, A. (1983). *Ionoobmennaja ochistka stochnyh vod, rastvorov i gazov. L.: Himija*
- [14] Ziajahromi, S., Khanizadeh, M. & Khiadani, M. (2013). Experimental evaluation of nitrate reduction from water using synthesis nanoscale zero-valent iron (NZVI) under aerobic conditions. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 16(2), 205—209. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.16.02.11661>
- [15] Tishkovich, A.V. (1972). *Teorija i praktika ammonizacii torfa. Minsk: Nauka i tehnika*

Ұсақ дисперсті хром кендерін өңдеу технологиясындағы флотациялық концентратты қоюландыру операциялары үшін флокулянт реагенттерін талдау және зерттеу

Б.Б. Абдурзакова*, Л.С. Кауанова, Н.К. Саймағанбетова

«ERG ғылыми-зерттеу және инжиниринг орталығы» ЖШС, Хромтау, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: B.Abdurzakova@erg.kz

Андатпа. Бұл зерттеу TOPFLOC 714, NALCO 8172PULV және Magnofloc 5250 флокулянт реагенттерінің концентрациясының әсер ету дәрежесін анықтаудың инновациялық әдістерінің жүйелендірілген шолуын ұсынады, олар ұсақ дисперсті хром кендерін ауырлық және флотациялық байыту әдісімен өңдеу кезінде Дон ГОК қалдықтарын өңдеу қондырғыларынан шыққан тұнбаны сусыздандыру мақсатында кері айналымдағы суда қолданылады. Сондай-ақ, кері айналымдағы суда флокулянттардың амин компоненттерінің ауырлық және флотациялық байыту технологиялық процестеріне және жабдықтардың коррозиялық төзімділігіне әсерін анықтау қарастырылады. Судың заманауи тазарту әдістеріне шолу жасалды. 2006 жылдан бастап 2023 жылға дейінгі кезеңді қамтитын ұсақ дисперсті хром кендерін өңдеу тазарту қондырғыларынан шыққан тұнбаны сусыздандыру үшін флокулянттардың тиімділігін анықтау әдістемесі бойынша таңдалған 10 ғылыми еңбектің нәтижелеріне жүйелендірілген шолу және аналитикалық бағалау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері оңай қол жетімді, қауіпсіз және арзан биоыдырайтын полимерлерді инновациялық әдістермен қолдануды көрсетеді. Сонымен қатар, зерттеу ауырлық сепараторлары мен флотациялық қондырғылардан кейін оксидті минералдарды қоюландырудың сәтті мысалдарын және ұсақ кенді өңдеу кезінде тазарту қондырғыларының тұнбасын тұндыру кезінде жақсы нәтижелерге қол жеткізуге болатынын көрсетті. Ерітіндінің рН көрсеткіштері полимер тізбектерінің мінез-құлқына әсер етеді. Ауырлық және флотациялық процестерден қалдықтарды тазарту суларының мөлдірлігі қолданылатын флокулянттардың түріне де, концентрациясына да байланысты. Ұсақ дисперсті хром кендерін өңдеу қондырғыларының тұнбасын сусыздандыру әдістеріне жүйелендірілген шолу жүргізілді және таңдалған әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері талданды. Жалпы, зерттеу нәтижелері флокулянт реагенттерін қолданудың маңыздылығын және ұсақ дисперсті хром кендерін тұндырудың инновациялық әдістерін қолдану байытудың тиімділігін арттыру және ресурстарды пайдалану тиімділігін жақсарту үшін маңызды екенін көрсетеді.

Негізгі сөздер: ұсақ дисперсті хром кені, өңдеу, байыту әдістері, флокулянт, флокконцентрат, қоюландыру.

Анализ и исследование реагентов - флокулянтов для операций сгущения флотационного концентрата в технологии переработки мелкодисперсных хромовых руд

Б.Б. Абдурзакова*, Л.С. Кауанова, Н.К. Саймағанбетова

ТОО «Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG», Хромтау, Казахстан

*Автор для корреспонденции: B.Abdurzakova@erg.kz

Аннотация. Это исследование представляет собой систематизированный обзор инновационных методов определения степени влияния концентрации реагентов - флокулянтов TOPFLOC 714, NALCO 8172PULV и Magnofloc 5250 в оборотной воде с целью обезвоживания осадка очистных сооружений при переработки мелкодисперсных хромовых руд на гравитационно-флотационным методом обогащения лежалых шламовых хвостов Донского ГОКа. Также определение степени влияния аминных компонентов флокулянтов в оборотной воде на технологические процессы гравитационного и флотационного обогащения и коррозионную устойчивость оборудования. Предоставления обзора современных методов очистки вод. Был проведен систематизированный обзор и аналитическая оценка результатов, выбранных 10 научных трудов на тему, методика определения эффективности работы флокулянтов для обезвоживания осадка очистных сооружений переработки мелкодисперсных хромовых руд, охватывающих период с 2006 года по 2023 год. Результат исследования показывает использования легкодоступных, безопасных и дешевых биоразлагаемых полимеров на инновационных методах. Кроме этого, исследование показало примеры успешного применения на сгущении оксидных минералов после гравитационных сепараторов и флотационных аппаратов для получения хороших показателей при осаждениях осадка очистных сооружений при переработке мелкодисперсных руд. Показатели рН раствора оказывает влияние на поведении цепей полимера. Осветление техногенных вод отходов гравитации и флотации зависит как от типа, так и от концентрации применяемых флокулянтов. Был проведен систематизированный обзор методов по обезвоживания осадка очистных сооружений переработки мелкодисперсных хромовых руд с анализом преимуществ и недостатков выбранных методов. В целом, результаты подчеркивают важность применения реагентов

- флокулянтов и применения инновационных методов осаждения мелкодисперсных хромовых руд для повышения эффективности обогащения и улучшения использования ресурсов.

Ключевые слова: мелкодисперсные хромовые руды, переработка, методы обогащения, флокулянт, флотоконцентрат, сгущение.

Received: 28 September 2023

Accepted: 15 August 2024

Available online: 31 August 2024

The effectiveness of the use of geophysical research in the underground development of ore deposits

S.A. Istekova, D.N. Tolybayeva*, L.D. Issayeva, Z.N. Ablessenova, M.A. Talassov

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: dina_tol@mail.ru

Abstract. The article is devoted to reviewing the issues related to the application of geophysical methods for solving the problems of monitoring the development of solid mineral deposits. The problems considered in the work are highly relevant in connection with the recent increase in the frequency of natural and man-made disasters caused by the disturbance of the rock mass during the construction of mine workings and the exploitation of ore deposits developed by underground methods. This is especially pertinent for deposits at a late stage of development. Based on an analysis of foreign and domestic scientific literature, the authors provide a detailed examination of the possibilities of using various modifications of geophysical methods in the mining industry at the stages of deposit development and operation. Particular attention is paid to the efficiency of seismic exploration methods in monitoring the development of ore deposits mined by underground methods at great depths. It is shown that the use of geophysical methods is one of the most effective ways to account for the behavior of natural and technical systems in underground workings, depending on the current state of the geological environment and artificial impacts on rock massifs. A well-founded conclusion is made that systematic monitoring and prevention of the technogenic state of underground workings, as well as the study of the current state of the rock mass and ore deposits in hard-to-reach areas using modern geophysical technologies, form the basis for the effective and safe development of long-exploited solid mineral deposits. The presented review is used for the scientific and practical substantiation of research work carried out by a team of specialists from KazNITU named after K.I. Satpayev, focused on developing a technology for assessing the geomechanical state of mined-out spaces using seismic methods during underground mining of minerals in the complex mining and geological conditions of copper sandstone deposits in Kazakhstan.

Keywords: *geophysical monitoring, underground works, mineral deposits, geomechanical characteristics.*

1. Кіріспе

Күрделі геологиялық түзілімдер мен пайдалы қазбалар кен орындарының құрылымы мен шығу тегін, оларды өндіру тәуекелдерін азайту мақсатында зерттеу, қатты пайдалы қазбалар кен орындарын тиімді және қауіпсіз игеруді қамтамасыз етудің негізгі міндеті болып табылады.

Күрделі және проблемалық геологиялық модельдер көбінесе үлкен тереңдікте орналасқан, дизъюнктивті тектоникалық, блоктық құрылымды, тау жыныстарының литологиялық және фашиалды құрамының алуан түрлілігі, кен денесі мен қоршаған ортаның күрт өзгерген әртекті рудалық кен орындарында байқалады [1,2].

Кен орнын осындай жағдайда ұзақ уақыт игеру процесінде тау-кен жұмыстары тау-кен массаларында жарықтар, қуыстар, көшкіндер мен иілу аймақтары сияқты техногендік әртектіліктің пайда болуына, сондай-ақ су өткізетін жарықтардың және игеріліп жатқан массивтердің физикалық-механикалық сипаттамаларының өзгеруіне байланысты басқа да құбылыстардың пайда болуына әкеледі.

Пайдалы қазбаларды жер асты игеру әдісімен өндіруде тау-кен кәсіпорындарындағы апаттардың көбеюі геологиялық құрылымды тереңірек зерттеу мен

мониторинг процесінің қажеттілігін туындатады. Геологиялық және техногендік шығу тегі бар аномалиялы күрделі аймақтарды, әсіресе игеріліп жатқан өнімді қабаттардың үстінде орналасқан тау жыныстары қабаттарын анықтауға ерекше назар аудару керек.

Рудалық пайдалы қазбалардың кен орындарын тиімді игерілуі геологиялық ортаның өзгеруіне және жасанды массивтің кернеулі-деформациялық күйіне әсер ететін жерасты жұмыстарындағы табиғи-техногендік жүйелердің әрекетін есепке алудың толықтығы мен зерттелуіне байланысты (Дребенштедт; Рыльникова). Жоғарыда айтылғандарға байланысты рудалық пайдалы қазбалар кен орындарын тиімді және қауіпсіз игерудің негізі - жерасты қазбаларының техногендік жағдайын бақылау және алдын алу болып табылады. Қазіргі заманауи геофизикалық зерттеу әдістерін қолдану бұл мәселелерді шешуге айтарлықтай көмектеседі.

2. Зерттеу әдістері мен материалдар

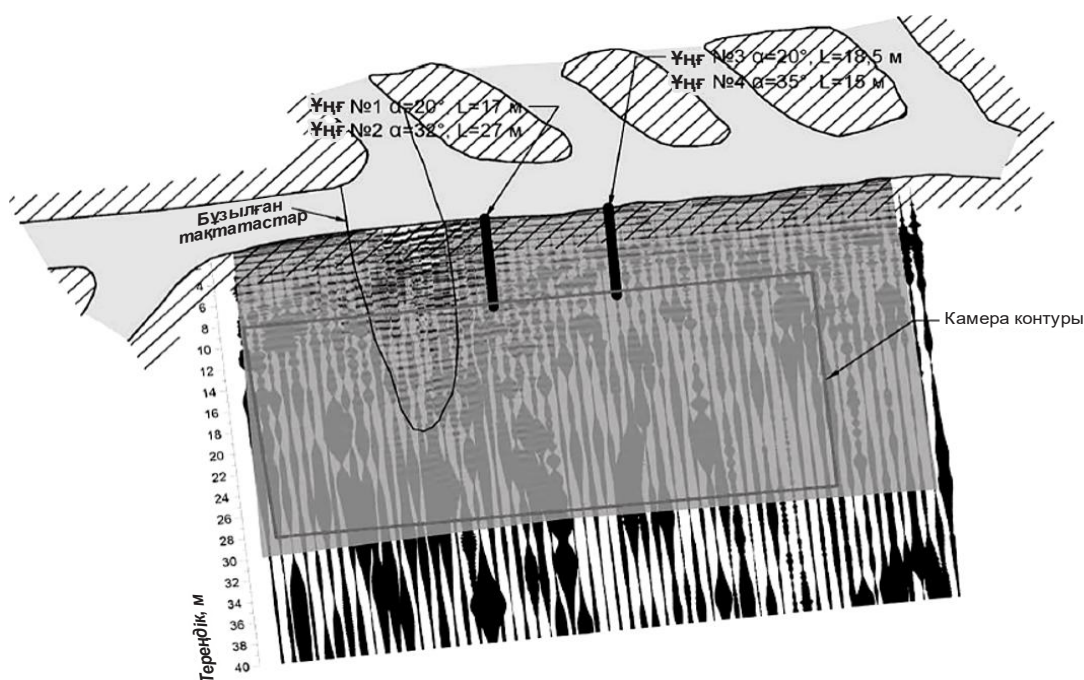
Пайдалы қазбаларды игеруді бақылаудың геофизикалық әдістері - пайдалы қазбалар кенорындарын игеруді бақылау мәселелерін шешудің тиімді әдістерінің бірі болып табылады, сондықтан олар тау-кен, мұнай және газ өнеркәсібінде кеңінен қолданылады. Заманауи

геофизикалық құрал-жабдықтар жер қыртысының жоғарғы бөлігіндегі табиғи-техногендік объектілерді қашықтықтан барлауға және бағалауға, құрылымдық біркелкі еместіктерді, тектоникалық бұзылуларды, қуыстарды, әртүрлі тереңдіктегі тау жыныстары массаларындағы әртүрлі орталардың жанасу аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді [3–5]. Алынған нәтижелердің дәлдігі қолданылатын геофизикалық әдіске, геологиялық ортаның өзгеру сипатының күрделілігіне және кен денелерінің параметрлеріне, сонымен қатар кен орнын игеру және пайдалану технологиясына байланысты.

Қазіргі таңда дүние жүзінің көптеген елдерінде (Ресей, АҚШ, Австралия, Еуропа, Канада, Оңтүстік Африка және т.б.) тау жыныстарының массивін зерттеудің геофизикалық әдістері рудалық кенорындарын игеру тиімділігі мен қауіпсіздігін арттыруда кеңінен қолданылады.

Ресей ғылым академиясының Орал филиалының тау-кен ісі институтының мамандары әртүрлі мәселелерді шешу үшін, соның ішінде жерасты шахталары мен карьерлеріндегі стандартты емес есептерді шешу мақсатында геофизикалық әдістерді кеңінен қолданады. Осы міндеттердің бірі – «С.М. Киров атындағы Шахта» оқпанындағы топырақ тығынының қалыңдығын және тірек сынықтарын анықтау, оны оқшаулау мүмкіндігін бағалау және апатты оқпанда игеру жұмыстарын тоқтату бойынша қажетті шараларды әзірлеу. «Жер асты кенішіндегі тау-кен массивінің геофизикалық

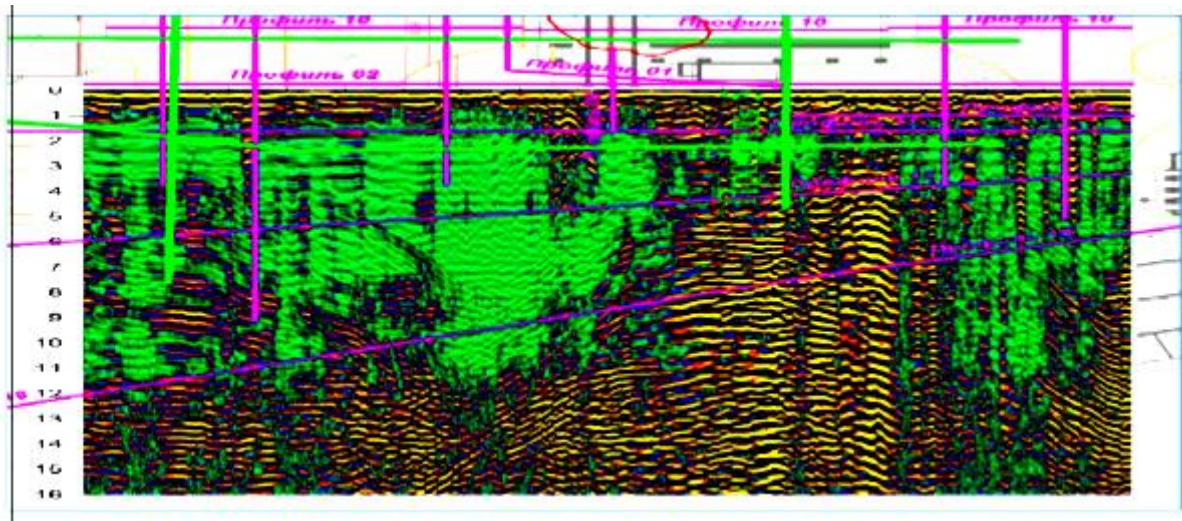
зерттеулері» мақаласында (Т.Ф.Харисов, В.В. Мельник, О.Д. Харисова, А.Л. Замятин, 2015 ж.) зерттеу нәтижелері мен жер бетіндегі радиолокациялық зондтаудың геофизикалық әдістерінің салыстырмалы талдауы және жерасты кені жағдайында спектрлік сейсмикалық профильдеу көрсетілген [6]. Георадар әдісі электр-магниттік толқындардың импульстерін зерттеуге және зерттелетін ортаның әртүрлі объектілерінен шағылысқан сигналдарды тіркеуге негізделген. Спектрлік сейсмикалық профильдеу әдісі массивтің ашық бетіне әсер еткенде пайда болатын тербелмелі процестің спектрлік құрамы мен осы массивтің құрылымдық құрамы арасындағы байланысты анықтауға негізделген. Георадарлық зондтау әдісі, авторлардың пікірінше, жер асты жағдайында, тау жыныстары массиві болған жағдайда ең тиімді болып табылады. Ол тік бағытталған өлшемдерді пайдалана отырып, тау массасындағы әртүрліліктерді, құрылымдық бұзылуларды және басқа да қарама-қарсы объектілерді анықтауға мүмкіндік береді. Спектрлік сейсмикалық профильдеу әдісі тік бағытталған өлшемдерді орындау кезінде тиімдірек, бірақ өлшеу қателіктерінің болуына байланысты зерттелетін аумақта өлшеулердің көбірек санын талап етеді. Бұл әдіс негізгі әдістің нәтижелерін растау немесе тексеру мақсатында қосымша әдіс ретінде өзін жақсы дәлелдеді. Геофизикалық зерттеу нәтижелерінің максималды сенімділігі мен ақпараттық мазмұнына кол жеткізу әдістерді кешендеу арқылы қамтамасыз етілді (1-2-сурет).



Сурет 1. Спектрлік сейсмикалық профильдеу әдісін қолдану арқылы камералардағы бос орындарды іздеу кезіндегі геофизикалық зерттеулердің нәтижелері [6]

2022 жылы дәл осы мамандар шахта оқпанының құрылыс алаңында бұзылған аймақты зерттеу үшін заманауи геофизикалық әдістерді қолдану тәжірибесімен таныстырды. Бұл зерттеулердің өзектілігі тау-кен қазбалар орнын салу және пайдалану кезінде тау-кен массивінің бұзылуымен байланысты табиғи және

техногендік апаттардың кең таралуымен түсіндіріледі («Жерасты кеніштерін салу және пайдалану учаскелеріндегі геофизикалық зерттеулер», Шевченко, М.Д., Мельник В.В., Замятин А.Л., Тау-кен ісі институты, Ресей ғылым академиясының Орал филиалы, 2022) [7].



Сурет 2. Тау массиві бұзылған жерге тікелей жақын орналасқан радиодиаграмма

Жұмыстың мақсаты, кеніш құрылымының құрылыс аймағында жер бетінің бұзылу себептерін анықтау үшін тау жынысы массивінің құрылымдық құрамы туралы мәліметтер алу болды. Зерттеу нысаны кен қазбаларын қоршап тұрған жер бетінде орналасқан күрделі құрылыс объектілерінің негізінде жатқан тау жыныстары болды. Геофизика зерттелетін аумақтағы тау жотасының құрылымдық бұзылулар аймағын анықтауға, қауіпті жағдайлардың даму себептерін анықтауға және жағдайды тұрақтандыру бойынша шешімдер қабылдауға бағытталған.

Ұсынылған зерттеулердің нәтижелері бойынша жер бетінің құлау себептері және аумақтың барлық құрылымының ерекшеліктері анықталды. Тау жыныстарына антропогендік әсердің (шахта окпанының құрылысы) әсерінен геологиялық ортада өзгерістер орын алып, жер бетінде бұзылудың пайда болуына әкелетіні анықталды. Георадар мәліметтері бойынша бұзылу аймағы құрылымдық бұзылумен белгіленді, ол соққы бойымен тік сейсмикалық профильдеу нәтижелерімен жақсы сәйкес келді, бірақ барлау барысында массивтің үздіксіздігінде, учаскеде немесе ғимаратта қосымша бұзылу аймақтары табылмады. Құлау кратерінің қалыптасу процесінің аяқталуы айқын болды. Ұсынылған геофизикалық зерттеу әдістерін біріктіру мәселені шешуде олардың жоғары тиімділігін көрсетті; алынған ақпараттың сенімділігі осы салада жүргізілген бұрғылау және игеру жұмыстарының нәтижелерімен расталды [7].

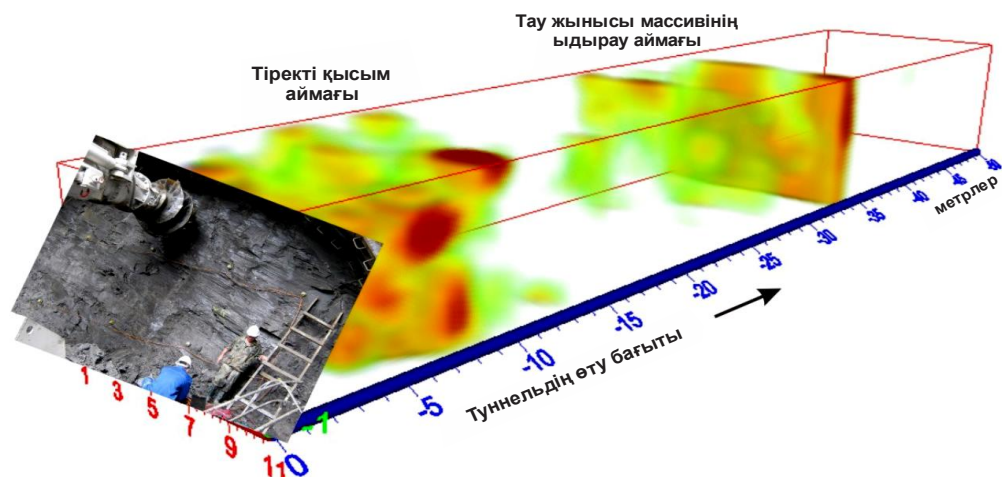
Орал мемлекеттік тау-кен институтының (РФ) мамандары әзірлеген «МИКОН-ГЕО» бағдарламалық-аппараттық кешені (Писецкий В.Б., Лапин С.Е., Зудилин А.Е., Патрушев Ю.В., Шнайдер И.В., 2017 ж.) рудалық және көмір кен орындарын жерасты өндіру кезінде тау-кен массасының тұрақтылық жағдайын бағалау және қауіпті геодинамикалық құбылыстарды болжау үшін сәтті қолданылды. Жер асты кенішінен бірнеше метрден алғашқы ондаған және жүздеген метрге дейінгі қашықтықтағы тау-кен массаларының кернеулі-деформациялық күйінің (КДК) құрылымы мен параметрлерінің мәндерін қашықтықтан бағалау сейсмикалық әдістерді қолдануға негізделген. Жерасты тау-кен өндіру технологияларының (механикаландырылған және жару) ерекшеліктерін ескере отырып, МИКОН-ГЕО технологиясы сейсмикалық-жергіліктеу бойынша шолу нұсқасын-

да шағылысқан толқындар әдісін қолданады (салыстырмалы түрде қысқа негізде массивті «көру» мүмкіндігімен бірнеше қабылдау жүйесі – медицинадағы ультрадыбыстың төмен жиілікті аналогы). «Индукциялық немесе эмиссиялық сипаттағы сейсмикалық толқын өрісі сейсмикалық толқындардың шағылу, берілу немесе шығару нүктелеріндегі сейсмикалық толқынның «кіші» кернеулерінің тензорын тау жынысы массивінің сол нүктелерінде әрекет ететін «үлкен» кернеулердің тензо-рымен байланыстырады» [8].

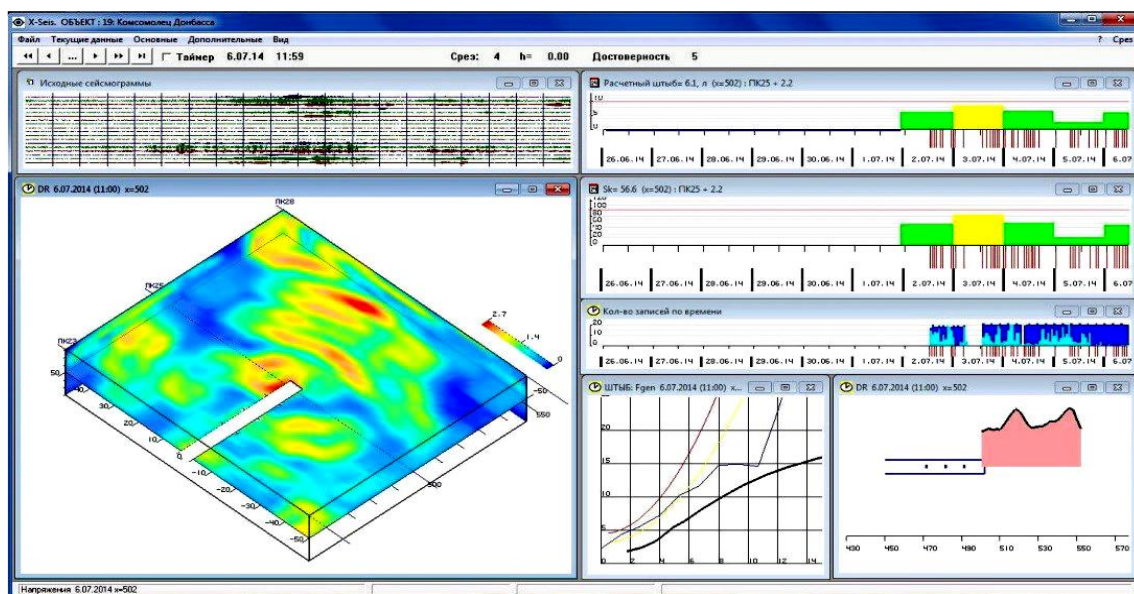
Толқындық өрістердің импульстік (балға соққылары, гидравликалық балғалар, жарылыс саңылауларындағы жарылыстар және т.б.) және кодтық-импульстік түрлері (шахта роторы) козуының көздері 50–100 м-ге дейінгі шағылысқан толқындық сигналдардағы массивтің шолуын қамтамасыз етеді. Мамандандырылған сейсмикалық МИКОН-ГЕО жүйесі 2012 – 2015 жж Орал, Печерск, Донецк және Кузнецк бассейндеріндегі (СУБР, Алмазная, Комсомолец Донбасса, Байкаимская, Распадская, Юбилейная, Есауылская және т.б. шахталар) рудалық және көмір шахталарында сынақтан өтіп, тәжірибелік өнеркәсіптік пайдалануға енгізілді. 3-суретте туннельдердің құрылысын бақылау процесі кезінде туннель беткейінен 50 м ілгері орналасқан тау-кен массивінің типтік сейсмикалық бейнесі көрсетілген, онда тіреуіш қысым және тау жынысы массивінің ыдырау аймақтарымен байланысты шағылысқан толқындардың сигналдарын жазудың сипаттамалық интервалдары анық көрсетілген.

4-суретте МИКОН-ГЕО жүйесі диспетчерінің мониторының бейне түсірілімі көрсетілген, ол КДК бағалау үшін қазба жұмыстары кезінде сейсмикалық барлау текшесін үздіксіз көрсетеді.

Шахталық бақылау қызметінің сұранысы бойынша дәл сол монитор өткен кезеңдегі, ағымдағы бақылау сәтіндегі және берілген аралықтағы «алға» игеру жұмысының осі бойымен жалпы тау қысымының мәндерінің салыстырмалы бағалауының бірқатар графиктерін көрсетеді; бастапқы ақпарат (импульстік форматтағы түрлендіруден кейінгі сейсмограммалар); тау-кен жұмыстарын тоқтату режимдеріндегі сейсмикалық оқиғалардың жиілігі мен жинақталған энергиясының, комбайнның кенжарға әсер ету энергиясының графиктері және т.б.

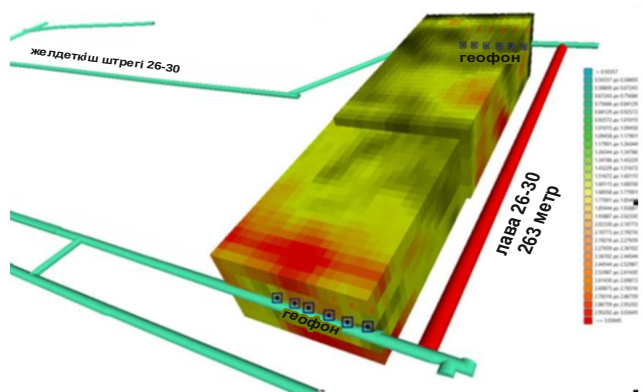


Сурет 3. Тасымалдау туннельі кенжарының алдындағы тау жынысы массивінің сейсмикалық барлау деректері негізінде қысым өзгерісінің салыстырмалы мәндерін бағалаудың кеңістіктік бейнесі [8]



Сурет 4. «Комсомолец Донбасса» шахтасының дайындық тау-кен процесін ағымдағы сейсмикалық бақылауға арналған жерүсті қызметінің МИКОН-ГЕО жүйесіндегі диспетчердің монитормының бейнесі, Донецк қ, 2014 жс. [8]

5-суретте Есауль кенішінің ұзын қабырғасындағы тау-кен массивінің жай-күйін ағымдағы бақылаудың нәтижесі көрсетілген. (Кузбасс, 2014ж.).



Сурет 5. Екі тәуелсіз МИКОН-ГЕО жүйесінен алынған КДК нормативтік бағалауларындағы тазаланатын кенжарының ағымдағы сейсмикалық бақылауының композиттік кубы (Есаульская шахтасы, Кузбасс, 2014жс.)

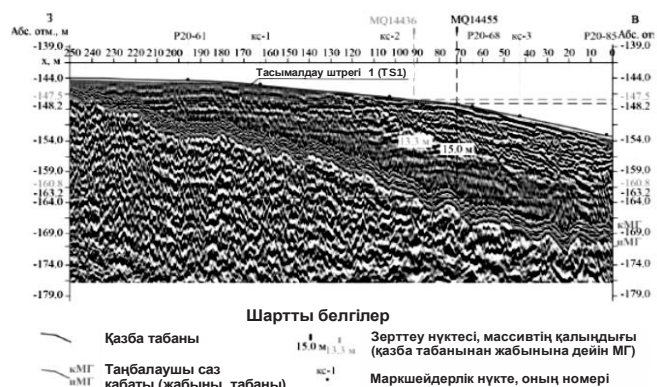
Бұл сынақтардың ерекшелігі тазаланатын кенжардың ұзындығы 263 м лаваның екі жағында тәуелсіз жұмыс істейтін екі МИКОН-ГЕО жүйесін бір уақытта пайдалану болып табылады. Осы нұсқада кернеу күйінің реттеу бірліктерінде алынған екі тәуелсіз параметрлік текше массивінің (литр када) түйісу аймағында айтарлықтай бұрмаланусыз қисынды түрде бір текшеге біріктірілген.

Георадар әдісін пайдалану жер бедеріндегі жағдайларға байланысты қиындайтын жағдайларда, жалпы тереңдік нүктесі (ЖТН) әдістемесінде көлденең толқындардағы шағылысуларды бөлуде шағылған толған толқындар әдісін (ШТӨ) пайдалана отырып, сейсмикалық барлауды қолдануға болады [9].

Жобаланып жатқан су оқшаулағыш ғимаратының аймағындағы тау-кен-геологиялық жағдайларын зерттеу Верхнекамск тұз кеніші шахталарының бірінің шахтасында жүргізілді. Жобаланып жатқан су оқшаулағыш ғимаратына жақын орналасқан массив геологиялық әртектіліктердің болмауын қамтамасыз ету үшін сенімді түрде зерттелуі керек. Астыңғы тас тұзы қабатының жұмысында көпірлер салу кезінде кен

орнының бүкіл аумағында қабаттың жоғарғы бөлігінде орналасқан таңбалаушы саз қабатының гипсометриясын ескеру қажет [10]. Таңбалаушы саз қабатының физикалық қасиеттері негізгі тұздардан өте қатты ерекшеленетіндіктен және оны құрайтын саздар жоғары өткізгіштікпен сипатталатындықтан, тұзды ерітінділер ол арқылы ағып кетуі мүмкін. Таңбалаушы саз қабатына жақын жерде су оқшаулағыш ғимаратын салу тиімсіз, яғни барлық кеткен күш зая кетуі мүмкін.

Кешенді геофизикалық зерттеулерге жерге енетін радиолокация және шағылысуларды бөлу арқылы көлденең толқындардағы сейсмикалық барлау кіреді. Жерге енетін радиолокациялық әдіспен жұмыс жасау барысында стандартты мәліметтерді алуға әсер ететін негізгі жағымсыз факторлар анықталды. Олар жер бетіндегі жағдайлармен, дымқыл қоқыстардың және тұзды балшықтардың болуына байланысты. Сонымен қатар, геоэлектрлік учаскелерде таңбалаушы саз қабатының жабыны мен табанын нақты байқауға болады (6-сурет).

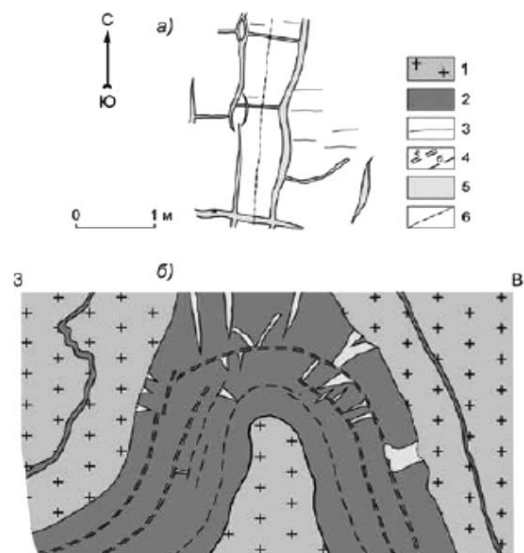


Сурет 6. Тасымалдау штрегі бойынша геоэлектрлік қима TS1

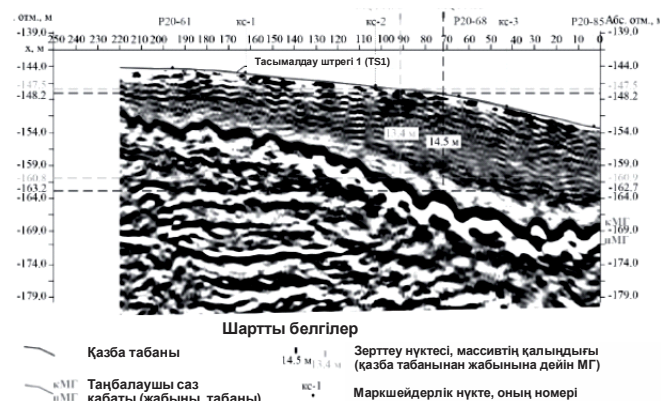
Астыңғы тас тұзының жоғарғы бөлігіндегі кесінділерде бір метрден аспайтын қатпар амплитудалары бар типтік бірінші ретті қатпарлар байқалады. Геологиялық тұрғыдан алғанда, таңбалаушы саз қабатының бойымен қатпарлану ерекше қызығушылық тудырады, жеке қатпарлардың амплитудалары 5м-ге, ал ені шамамен 10м-ге жетеді. Мұндай қатпарларда галитпен толтырылған жарықтар болуы мүмкін (7-сурет).

Астыңғы тас тұзы қабатының жергілікті әртектілігі анықталмады. Сондықтан жер асты радары үшін қолайсыз жерлерде мәселені шешу үшін көлденең толқындарын пайдалана отырып, шахталық сейсмикалық барлау әдісі қолданылды. ШБКТ шағылысу бөлінуі бар көлденең толқындар деректерін өңдеу және талдау нәтижесінде астыңғы тас тұзы қабатының жұмысында профильдер бойымен төменгі жарты кеңістіктің тереңдік қималары алынды. Тасымалдау штрегінің (TS1) бойындағы төменгі жарты кеңістіктің учаскелерінде таңбалаушы саз қабатының жабынына сәйкес келетін шағылысатын шекара анық көрінеді (8-сурет).

Пайдаланылған кешен геологиялық учаскенің мақсатты аралығын тез және нақты зерттеуге мүмкіндік берді, осылайша тау-кен мәселелерін жобалау және шешу үшін бастапқы мәліметтерді алуға мүмкіндік берді.



Сурет 7. Таңбалаушы саз қабатындағы жарықшақтардың бойлық және көлденең жатыстары: 1- тас тұзы, 2-TC қабат жыныстары, 3-бөлінген жарықшақтар, 4-келісімді жарықшақтар, 5- қызғылт-сары галит; 6-қатпар осі



Сурет 8. Тасымалдау штрегі TS1 бойымен сейсмикалық-геологиялық қима

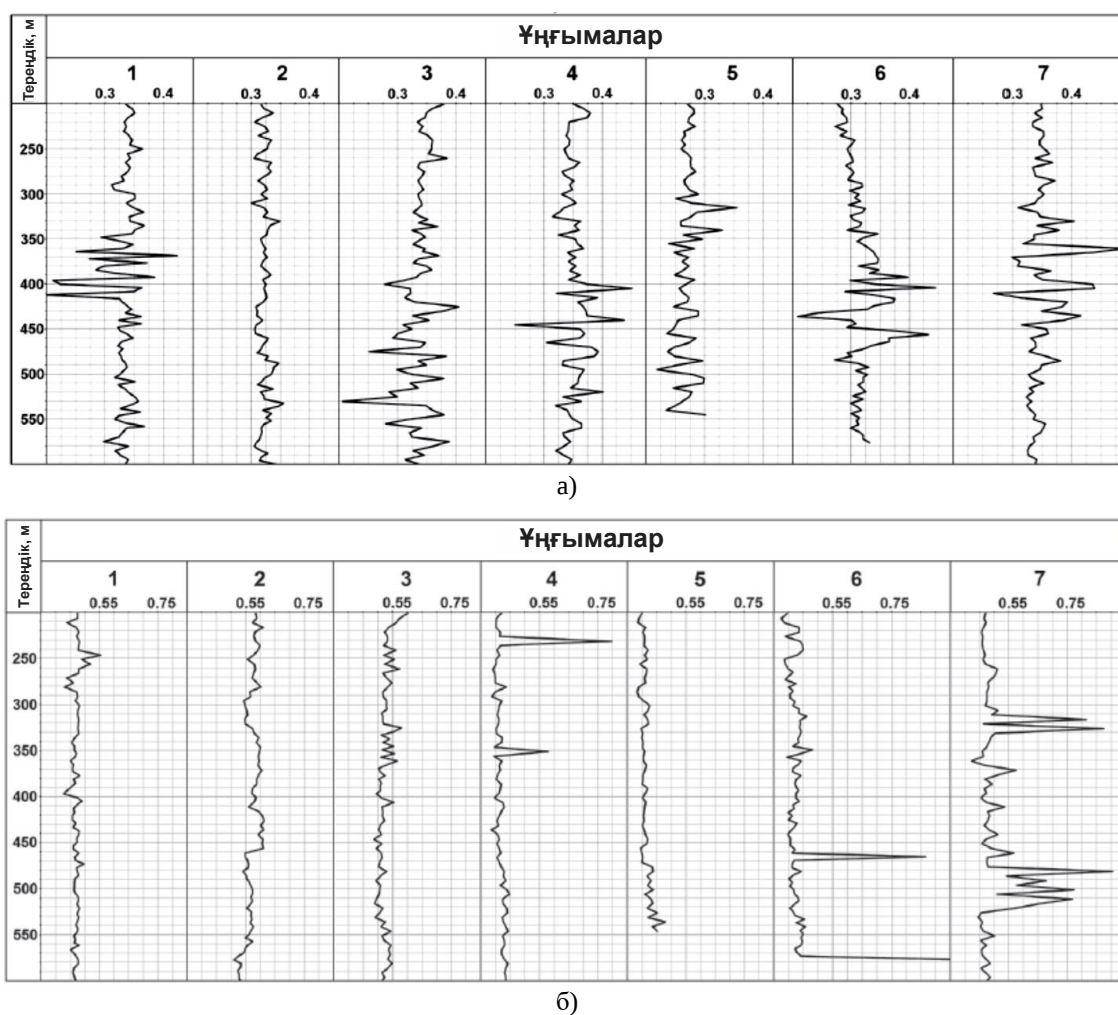
Жүргізілген зерттеулер су оқшаулағыш ғимарат жобаланатын аумақтағы тас тұзының астыңғы қабаты бойымен салыстырмалы түрде таяз тереңдікте жатқан таңбалаушы саз қабатының гипсометриясын анықтауға мүмкіндік берді.

Геофизикалық қималарда таңбалаушы саз қабатының қарқынды қатпарлануы көрсетілген. Зерттеу нәтижелері бойынша тау-кен мәселелерін шешу үшін таңдалған геофизикалық әдістер кешенін пайдалану өте тиімді екені анықталды.

Солтүстік-Тараташ ауданындағы темір рудалы кен орны аумағында, магнетиттік кварциттердің Куватальдық кездесуі шегінде дизъюнктивті тектоникалық бұзылулардың геодинамикалық белсенділігін анықтау және бағалау мақсатында ұңғы және жер үсті геофизикалық әдістерін біріктіру нәтижелері жүргізілді. Ұңғыманы зерттеуге геоакустикалық эмиссия (ГАЭ) және электр-магниттік сәулелену (ЭМС) сигналдарын жазу кірді. Жерүсті геофизикалық жұмыстар кешені аумақтық магнитометриялық түсірілімнен, жаяу гамма түсірілімінен және эманациялық түсірілімнен тұрды.

Осы учаскедегі ұңғымалардағы геоакустикалық эмиссия мен электр-магниттік сәулелену сигналдарын зерттеу нәтижелері бойынша тектоникалық бұзылулардың жақын болуына байланысты ауытқулар анықталды. Ұңғымаға жақын кеңістіктегі геологиялық ортаның геодинамикалық белсенді тектоникалық бұзылыстарын анықтауға мүмкіндік беретін геоакустикалық эмиссияның және электр-магниттік сәулелену сигналдарының жиілік диапазоны белгіленді. Каротаж нәтижелерін растау үшін зерттелетін ұңғымалар аймағында жер үсті геофизикалық жұмыстар жүргізілді.

Орындалған жұмыс барысында аномалиялы магнит өрісі мен экспозициялық доза жылдамдығының карталары, сондай-ақ радонның көлемдік белсенділігінің графиктері алынды. Жұмыс алаңының құрылымы туралы қолда бар геологиялық ақпаратты талдау, ұңғымаларды өлшеу және жер үсті геофизикалық зерттеулері нәтижесінде белгілі тектоникалық бұзылулар расталды және зерттелетін геофизикалық өрістерде олардың геодинамикалық белсенділігін көрсететін жаңа геотектоникалық бұзылыстар анықталды. [11].



Сурет 9. Сигналдарды жазу: а) электр-магниттік сәулелену, б) жеті ұңғымадағы геоакустикалық эмиссия

Каротаж нәтижелері электромагниттік өріс сигналдарының геоакустикалық және электр-магниттік құрамдастарының өлшенген және есептелген параметрлерінің диаграммалары түрінде ұсынылған. 9-суретте Н параметрінің үш жиілік диапазонындағы диаграммалары көрсетілген. 100–500 Гц (Н1) жиілік диапазонында алғашқы үш ұңғымада ГАЭ фондық мәндері бірдей дерлік деңгейде, ал қалған төрт ұңғымада тау жыныстарының жанасу аймақтарымен кеңістікте сәйкес келетін жергілікті ауытқулар бар.

Н2 параметрі бойынша (500–5000 Гц) барлық ұңғымаларда ГАЭ сигналдарының аномалиялы өзгерістері байқалады. Бұл жұмыс аймағы үшін ең сезімтал параметр Н4 (2500–5000 Гц) болып табылады. Барлық ұңғымаларда Н4 параметрінің жергілікті аномалиялар ғана емес, сонымен қатар жарықшақ

процестерінің болуын көрсететін фондық деңгейдің сатылы өзгеруі байқалады. Ұқсас жағдай ГАЭ сигналдарының тік сенсорынан алынған деректерді салыстыру кезінде байқалады. ЭМС және ГАЭ параметрлерін бірге қарастырған кезде геоакустикалық эмиссия параметрлері бойынша негізінен жергілікті аномалиялар ЭМР параметрлері бойынша анықталған ұңғыма маңындағы кеңістіктегі тау жыныстарының кернеулі-деформациялық күйінің аймақтарын белгілейтіні анықталды. Бұл ұңғымаларды бұрғылау кезінде геологиялық ортаның үздіксіздігінің бұзылуынан туындаған кернеулі-деформациялық жағдайдың жоғарылауы аймақтарының шекарасында белсенді жарықшақтар түзілу процестерінің болатынын көрсетеді.

Жер бетіндегі геофизикалық зерттеулердің нәтижелері бойынша ΔT_a аномалиялы магнит өрісінің

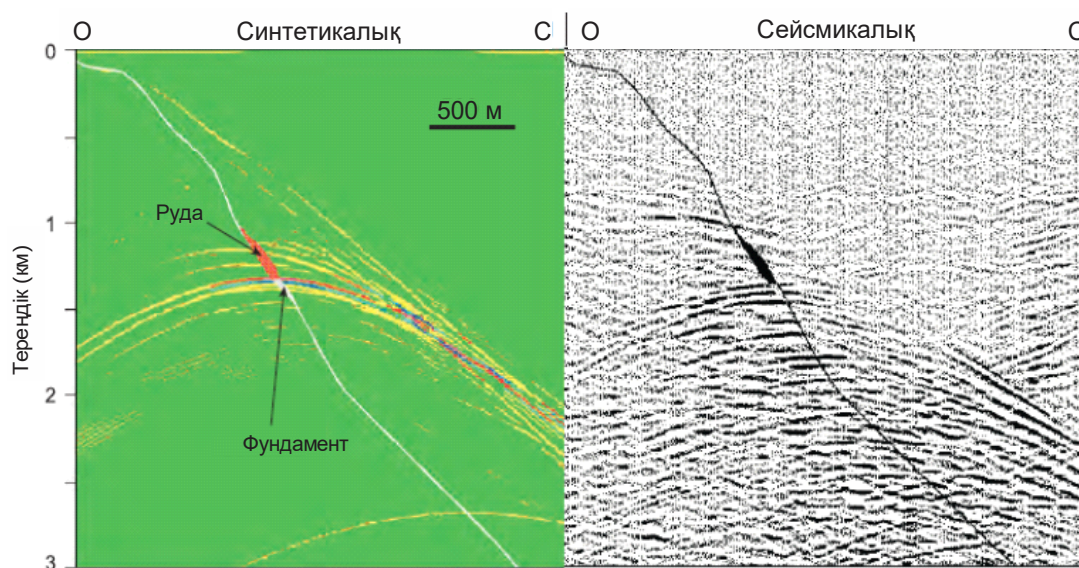
және экспозициялық доза жылдамдығының (ЭДЖ) карталары құрастырылды. Нәтижесінде тектоникалық бұзылулар зонасы анықталды, ол геологиялық деректерден белгілі жарықшақтан зерттелетін аумақтың оңтүстік-шығыс бөлігіне дейін созылатын тартылыс сызығы болып табылады. Жердің магниттік өлшемі мен жаяу гамма түсірілімдерінің нәтижелерін салыстыру кезінде алынған мәліметтердің нәтижелері қолда бар геологиялық ақпаратпен үйлеседі.

Тұтастай алғанда, геоакустикалық эмиссия параметрі H_4 (2500–5000 Гц) магнетиттік кварциттердің куватальды кездесуі шегінде крекинг процестеріне ең сезімтал екені анықталды. Электр-магниттік сәулелену параметрі зерттелетін аумақ шегіндегі дизъюнктивті тектоникалық бұзылулардың көрсеткіші ретінде әрекет етеді, олардың бар болуы тек геологиялық деректермен ғана емес, сонымен қатар жерүсті геофизикалық әдістермен де расталды.

Көмірлі массивінің құрылымы мен күйінің тау-кен-геологиялық жағдайларын болжау үшін көмір қабатының және оның айналасындағы жыныстардың пайда болу жағдайларын зерттеуде шахта геофизикасының әдістері сәтті қолданылады. Бұл ретте шешілетін негізгі міндеттер мыналар болып табылады: көмір қабаттарының шағын амплитудалы тектоникалық бұзылыстарын болжау, көмір қабаттарының жабынын (топырақтарының) ұлғайған жарылу аймақтарын болжау, жабыны қиын және оңай құлайтын аумақтарға саралау; газдың және тау жыныстарының кенеттен бөлінуінен, кен қазбаларына жер асты суларының кенеттен жарылып

кетуінен туындаған қауіпті орындарды (учаскелерді) болжау; көмір қабатының морфологиялық бұзылыстарын болжау (эрозиялар, сұйылтулар, ауыстырулар және т.б.); тау-кен-геологиялық асқинулардан туындаған қауіпті аймақтарда қауіпсіз және тиімді жұмыс жүргізу үшін көмір қабаттарын өндірудің тау-кен-геологиялық жағдайларын кешенді геологиялық-геофизикалық болжау [12].

Тәжірибеде кен орындарын игеруді бақылау үшін сейсмикалық барлауды қолдану мүмкіндігі белгілі (4D сейсмикалық барлау). Бұл бағытта кенорындарының пайдаланылған блоктарын анықтау және кенорнын одан әрі тиімді игеру үшін жерасты қазбаларының үлгілерін салу бойынша кен орындары үшін оң нәтиже бар. Крейтон сульфидті кен орнындағы синтетикалық және байқалған 2D көшірілмеген учаскенің және Садбери аймағындағы (Канада) Гертруда кенорнының массивтік сульфидті кенорнының талдауы кен массивінің тиімдеген және өндірілген бөліктері арасындағы шекараны сейсмикалық сигнал энергиясының таралу бағыты мен сипатына қарай анықтау мүмкіндігін көрсетеді. [13]. Сейсмикалық мәліметтерді модельдеудің осы және басқа нәтижелері линза тәрізді кенорындарының түсу бағытында тікелей шашыраудың таралуын көрсетеді, ал сейсмикалық толқындардың амплитудасының үлкендігімен кенорнының максималды дифракциялық реакциямен сипатталатын өндірілген учаскесінің шекарасы анықталады (10-сурет).



Сурет 10. Садберидегі Гертруда кенорнындағы массивті сульфидті кен орнынан синтетикалық (сол жақта) және байқалған (оң жақта) шағылыстар. Кен денесінің жоғарғы жағындағы сейсмикалық толқындардың дифракциясы кен орнының тиймеген және өндірілген бөліктері арасындағы шекараны көрсетеді. (Milkereitetal, 1996)

3. Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Жоғарыда келтірілген мысалдардан көріп отырғанымыздай, қазіргі заманғы сейсмикалық зерттеу әдістерінің басқа геофизикалық мәліметтермен үйлесуі жер асты жұмыстарының тау жыныстарының массивтерінің әртекті аймақтарын сипаттайтын толқындық өрістің ерекшеліктері туралы қосымша ақпарат алуға мүмкіндік береді. Бүгінгі таңда жер асты

(шахталық) сейсмикалық барлау жұмыстары кен қазбалары арасындағы сейсмикалық көріну әдісін (СКӨ), жалғыз кеніш жұмысынан шағылысқан толқындар әдісін (ШТӨ) және жалғыз қазба түбіндегі сейсмикалық-акустикалық орналастыру әдісін қолдана отырып жүргізеді. Ал жер үсті зерттеулері (ШТӨ, ЖТНӨ) өндірілген кен орындарының аумағында жерасты жұмыстарының әркелкілігін бағалауға және бақылауға мүмкіндік береді.

Бүгінгі таңда Қазақстанның кенді аудандарының көпшілігі жер бетінен біршама жақсы зерттелді және таяз және оңай ашылатын кен орындарының қоры іс жүзінде таусылды. Облыстың едәуір бөлігінде 1000-1500 метр және одан да көп тереңдіктегі кен орындарының біркелкі еместігін іздеу және зерттеу міндеті тұр. Мұндай мәселелерді шешу кезінде кенді аудандардың, кен орындары мен кен орындарының көлемдік геологиялық құрылымының ерекшеліктерін зерттеуге және қолдануға негізделген, яғни көлемдік геологиялық модельдеуге негізделген тікелей іздеу әдістері жанама әдістермен ауыстырылады.

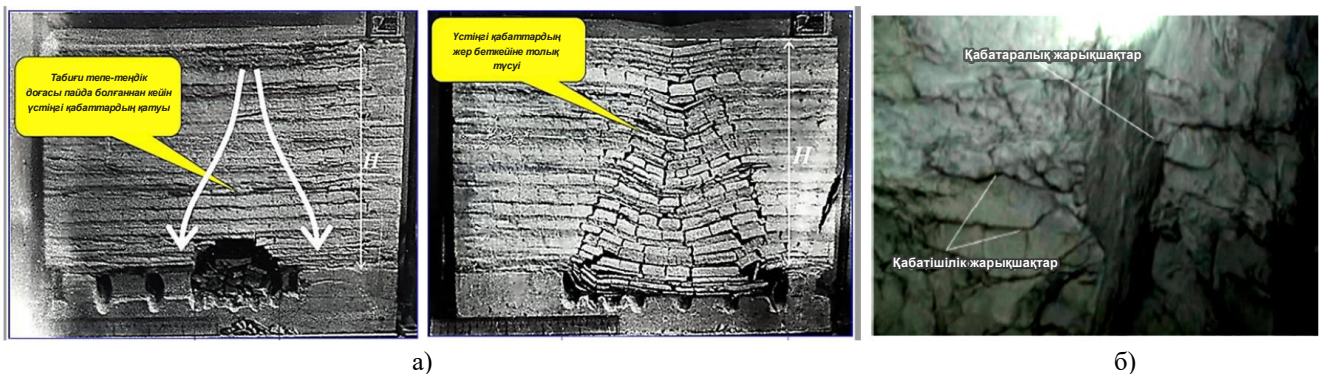
Қазіргі уақытта Қазақстанда қатты пайдалы қазбалар кенорындарын игеруге геофизикалық бақылау өте шектеулі деңгейде жүргізілуде. Қазақстан нарығында кен орындарындағы жерасты қазбаларының техногендік жағдайын бақылау және алдын алудың геофизикалық әдістерін қолдану бойынша отандық және шетелдік компаниялардан ұсыныстар іс жүзінде жоқ.

Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің бір топ ғалымдары «Кешенді геомеханикалық және геофизикалық зерттеулер негізінде кенді кен орындарын игеру кезінде тау-кен массивтерінің кернеулі-деформациялық күйін модельдеу» тақырыбы бойынша ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізу үшін мемлекеттік грантка ие болды. Жоба Қ.И.Сәтпаев атындағы ҚазҰТЗУ ғылыми тобының кешенді геомеханикалық және геофизикалық зерттеулер негізінде күрделі тау-кен-геологиялық жағдайларда рудалы пайдалы қазбаларды жерасты өндіру кезінде өндірілген кеңістіктің геомеханикалық күйін бағалау технологиясын әзірлеу бойынша ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізуді қарастырады. Жезқазған типті мысты құмтас кен орнының игерілген

учаскелерінің бірінің мысалын пайдалана отырып, геомеханикалық және геофизикалық тәсілдерді біріктіріп қолдану негізінде әртүрлі беріктік және деформациялық сипаттамалары бар аймақтарды анықтау әдістемесі әзірленетін болады. Зерттеу сейсмикалық технологияларды пайдалана отырып, тау жотасының тереңдігіндегі қол жетпейтін аймақтардан ақпарат алуға мүмкіндік беретін сөнген шахталық панельдердің үстіндегі қабаттардың бұрын белгісіз болған құлау процесінің табиғаты мен заңдылықтары туралы білім алуға бағытталған.

Ұсынылған технологияны әзірлеу бойынша тәжірибелік жұмыстар Жомарт кенішінде игерілген Жаман-Айбат мысты құмтас кен орнының проблемалы аймақтарының бірінде жүргізіледі. Жаман-Айбат кенорнындағы қалыңдығы 2-12 м мыс құмтастарының ақырын құлайтын өнімді қабаттары 500-800 м тереңдікте тектоникалық кернеу деңгейі жоғары жұқа қабатты шөгінді тау жыныстарында кездеседі. Қарастырылып отырған аумақта құрылымдық жағынан таужыныстары массиві айрықша бұзылуларымен сипатталады. Үлгілердегі кеннің қысымға беріктігі орташа есеппен 160 МПа. Тау-кен жұмыстары бұрғылау-жару әдісімен панельді-бағаналық тау-кен жүйесін пайдалану арқылы жүзеге асырылады.

2017 жылдың екінші жартысынан бастап кеніштегі геомеханикалық жағдай күрт нашарлады: массивтің сейсмикалық белсенділігі Қазақстан Республикасының барлық сейсмикалық станцияларымен тіркелген техногендік жер сілкіністеріне дейін өсті; жер бетінің шөгу шамасы мен жылдамдығы күрт өсті. Игерілген панельдерде таулы жоталарының жоғарғы бөліктерінің түсулері мен құлаулары көптеп тіркелді. (сурет 11).



Сурет 11. Игерілген панельдердегі құрылымдық пішіндердің мысалдары: а) тасымалдау және конвейер штректерінің жоғарғы бөлігінің түсуі және құлауы б) құмтас массивінің жарылуы (Макаров А.Б., Мосякин Д.В., Карпиков А.А., 2005)

Геомеханикалық жағдайдың нашарлауының себептері:

- жергілікті учаскедегі қысқа сөну аралығы бар тіректерді алу алаңдарының көп болуы, олардың арасындағы аумақтардың шамадан тыс жүктелуі;
- тау жыныстарының қалыңдығын қазбаған тосқауыл тіректеріне (ТТ) және камера аралық бағаналарға (АБ) іліп, оларға және оның айналасындағы массивке тірек қысым жасау.

Жаңа аумақтарды одан әрі игеруге қатысу тау-кен жұмыстарының тереңдігінің ұлғаюымен және соның салдарынан тау-кен-геологиялық жағдайлардың күрделенуімен сипатталады.

Қолданбалы игеру жүйесінің параметрлерін нақтылау және кеніштегі тау-кен-техникалық жағдайлардың ағымдағы жағдайын бақылау үшін игерілмеген массивтің және өндірілген таужыныстарының кернеулі-деформациялық күйін бағалау үшін қосымша зерттеулер жүргізу қажет. Сейсмикалық барлаудың геофизикалық әдісінің заманауи технологияларын қолдану кенді кен орындарының өндірілген кеңістігін зерттеу және Жомарт кенішінің үстіңгі қабаттарындағы тау жыныстарының біркелкі еместігін жергіліктеу мәселелерін шешуге мүмкіндік береді.

4. Қорытынды

Рудалық кен орындарын өндіру кезінде таужынысы массивтерінің өнімді қабаттарындағы және өндірілген кеңістігіндегі аномалиялық аймақтарды анықтау мақсатында жер асты суларының кен қазбаларына бұзылуы және енуі мүмкін болатын жер үсті, жер асты және жерүсті-жерасты әдістері мен геофизикалық және геомеханикалық кешендері қолданылады. Авторлар геомеханикалық және геофизикалық тәсілдерді біріктіріп қолдану негізінде өндірілген кеңістіктегі және өнімді түзілімдердегі әртүрлі физикалық-механикалық қасиеттері бар аймақтарды анықтаудың тиімді әдісін ұсынады.

Бұл жоба кен орындарын тиімді және қауіпсіз игеру шарттарына әсер ететін әртекстілікті анықтау үшін бұрын пайдаланылмаған жоғары ажыратымдылықтағы сейсмикалық барлауды пайдалануды қарастырады. Өсіресе рудалық массивтерінің ұңғыма аралық кеңістігіндегі және өндірілмеген аймақтарындағы геологиялық кешендер мен тау-кен массивтерін зерттеу, тау-кен-механикалық қасиеттерінің ағымдағы жағдайын бағалау және олардың негізінде тау жыныстарының қауіпті деформациялары мен опырылуын тудыруы мүмкін жоғарғы қабаттың тұрақсыз аймақтарын анықтау өте маңызды..

Кеніштің өндірілген кеңістігінен өткен профильдер бойынша сейсмикалық барлау жұмыстарының нәтижелері бойынша сейсмикалық барлау әдісінің мүмкіндігіне төмендегіше баға беріледі:

- сөнген шахталық панельдердің үстінде жатқан қабаттардың құлау аймақтарының шекараларын анықтау,

- кен горизонттарын жер асты өндіру нәтижесінде пайда болатын қозғалыс бетіндегі бақылаулар,

- өндірілген кеңістіктің техникалық жағдайын бағалау.

Геомеханикалық және геофизикалық мәліметтерді жан-жақты талдау нәтижесінде игеріліп жатқан кеніштің қазбалары мен өнімді қабаттардың әртүрлі физикалық-механикалық қасиеттері бар аймақтар анықталады. Сейсмикалық барлау әдістерін пайдалана отырып, әркелкілікті жергіліктеу мәселесін шешу олардың өндірілген кеңістікпен өзара әрекеттесуінен кейінгі бақылаудың тиімділігін қамтамасыз етеді.

Алғыс

Бұл зерттеулер: АР19680360 ИРН «Кешенді геомеханикалық және геофизикалық зерттеулер негізінде кенді кен орындарын игеру кезінде тау-кен массаларының кернеулі-деформациялық күйін модельдеу» жобасы аясында жүзеге асырылды.

References / Әдебиеттер

- [1] Klyuev, R.V., Bosikov, I.I., Mayer, A.V. & Gavrina, O.A. (2020). Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable development of mountain territories*, 12(2), 283-290. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>
- [2] Glaznev, V.V. (2000). Sistema dlja sozdaniya trehmernyh modelej geologicheskikh ob'ektov. *Vestnik Voronezhskogo universiteta, seriya geology*, (8), 205-207
- [3] Golik, V.I., Burdzheva, O.G. & Dzeranov, B.V. (2021). Geophysical monitoring of the development of stress-deformed ore massives. *Geology and Geophysics of Russian South*, 11(2), 63-73. <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.57.57.005>
- [4] Dmitrak, Ju.V., Logacheva, V.M. & Podkolzin, A.A. (2006). Geofizicheskoe prognozirovaniye narushennosti i obvodnen-nosti massiva gomym porod. *Mining informational and analytical bulletin*, (11), 35-36
- [5] Kharisov, T.F., Mel'nik, V.V., Kharisova, O.D. & Zamjatin, A.L. (2020). Geophysical research of the rock massif in underground mine conditions. *Mining informational and analytical bulletin*, (3-1), 255-263. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263>
- [6] Shevchenko, M.D., Melnik, V.V. & Zamyatin, A.L. (2023). Geophysical investigations at construction and operation sites of underground mines. *Problems of Subsoil Use*, 36(1), 105-112. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.105>
- [7] Pisetzky, V.B., Lapin, S.Je., Zudilin, A.Je., Patrushev, Ju.V. & Shnajder, I.V. (2016). Methods and results of industrial seismic monitoring application the state of rock mass «Mikon-Geo» in the process of ore and coal deposits underground mining. *Mining informational and analytical bulletin*, (2), 58-64.
- [8] Zhukov, A.A., Prigara, A.M., Tsarev, R.I. & Voroshilov, V.A. (2022). Solution of mining engineering problems at a potassium salt deposit using geophysical methods. *Mining informational and analytical bulletin*, (5-1), 82-91. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2022-51-0-82>
- [9] Zhukov, A.A., Prigara, A.M., Tsarev, R.I. & Shustkina, I.Yu. (2019). Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *Mining informational and analytical bulletin*, (4), 121-136. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136>
- [10] Tirkel', M.G. & Kompanec, A.I. (2001). Primeneniye shahnoy sejsmorazvedki dlja vyjavleniya i trassirovaniya tektonicheskikh narushenij ugol'nogo plasta. *Mining informational and analytical bulletin*, (3), 54-56
- [11] Bazhenova, E. A. (2022). Identification of fault zones within an orebody using a set of geophysical methods. *Mining informational and analytical bulletin*, (5), 67-83. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2022-5-0-67>
- [12] Bizjaev, A.A., Voronkina, N.M., Savchenko, A.V. & Cupov, M.N. (2019). Metodika beskontaktnogo opredeleniya opasno nagruzhennykh zon v massive gornoj vyrabotki. *Zhurnal Ugol'*, (11), 27-31
- [13] Malehmir, A., Durrheim, R., Bellefleur, G., Urosevic, M., Juhlin, C., White, D., Milkereit, B. & Campbell, G. (2012). Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future. *Geophysics*, (77), WC173-WC190. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0028.1>

Рудалық кендорындарын жер асты әдісімен игеруде геофизикалық зерттеулерді қолданудың тиімділігі

С.А. Истекова, Д.Н. Толыбаева*, Л.Д. Исаева, З.Н. Аблесенова, М.А. Таласов

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: dina_tol@mail.ru

Андатпа. Мақала қатты пайдалы қазбалар кен орындарын игеруді бақылау мәселелерін шешуде геофизикалық әдістерді қолдану мәселелеріне шолу жасауға арналған. Соңғы жылдары кен қазбаларын салу және жер астында игерілген кен орындарын пайдалану кезінде тау сілемдерінің бұзылуынан туындаған табиғи және техногендік апаттардың жиілегендігінен жұмыста қарастырылған мәселелер өте өзекті болып табылады. Бұл әсіресе игерудің кеш сатысындағы кен орындар үшін маңызды. Шетелдік және отандық ғылыми әдебиеттерді талдау негізінде авторлар кен орындарын игеру және пайдалану кезеңінде тау-кен өнеркәсібінде геофизикалық әдістердің әртүрлі модификацияларын қолдану мүмкіндігіне егжей-тегжейлі талдау жасады. Үлкен тереңдіктегі кен орындарды игеруді бақылауда сейсмикалық барлау әдісін қолданудың тиімділігіне ерекше назар аударылады. Геофизикалық әдістерді қолдану геологиялық ортаның қазіргі жағдайына және тау жыныстарына жасанды әсер етуіне байланысты жер асты қазбаларының табиғи-техникалық жүйелерінің тәртібін есепке алудың тиімді әдістерінің бірі екендігі көрсетілген. Жерасты қазбаларының техногендік жағдайын жүйелі түрде бақылау және алдын алу және тау сілемдері мен қол жетпейтін жерлердегі қатты пайдалы қазбалардың кен орындарын қазіргі заманғы геофизикалық технологияларды пайдалана отырып зерделеу ұзақ мерзімді пайдаланылған кен орындарын тиімді және қауіпсіз игерудің негізі болып табылады деген негізді қорытынды жасалды. Ұсынылған шолуды ғылыми-практикалық негіздеу үшін Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ мамандары Қазақстандағы құмтас кенорындарының күрделі тау-кен-геологиялық жағдайында жерасты өндіру кезінде сейсмикалық әдістерді қолдана отырып, өндірілген кеңістіктің геомеханикалық күйін бағалау технологиясын әзірледі.

Негізгі сөздер: геофизикалық мониторинг, жерасты жұмыстары, пайдалы қазбалар кен орындары, геомеханикалық сипаттамалар.

Эффективность применения геофизических исследований при разработке рудных месторождений подземным способом

С.А. Истекова, Д.Н. Толыбаева*, Л.Д. Исаева, З.Н. Аблесенова, М.А. Таласов

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: dina_tol@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена обзору вопросов о применении геофизических методов при решении задач контроля за разработкой месторождений твердых полезных ископаемых. Рассматриваемые в работе проблемы, являются весьма актуальными из-за участвовавших в последние годы природных и техногенных катаклизмов, вызванных нарушением горного массива при строительстве горных выработок и эксплуатации рудных месторождений, разрабатываемые подземным способом. Особенно это важно для месторождений, находящихся на поздней стадии разработки. На основе анализа зарубежной и отечественной научной литературы, авторами дан подробный анализ о возможности применения различных модификаций геофизических методов в горной промышленности на этапе освоения и эксплуатации месторождений. Особое внимание уделено эффективности применения метода сейсморазведки при мониторинге разработки рудных месторождений, осваемые подземным способом на больших глубинах. Показано, что использование геофизических методов является одним из наиболее эффективных способов учета поведения природных и технических систем подземных выработок в зависимости от текущего состояния геологической среды и искусственных воздействий на массивы горных пород. Сделан обоснованный вывод, что систематический мониторинг и профилактика техногенного состояния подземных выработок и изучение текущего состояния горного массива и рудной залежи в недоступных частях с применением современных геофизических технологий являются основой эффективной и безопасной разработки длительно эксплуатируемых месторождений твердых полезных ископаемых. Представленный обзор использован для научно-практического обоснования проведения исследовательских работ коллективом специалистов КазНУ К. И. Сатпаева по разработке технологии оценки состояния выработанного пространства сейсмическими методами при подземной добыче в сложных горно-геологических условиях месторождений медистых песчаников Казахстана.

Ключевые слова: геофизический мониторинг, подземные работы, месторождения полезных ископаемых, геомеханические характеристики.

Received: 04 April 2024

Accepted: 15 August 2024

Available online: 31 August 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i4.05>

Metasomatic zoning and features of mineralization of porphyry copper deposits of the North-Eastern Balkhash region

E. Orynassarova, A. Bekbotayeva, T. Abdullayeva*, D. Urmanova, M. Nurtas

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: t.abdullaeva@satbayev.university

Abstract. The study is devoted to the analysis of metasomatic zoning and features of mineralization of porphyry copper deposits of the North-Eastern Balkhash region, comparing them with other analogs around the world. Based on geological, mineralogical, and hydrothermal changes, the key characteristics of the Aktogay, Aidarly and Kyzylkiya fields were identified. Methods included rock and mineral analysis, geochemical studies, and comparative analysis with global deposits. The results showed the uniqueness of Kazakhstan deposits in terms of mineral composition and zoning structure. The conclusion emphasizes the importance of these deposits for understanding the formation of porphyry copper systems and the potential for further research in this direction. The copper ore deposit of North-Eastern Balkhash region is located 450 km northeast of Almaty, within the Balkhash-Ili suite of the Central Asian Orogenic Belt, an orogenic structure over 800 million years old. The porphyry formations are found within the Koldar plutonic massif, which dates from the Late Devonian to the Early Carboniferous period. Laccolith intrusions of diorite-granodiorites extend 17 km in an east-west direction here. The Koldar plutonic massif includes plates of volcanogenic sedimentary rocks consisting of Carboniferous andesites and dacite-rhyolites. The Aktogay deposit occupies the central plate, composed of volcanic rocks and bounded by magmatic formations. The stocks of porphyritic granodiorites that intrude into the volcanic layers date from the Middle Carboniferous period.

Keywords: porphyry copper deposits, metasomatic zoning, hydrothermal changes, mineralogical composition, North-Eastern Balkhash region, Aktogay, Aidarly, Kyzylkiya.

1. Introduction

Porphyry copper deposits occupy an important place in geological science and industry due to their great economic potential. However, despite extensive studies of deposits around the world, many aspects of their formation remain poorly understood. In particular, the metasomatic zoning and mineralization features of porphyry copper deposits in the Northeastern Balkhash region, including Aktogay, Aidarly, and Kyzylkiya, require detailed consideration for a better understanding of these unique systems. The purpose of this study is to analyze the metasomatic zoning and mineralization features of these deposits, considering the comparison with world analogs and identifying their unique characteristics. At the Aktogay deposit, drilling data identifies three main groups of rocks:

Keregetas suite rocks consist of volcanogenic sandstones with interlayers of siltstones, tuffs, and conglomerates, overlain by a layer of rhyolite-dacite tuffs and tuffaceous sandstones.

Diorites of the Koldar massif extend southwest from the Aktogay fault within the open pit, as well as to the west and north of the deposit. These rocks are mostly porphyritic, ranging from fine- to medium-grained. The Koldar massif is characterized by intermediate to acidic intrusions (granodiorites, porphyritic granodiorite-plagiogranites, monzogranites), which are primarily described as granodiorites in the drill core data. Additionally, sheet-like intrusions of diabase porphyry of later origin are present. Small intrusions of quartz-dacite porphyry are found in the northwest section of the area.

The central part of the massif consists of silicified volcanic rocks and granodiorites, surrounded by a dense stockwork of barren quartz veins and a thin zone of sericite-quartz metasomatism. The silicified zone intersects a large potassic alteration zone, which consists of early potassium feldspar and biotite. Localized zones of quartz-sericite-pyrite alteration are represented as narrow linear sections along the contacts of granodiorite porphyries. The periphery of the copper-porphyry system is bounded by a large propylitic halo containing epidote-amphiboles and albite-chlorite.

Mineralization extends in zones from the central part of the deposit to the periphery. In the center, bornite-chalcocopyrite zones dominate, transitioning to chalcocopyrite-pyrite zones, while a pyrite halo is observed at the outer boundaries. In the central part of the deposit, copper and molybdenum ores overlap, while lead-zinc mineralization is confined to the edges of the ore body. The main vein mineral is quartz, although early-period veins also contain potassium feldspar and biotite [1-5].

2. Materials and methods

The study is based on field work, laboratory analysis of rock and mineral samples, as well as a comparative analysis of data on porphyry copper deposits around the world. Methods of petrography, mineralogy, geochemistry, and structural geology were used [6-7, 9-16]. Spectral analysis and microscopy data were used to assess metasomatic zoning. Analysis of hydrothermal changes included the study of the miner-

alogical composition and textures of the rocks. The comparison with the fields of Kazakhstan and the world was carried out based on a comparison of geochemical indicators and structural features. The use of statistical analysis made it possible to identify patterns in the distribution of elements and their correlation with types of mineralization [8].

2.1. Geological structure of the Aktogay, Aydarli, and Kyzylkiya fields

The Aktogay field and the ore field of the same name are located in the southeastern part of the side of the Bakanas synclinorium, which belongs to the northeastern segment of the andesite herzin Pribalkhash-Ilei of the intrusive volcanic belt (Figure 1).

Analysis of the geological features of the Aktogay, Aydarli, and Kyzylkiya fields revealed their complex structure, in the center of which is the Koldar intrusive massif. This massif, laccolith, composed of diorite and granodiorite, is a key element in the architecture of the region, stretching 17 km from west to east and covering an area of 75 km². It is surrounded by younger volcanogenic and sedimentary rocks of a variety of geological formations. Of interest is the geophysical profile of the massif, showing its expansion to 216 km² at a certain depth and subsequent narrowing, which indicates an active magmatic origin. The depth of the laccolith neck reaches 4.7 km, and its root part at a depth of about 4 km forms an ellipse with an area of about 4 km², projected to the surface between Aktogay and Aydarly. Below 3 km, the massif acquires a subconsonant position in the volcanics of the Keregetas formation with a thickness of up to 2500-2600 m. Two additional shallow troughs are also visible in the east and west of the laccolith. A particularly noticeable decrease in the depth of the intrusion is observed near Ak-

togay, where it decreases from 3 to 2 km and possibly reaches 500 m to the east.

The Aktogay ore field, together with the adjacent Aydarli and Kyzylkiya deposits, is located at the intersection of important tectonic faults, which indicates the decisive role of tectonic processes in their development. The influence of magmatic uplift led to the creation of horst-anticline and caldera structures filled with volcanic and sedimentary layers of the Keregetas Formation. The structural position of the Koldar Intrusive Massif, coupled with its hydrothermal activity, has been determined by a network of faults, including the key Aktogay fault zone with an orientation of 290°, and other faults with a direction of approximately 60°. The Aktogay fault zone encompasses the Aydarli and Aktogay fields, while the Kyzylkiya fault zone is located in the area of the Ikbass faults directed to the northeast. The magmatic activity led to the deformation of the upper part of the massif, forming horst-anticlinal structures. Closer to the eastern part of the vein, a caldera-like depression with an area of 5.5 km² appeared, covering most of the Aktogay deposit and filled with volcanic and sedimentary rocks of the Keregetas formation up to 600 m thick, known as the Central Aktogay xenolith.

The geological picture of the deposits is also determined by significant geological faults with a long history of activity, including the Aktogay (sub-latitudinal), Koldar (northeastern) and northwestern directions. The faults of the Koldar direction demonstrate the greatest amplitudes of vertical displacements, reaching hundreds of meters, while the displacements along the Aktogay faults, although less pronounced, are confirmed by satellite images with the width of the fault zones of 200-400 m and additional cracks that expand this zone to 600-1000 m, making these zones more ancient compared to the Koldar ones.

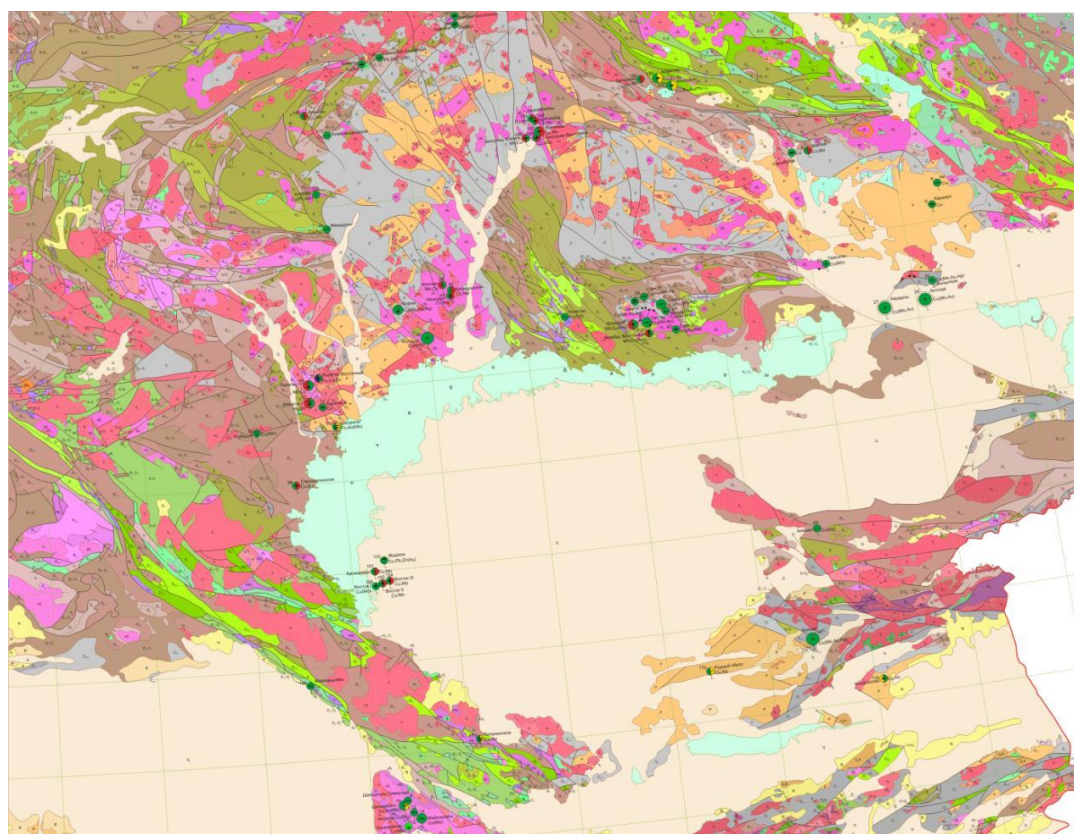


Figure 1. The map of the Dzungarian-Balkhash folded system (fragment of the state geological map [3])

In the context of mineralogy and petrology, vein rocks are noteworthy, among which diorite and diabase porphyrites, quartz and dacite porphyries, as well as special formations of granodiorite-porphyries stand out. These rocks enrich the mineralogical spectrum of the area and testify to the multi-stage activity of magma. The Koldar massif demonstrates magmatic connections with the volcanic complex of Keregetas. Among the intrusive rocks of the Koldar massif are:

Gabbro-diorites in the Northwest Block.

A variety of diorites, from uneven-grained and porphyritic to fine- and medium-grained, are found in the Central, Southern, Geophysical, Southeastern, and Far blocks. In some blocks, diorite with prismatic grain and needle hornblende are found, as well as porphyrites based on diorite and diabase, while quartz and dacite porphyries are also present in the Northwest block.

Medium-grained diorites and granodiorites, as well as porphyritic granodiorites in the eastern parts of the Central and Southern Blocks, as well as in the Diagonal and Eastern Blocks.

«Porphyry» subphase, which includes small formations and dikes of granodiorite porphyries with a fine-grained base, as well as porphyry plagiogranites with a vitreous base.

In addition, thin ore dikes of granite-aplites and fine-grained granites are common within the territory, which may be associated with the granites of the second phase of the Aktogay complex.

Post-ore dikes with almond-shaped diabase and andesite porphyrites stand separately.

Diorites with varying degrees of granularity, from irregular to fine to medium, are distinguished by their diversity in composition and the presence of structures characteristic of gabbro, ophite, and subophyte. Their appearance resembles hypabyssal rocks, and they occupy more than half of the site.

Diorite porphyrites stand out as an important geological component, forming a ring structure in the south of the site. They form several large masses and several adjacent apophyses and independent dike formations, especially near the southern edge of the orebody.

Diabase porphyrites are relatively gentle formations located mainly along the C33 direction, with a slope to the south. Their thickness usually reaches about 20 meters. These rocks, which have a fine and fine grain, are colored in dark gray and almost black tones with a greenish tint, and are younger compared to diorite porphyrites, but also contain ore minerals.

Quartz and dacitic porphyries are found mainly in northwestern and northern blocks, with the dike direction from sublatitudinal to northwestern. Their incidence angles vary from 55 to 75 degrees in south-westerly directions, increasing to 75-85 degrees near the Small Koldar Fault, which indicates their ore-bearing nature.

Medium-grained full-crystalline diorites and granodiorites, which form the third phase of development, are distributed in the northeastern part and most of the eastern half of the Koldar massif. These rocks correspond to quartz diorites and biotite-hornblende granodiorites.

Porphyritic granodiorites form separate small masses in the eastern part of the Central and Southern Blocks, as well as in the Diagonal and Eastern Blocks, covering an area of about 0.4 km². Their location emphasizes the closure of the

annular ore-bearing structure with the pinkish-gray color of the rocks.

Granodiorite porphyries with a fine-grained base create a chain of significant vein formations and dikes running along the Aktogay deep fault, passing through the central, drilling, and northwestern parts of the site. Their shape varies from isometric to elongated, resembling dikes with various thickenings and narrowings. The total length of such structures is approximately 1500 meters, with a steep slope in the north-eastern direction and a pinkish tint, while granodiorite porphyries are distinguished by the absence of hornblende among the disseminated ones.

Plagiogranite-porphyry forms extensive dike structures of a light gray hue, which demonstrate the western boundary of the ore-bearing formations of the deposit. Extend in a northwesterly direction, tilting at angles of 65 to 75 degrees to the northeast. Their thickness varies between 18 and 41 meters, with some dikes containing little or no ore. Plagiogranite porphyries also form compact masses in the area of the Central and Drilling blocks and are also embedded in the form of dikes among porphyritic granodiorites and granodiorite porphyries in the eastern part of the Central Block with a thickness of up to 40 meters. In areas where stockwork is most rich in ores, porphyry plagiogranite dikes can be heavily mineralized. In general, porphyritic granodiorites, granodiorite porphyries, and plagiogranite porphyries are tightly interrelated, forming a complex geological structure.

Metasomatic processes, which are especially active in the deep layers of intrusions, where the process of «granodioritization» due to siliceous-alkaline metasomatic occurs, are key to understanding the development of deposits. These phenomena, which cause changes in the mineral and chemical composition of rocks, play an important role in the formation of ore-bearing systems and their metallogenesis.

In the Aktogay deposit, there is a classic concentric zoning in the distribution of metasomatic rocks to ore formations. Propylites, biotite and quartz-potassium, quartz-sericite metasomatites predominate, surrounding the inner zone of strong quartz up to monoquartzites. These metasomatites, formed against the background of orogenization of volcanogenic-sedimentary rocks of the Keregetas formation, affect all known rocks of the deposit, except for tourmalinized breccia and late basite dikes. Quartz-potassium metasomatites, together with the surrounding biotite metasomatites, are typical of the center of the deposit, where they create an oval field elongated in a northwesterly direction, denoting the zone of the main distribution of copper and molybdenum mineralization. In zones of tectonic activity, these metasomatites turn into migmatites with characteristic structures.

On the periphery, sericite-quartz metasomatites predominate, crossing the central part. The outer zone, mainly outside the field, is represented by propylites, in the north by the epidote-amphibolite facies, and in the south by mainly the albite-prehnite-chlorite facies.

The ore stockwork of the Aktogay deposit is part of a large zone of sulfide (mainly pyrite) mineralization, which also unites the Aydarli ore stockwork, covering an area of 15 km².

The changes affected all the rocks around the orebody except the later main. The central empty space is occupied by a siliceous zone with quartz formations surrounded by a dense network of quartz stockwork and a zone of shallow sericite-quartz transformations. As it approaches the edges, this siliceous zone is replaced by an extensive layer of early

potassium variations of potassium feldspar and biotite surrounding the main orebody. In this potassium zone, there are several lines with low mineralization but strong changes in potassium feldspar, surrounded by a broad biotite halo. The zoning of the stockwork: the presence of the epicenter (quartz stockwork), the closure of the structure, and the concentric-zonal plan of the structure, fragmentarily manifested in the position of the pre-ore geological formations, but quite clearly in the spatial distribution of copper and molybdenum, and to a lesser extent sulfuric, gold-silver and lead-zinc mineralization, the mineral composition and technological properties of the ores, as well as the metasomatic zoning of the altered rocks of the region.

Phyllite transformations, distinguished by the presence of quartz, carbonates, chlorite, and sericite, occur as ephemeral, narrow bands located along the boundaries of granodiorite-

porphyry apophyses and along fracture zones along the sides of the orebody. The surrounding zone of the porphyry copper system is represented by an extensive propylite halo, including epidote-amphibole and albite-chlorite-prehnite.

The orebody as a whole is an elliptical overturned cone with thick walls, the base of which is framed by jagged, jagged edges that break up into a series of disappearing conductors with small and irregular cross-sections. The boundary of this body at depth in the southern and eastern parts inclines to the east at an angle of 25 to 40 degrees. The axis of the cone is inclined to the south-southwest at an angle of 75 to 80 degrees, and the angles of inclination of the outer surface vary from 40 to 65 degrees in the south, 80 to 85 degrees in the north, 20 to 40 degrees in the west, and 70 to 85 degrees in the east.

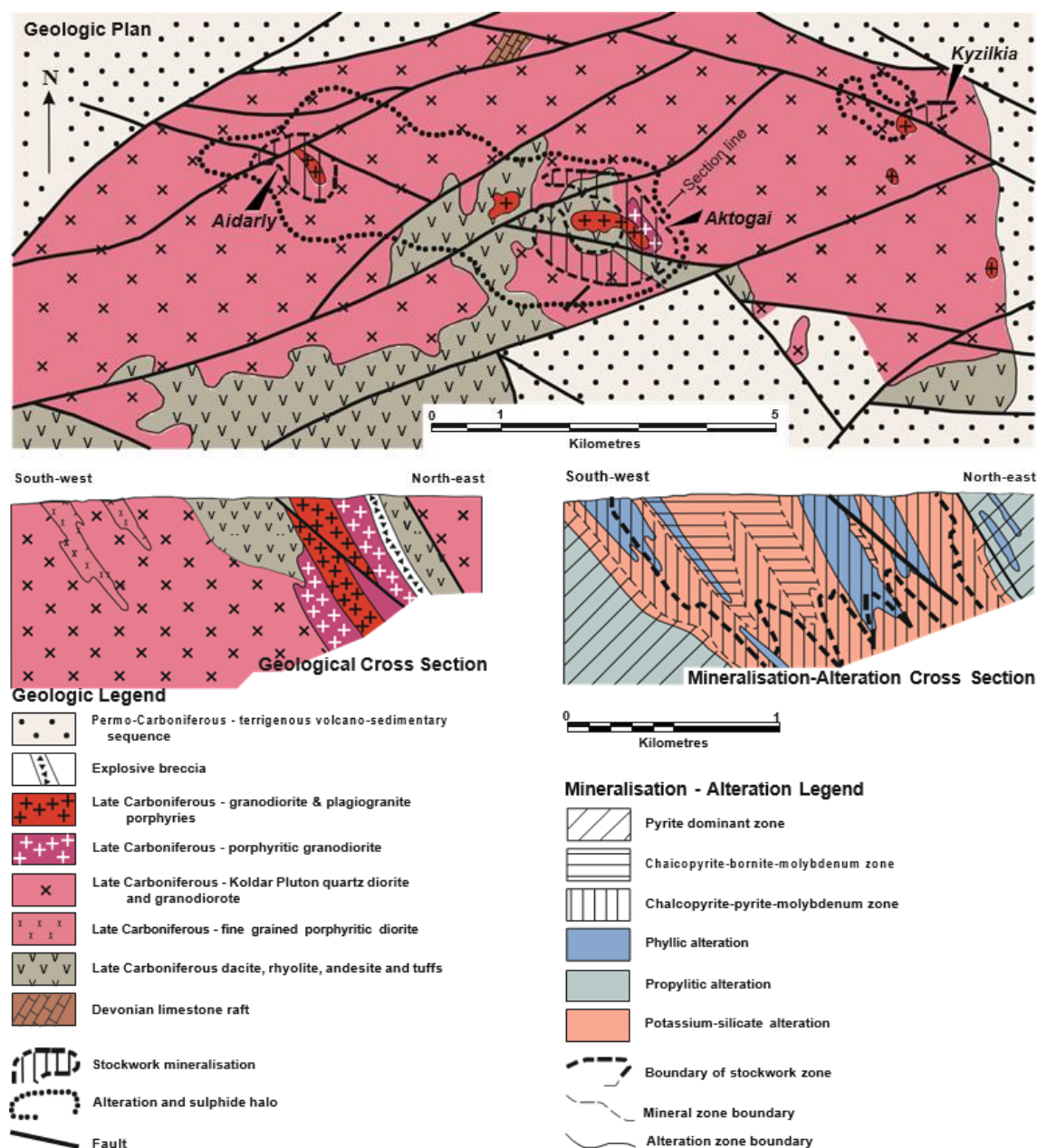


Figure 2. Geology, alteration and mineralisation at the Aktogai Group of porphyry Cu-Au deposit in southeastern Kazakhstan. The geology and alteration-mineralisation are also separately shown on a NE-SW oriented section through the Aktogai deposit. After Zvezdov, et al., (1993)

In the eastern part, the complexity of the stockwork configuration is due to the presence of a branched apophysis filled mainly with ores with low grades.

Tectonic shifts have little or no effect on the shape and integrity of the ore stockwork as an open-pit mining object. The only separate part is the balance section of the stockwork in the north-western block, which is also adjacent to the Drilling block in its eastern part along the Small Koldarsky fault.

The internal structure of the ore stockwork is characterized by a high degree of homogeneity of mineralization and well-defined vertical and lateral zoning, both in sulfide and oxidized ores.

The Aktogay deposit is characterized by vertical mineralogical zoning of ores, including:

- leaching subzone;
- zone of oxidized ores;
- subzone of mixed ores;
- secondary sulfide subzone;
- Primary sulfide ore zone.

The zoning of the stockwork exhibits a complex structure, starting from the central quartz core, through concentrically arranged layers to the peripheral zones, where the distribution of mineralization from copper and molybdenum to gold, silver, and base metals changes gradually, emphasizing the stepwise change in mineral composition and enrichment of the ore bodies. The predominance of primary sulfide ores in the zone provides the bulk of the resources, with a high concentration of copper over wide areas.

The level of copper in the ores shows stability, with a coefficient of variation not exceeding 40% for copper, indicating the uniformity of mineralization within the stockwork, considered as a homogeneous object in three-dimensional space when mining methods are chosen.

A distinctive feature of stockwork is its lateral and vertical mineral zoning, which is reflected in a decrease in the concentration of copper from the center to the periphery and with depression, as well as a change in the amount of pyrite and other sulfides in different zones. This zoning confirms the gradient decrease in copper content with depth and the change in mineral composition from the outer to the inner layers of the stockwork.

The oxidized ores above the sulfide ores form a stable layer that occupies about 5% of the reserves and is expressed in separate «windows» on the surface, where the contours of the oxidized and sulfide ores do not coincide. This indicates the distribution of copper mineralization and its movement along the slopes and into the lowlands in the central parts of the stockwork.

The mixed ores underlying the oxidized ores are distinguished as a thin layer of variable thickness, where sulfides make up a significant portion of the copper mineralization, accompanied by cuprite and native copper.

The zone of secondary sulfides, located at the boundary of oxidized and primary sulfide ores, is characterized by uneven thickness and is represented by coulis zones of sulfide veins, accompanied by complex rock changes.

The small Kyzylkiya field, located near Aktogay, shows deeper erosion, indicating the diversity of erosion processes in the region. Copper-molybdenum mineralization is associated with granodiorite-porphyry rod penetrating through the granodiorites of the Koldar massif and is accompanied by potassium-silicate and phyllite changes (Figure 2).

3. Results and discussion

In general, the geological characteristics of the Aktogay, Aidarly, and Kyzylki deposits represent a complex network of processes covering magmatic activity, metasomatic changes, and volcanic-sedimentary events. This makes them valuable for the study of the geodynamics and mineral resources of the Carboniferous period in a given region.

The richness of molybdenum and copper in these deposits emphasizes their importance as molybdenum-copper objects, while the relatively low presence of gold, silver, and selenium is noted.

The relationship of the structure of these sites to deep tectonic faults indicates their importance in understanding the region's long-term tectonic activity, including shallow intrusions and explosive breccias.

A well-defined zonality in the distribution of mineralization confirms the complex interaction of geological processes at different depths and in different parts of the deposits.

Changes in the stockwork structure at different depth levels emphasize the dynamic development of these geological formations.

The vertical gradient of the distribution of molybdenum-copper mineralization is indicative of the complexity of the region's geological history and mineral potential.

Differences in erosion levels between the Aydarli and Kyzylkiya fields reflect variations in the geological development of the region.

Deep tectonic activity in the region affects the formation and preservation of mineral resources, which requires additional study for effective development.

The diversity of minerals and unique structures in these deposits, including prehnite and quartz with unique structural features, provide an important source of information on the geological processes and conditions of mineral deposits in this region.

Thus, the study of these deposits opens up broad prospects for understanding the mechanisms of the formation of molybdenum-copper deposits and the influence of tectonic processes on mineralization during the Carboniferous period.

The discussion of the results highlights the importance of metasomatic zoning for understanding the processes of field formation and suggests that these fields may contain untapped potential for exploration.

4. Conclusions

The study confirmed the hypothesis of complex metasomatic zoning and unique features of mineralization of porphyry copper deposits in the North-Eastern Balkhash region. The results can be used to refine the models for the formation of such fields and develop new approaches to prospecting and exploration. The analysis showed that a thorough understanding of metasomatic processes and hydrothermal changes is key to assessing the economic potential of the region.

Given the significant technological breakthrough in recent years, particularly in the quality and availability of satellite imagery, we recommend integrating modern remote sensing data into our research on metasomatic zonality and associated minerals. Current methods for mineral exploration and geological mapping often fail to fully utilize the potential of these advanced digital technologies. By incorporating a spectral signature library and developing a predictive explo-

ration model based on the processing and interpretation of remote sensing data, we can optimize our approach.

We propose using a comprehensive method that combines geological, geophysical, and aerospace data, including multi- and hyperspectral sensors, into a unified exploration model. This will significantly reduce time and labor costs while enhancing the efficiency and accuracy of our exploration and research efforts. Incorporating these methods into traditional methods would provide a unique solution for mineral deposit discovery and geological mapping, particularly for ore-bearing zones.

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. BR21882179).

References

- [1] Popov, V.S. (1977). Geology and Genesis of Porphyry Copper and Molybdenum-Porphyry Deposits. *Moscow: Nauka*
- [2] Seitmuratova, E.Y., Arshamov, Y.K., Saidasheva, F.F. (2013). Prospects of priority types of mineralization of the Late Paleozoic volcano-plutonic belts of the Zhongar-Balkhash folded system. *Bulletin of KazNTU*, 96(2), 3-10
- [3] Kolesnikov, V.V., Zhukov, N.M., Solodilova, V.V., Filimonova, L.E. (1986). Series: Balkhash segment. *Alma-Ata: Nauka*
- [4] Coulter, D.W., Zhou, X., Wickert, L.M. & Harris, P.D. (2017). Advances in Spectral Geology and Remote Sensing: 2008–2017.
- [5] Omarova, G.M. (2018). Influence of fault tectonics within the Aktogay deposit on the change in the mineral composition of porphyry copper mineralization (doctoral dissertation). *Almaty: KazNRTU named after K.I. Satpayev*.
- [6] Bukhanova, D.S. (2012). Typomorphic characteristics of copper porphyry mineralization. *Proceedings of X Regional Scientific Conference: Studies of the Earth, Petropavlovsk-Kamchatskiy*
- [7] Zhukov, N.M. (1991). Infiltration Metasomatism and Natural Columns of Hydrothermalites. *Gylym, Alma-Ata*
- [8] Zhukov, N.M., Filimonova, L.E. (1982). Metasomatites and hypogenic mineralization of the copper-porphyry deposit Aktogay. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*, (6), 31-38
- [9] Kolesnikov, V.V., Solodilova, V.V., Felimonova, L.E. (1986). Porphyry copper deposits. *Moscow: Nauka*
- [10] Krivtsov, A.I. (1983). Geological Foundations of Forecasting and Prospecting of Porphyry Copper Deposits. *Leningrad, Nedra Publ*
- [11] Krivtsov, A.I., Bogdanov, Yu.V. (1987). Copper Ore Deposits: Types and Conditions of Formation. *Moscow: Nedra Publ*
- [12] Krivtsov, A.I., Migachev, I.F. & Minina, O.V. (1985). Zonality and gold content of porphyry copper-copper deposits. *Moscow, VIEMS Publ*
- [13] Krivtsov, A.I., Migachev, I.F. & Popov, V.S. (1986). Porphyry copper deposits of the world. *Moscow: Nedra Publ*
- [14] Krivtsov, A.I., Yudin, I.M. (1976). Hypogenic Zonality of Porphyry Copper Formation Deposits. *Moscow: VIEMS Publ*
- [15] Perevozov, S.V., Zhukov, N.M. (2019). Systematized Reference Collection of Ore-Bearing and Host Rocks of the Aktogay Porphyry Copper Deposit. *Almaty*
- [16] Sergiyko, Y.A. (1980). Report on Detailed Exploration of the Aktogay Copper Porphyry Deposit with Reserves Calculation as of 01.01.1980. *Alma-Ata*

Солтүстік–Шығыс Балқаш аумағының мыс порфир кенорындарының минералогиялық ерекшеліктері және метасоматикалық белдемдері

Э. Орынбасарова, А. Бекботаева, Т. Абдуллаева*, Д. Урманова, М. Нұртас

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: t.abdullaeva@satbayev.university

Аңдатпа. Зерттеу Солтүстік-Шығыс Балқаш аймағындағы порфирлі мыс кенорындарының метасоматикалық белдемдері мен минерализация ерекшеліктерін талдауға, сондай-ақ оларды әлемнің басқа ұқсас кен орындарымен салыстыруға арналған. Геологиялық, минералогиялық және гидротермальдық өзгерістер негізінде Ақтоғай, Айдарлы және Қызылқия кен орындарының негізгі сипаттамалары анықталды. Өдістерге тау жыныстары мен минералдарды талдау, геохимиялық зерттеулер және әлемдік кенорындарымен салыстырмалы талдау кірді. Нәтижелер Қазақстанның кен орындарының минералдық құрамы мен зоналық құрылымы тұрғысынан бірегей екенін көрсетті. Қорытындыда осы кен орындарының порфирлі мыс жүйелерінің қалыптасуын түсінудегі маңыздылығы және бұл бағыттағы зерттеулердің болашағы атап өтіледі. Солтүстік-Шығыс Балқаш аймағындағы мыс кен орны Алматыдан солтүстік-шығысқа қарай 450 км қашықтықта, жасы 800 миллион жылдан асатын Орталық Азия орогендік белдеуінің Балқаш-Іле қатпарлы кешенінде орналасқан. Порфирлі формациялар Колдар плутондық массивінде кездеседі, ол кейінгі девоннан бастап ерте карбон дәуіріне жатады. Мұнда диорит-гранодиоритті лакколиттік интрузиялар батыстан шығысқа қарай 17 км қашықтыққа созылған. Колдар плутондық массиві карбондық андезиттер мен дацит-риолиттерден тұратын вулканогендік-шөгінді жыныстар қабаттарын камтиды. Ақтоғай кен орны орталық тақтаны алып жатыр, ол вулкандық жыныстардан тұрады және магмалық түзілімдермен шектелген. Вулкандық қабаттарға енетін порфирлі гранодиориттердің штоктары орта карбон дәуіріне жатады.

Негізгі сөздер: мыс порфир кенорындары, метасоматикалық белдемдер, гидротермальдық өзгерістер, минералдық қосылыстар, Солтүстік-шығыс Балқаш аумағы, Ақтоғай, Айдарлы, Қызылқия.

Метасоматическая зональность и особенности минерализации медно-порфировых месторождений Северо-Восточного региона Балхаша

Э. Орынбасарова, А. Бекботаева, Т. Абдуллаева*, Д. Урманова, М. Нуртас

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: t.abdullaeva@satbayev.university

Аннотация. Данное исследование посвящено анализу метасоматической зональности и особенностей минерализации порфировых медных месторождений Северо-Восточного Балхаша, а также сравнению их с аналогичными месторождениями по всему миру. На основе геологических, минералогических и гидротермальных изменений были выявлены ключевые характеристики месторождений Актогай, Айдарлы и Кызылкия. В методах исследования использовались анализ пород и минералов, геохимические исследования и сравнительный анализ с мировыми месторождениями. Результаты показали уникальность месторождений Казахстана по составу минералов и структуре зональности. В заключении подчеркивается важность этих месторождений для понимания процессов формирования порфировых медных систем и потенциал для дальнейших исследований в этом направлении. Медное рудное месторождение Северо-Восточного Балхаша расположено в 450 км к северо-востоку от Алматы, в пределах Балхаш-Илийского комплекса Центрально-Азиатского орогенного пояса, орогенной структуры, возраст которой составляет более 800 миллионов лет. Порфировые формации обнаружены в пределах Колдарского плутогенного массива, который относится к позднедевонскому — раннекарбонному периоду. Здесь лакколитовые интрузии диоритов и гранодиоритов простираются на 17 км в направлении с запада на восток. Колдарский плутогенный массив включает пласти вулканогенно-осадочных пород, состоящих из карбонных андезитов и дацит-риолитов. Месторождение Актогай занимает центральную пластину, состоящую из вулканических пород и ограниченную магматическими образованиями. Штоки порфировых гранодиоритов, которые внедряются в вулканические слои, относятся к среднекарбонному периоду.

Ключевые слова: медно-порфировые месторождения, метасоматическая зональность, гидротермальные изменения, минералогические соединения, Северо-Восточный регион Балхаша, Актогай, Айдарлы, Кызылкия.

Received: 29 April 2024

Accepted: 15 August 2024

Available online: 31 August 2024

The use of geothermal energy using the example of the Zharkent geothermal water deposit

A.M. Baikadamova*

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: ainurchuk90@mail.ru

Abstract. Today, Kazakhstan, like many other countries, is actively seeking ways to adapt to global climate change, seeking to ensure sustainable economic development, social responsibility and environmental protection in the context of international cooperation. In early 2023, the «Strategy for Achieving Carbon Neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060» was adopted, which was the result of significant work on the implementation of the «Concept of Transition of the Republic of Kazakhstan to a Green Economy», as well as the development and implementation of state programs of industrial-innovative development and implementation of the UN Sustainable Development Goals. The main goal of the Strategy is to achieve sustainable development of Kazakhstan's economy to climate change and carbon neutrality by 2060. There will be a gradual planned reduction in the share of coal-fired generation with an increase in the share of RES and alternative energy, as well as the use of natural gas as an intermediate fuel. In the medium and long term, there is uncertainty about the availability of sufficient water resources, so a long-term vision for the development of hydropower in Kazakhstan will be formed. In this regard, there is a need to develop the production of alternative energy in our country. Among non-conventional energy sources, geothermal energy - heat generated naturally in the Earth's interior - occupies the second place, second only to solar radiation. In recent years, unique factual material on thermal waters of Cretaceous deposits has been obtained in the territory of Zharkent depression. Zharkent depression possesses a huge potential of natural thermo-mineral resources, which have not found rational economic application so far. Development of thermal waters is actual in conditions of development of production of alternative kinds of energy and at transition of the republic on rails of «green economy».

Keywords: thermal waters, geothermal energy, well, Zharkent depression.

1. Введение

В настоящее время, мировой практикой имеется определенный положительный опыт комплексного освоения геотермальных подземных вод. Наиболее широко эти воды используются во многих странах для теплоснабжения, а также в бальнеологии и в рекреационных целях.

В любой части Земли, на определенной глубине, которая зависит от геотермических особенностей региона, залегают пласты горных пород, содержащие термальные воды (гидротермы). В связи с чем, в земной коре нужно выделить еще одну зону, которую можно условно назвать «гидротермальной оболочкой». Она прослеживается повсеместно, по всему земному шару только на разной глубине [2].

Температура подземных вод меняется в широких пределах, обуславливая их состояние, влияя на ее свойства и состав. В соответствии с температурой теплоносителя все геотермальные источники делят на гипотермальные, мезотермальные и эпитеермальные.

К гипотермальным источникам обычно относятся источники горячей воды с температурой 200°C, и которая практически не зависит от почвенных вод [2]. К мезотермальным источникам относятся источники с температурой воды 100-200°C.

К эпитеермальным источникам относятся источники горячей воды с температурой 50-90°C, расположенные в верхних слоях осадочных пород, куда проникают почвенные воды.

Геотермальные источники, согласно классификации Международного энергетического агентства, делятся на 5 типов:

1) месторождения геотермального сухого пара: сравнительно легко разрабатываются, но довольно редки.

2) источники влажного пара (смеси горячей воды и пара): встречаются чаще, но при их освоении приходится решать вопросы предотвращения коррозии оборудования ГеоТЭС и загрязнения окружающей среды (удаление конденсата из-за высокой степени его засоленности);

3) месторождения геотермальной воды (содержат горячую воду или пар и воду): представляют собой, так называемые, геотермальные резервуары, которые образуются в результате наполнения подземных полостей водой атмосферных осадков, нагреваемой близко лежащей магмой;

4) сухие горячие скальные породы, разогретые магмой (на глубине 2 км и более): их запасы энергии наиболее велики;

5) магма, представляющая собой расплавленные горные породы, нагретые до 1300°C [3].

2. Методы и материалы

Практическое использование геотермальной энергии успешно применяется во многих странах мира, демонстрируя её значительные преимущества и широкие возможности для развития. В Исландии около 90% домов отапливаются с использованием геотермальной энергии, что позволяет значительно сократить выбросы углекислого газа и снизить зависимость от ископаемых видов топлива [4].

На Филиппинах и в Кении геотермальная энергия также играет ключевую роль в энергосистеме, позволяя этим странам значительно сокращать углеродный след. В Китае геотермальные источники активно используются для обогрева и охлаждения зданий, особенно в крупных городах, таких как Пекин и Тяньцзинь, что способствует улучшению экологии и снижению расходов на энергоносители [4]. Общий объем установленной мощности геотермальных электростанций по всему миру на 2023 год составляет около 13-14 ГВт. Страны-лидеры по производству геотермальной энергии:

- Индонезия и Филиппины: 2 ГВт
- Турция и Италия: 1 ГВт

Крупнейший производитель геотермальной энергии – США. Общая мощность геотермальных источников более 4000 МВт. Основные регионы размещения станций – районы Сан-Франциско, Калифорнии, Невада. В Исландии (700 МВт) и на Филиппинах (1930 МВт). В Мексике, Кении, Италии, Израиле действуют геотермальные электростанции с установленной мощностью от 600 до 800 МВт в каждой из стран [5].

Практическое применение геотермальной энергии в мире демонстрирует успешные примеры, которые можно использовать для дальнейшего развития этого источника энергии. Вот несколько примеров успешного использования геотермальной энергии:

1) Исландия:

Рейкьянес. Геотермальная электростанция в Исландии, которая использует горячие источники для производства электричества и отопления. Почти 90% домов в Исландии отапливаются с помощью геотермальной энергии.

Геллишаиди. Геотермальная станция, которая производит около 303 МВт электричества и использует тепло для обогрева теплиц и плавательных бассейнов.

2) США:

Гейзерс (Калифорния). Самый большой комплекс геотермальных электростанций в мире, установленная мощность которого составляет около 1 517 МВт. Комплекс снабжает электроэнергией примерно 725 000 домов.

Невада. Геотермальные электростанции здесь производят значительное количество электричества, причем штат занимает второе место в США по установленной мощности геотермальных электростанций после Калифорнии.

3) Филиппины:

Полокпино. Один из крупнейших комплексов геотермальных станций в мире, который производит около 724 МВт. Филиппины являются вторым по величине производителем геотермальной энергии в мире [6,10].

4) Кения:

Олкария. Комплекс геотермальных станций, который производит около 810 МВт, что составляет значительную часть энергетических нужд страны. Кения активно

расширяет свои геотермальные мощности, стремясь к увеличению их доли в энергетическом балансе.

5) Индонезия:

Ваянг Винджа. Геотермальная станция, которая производит около 227 МВт, и это лишь одна из многих станций в стране. Индонезия имеет большой потенциал для развития геотермальной энергетики благодаря своему расположению на Тихоокеанском огненном кольце.

Что касается электростанций в мире существуют различные виды геотермальных электростанций, которые различаются по принципу работы и использованию геотермальных ресурсов. Вот основные типы:

1. Сухопаровые электростанции

Сухопаровые электростанции являются старейшим типом геотермальных электростанций. Они используют пар, поступающий из геотермальных резервуаров, чтобы вращать турбины и производить электричество. Примером является геотермальная электростанция в Лардерелло, Италия [4].

2. Флэш-паровые электростанции

Флэш-паровые электростанции используют высокотемпературную геотермальную жидкость. Когда эта жидкость поднимается на поверхность, происходит внезапное падение давления, что вызывает испарение части жидкости. Этот пар используется для вращения турбин. Примеры таких станций можно найти в Исландии и на Филиппинах [4].

3. Бинарные электростанции

Бинарные электростанции используют умеренно горячую геотермальную жидкость для нагрева вторичного рабочего вещества с низкой точкой кипения. Этот рабочий флюид превращается в пар, который вращает турбины. Такие станции особенно эффективны для использования низкотемпературных ресурсов. Примером является геотермальная станция в Калифорнии, США [4,10].

4. Гибридные электростанции

Гибридные электростанции комбинируют различные технологии для максимальной эффективности. Например, они могут использовать как флэш-паровые, так и бинарные технологии. Они могут быть особенно полезны в регионах с переменными геотермальными ресурсами [10].

3. Результаты и обсуждение

Обоснование использования геотермальной энергии на примере скважины 3Т. Данное обоснование возможностей использования геотермальной энергии рассчитано исходя из исходных данных, полученных в июне 2022 года. В таблицах 1 и 2 представлены соответствующие данные.

По сравнению с предыдущими исследованиями имеются изменения [8]. Анализ проведенных исследований показывает, что наиболее рациональным и перспективным является использование тепловых запасов термальных вод для обогрева теплиц, отопления производственных и жилых помещений, в бальнеологии и др.

Предложена принципиальная технологическая схема опытного производства на базе геотермальной скважины 3Т Жаркентского месторождения (рис. 1), включающая: источник электроэнергии работающий от скважины – микроГЭС (50 кВт); производственное помещение – здание ангарного типа (400 кв.м); теплицу с системой капельного полива и климатконтролем; мини завод розлива столово-минеральной воды [9].

Таблица 1. Краткие сведения по термальной скважине 3Т

Показатели	Скважина 3Т
Местоположение скважин	Алматинская область, Панфиловский район, в 33 км южнее г. Жаркент
Глубина скважины, м	3281
Термоводоносный комплекс, интервал опробования, м	Верхнемеловые грубо- и среднезернистые песчаники, 2270-2350
Избыточное давление на устье скважины, м	220
Расход на самоизливе (дм ³ /с) при избыточном давлении, м	33.2 220
Температура воды на самоизливе, °C	66-72
Химический состав термальной воды	Минерализация воды 0.535 г/л Состав: гидрокарбонатно-сульфатный натриевый (мг/дм ³ : HCO ₃ ⁻ -350.1, SO ₄ ⁻ -22.6, Cl ⁻ -10.9; Na+K 143.3, Ca -1, Mg - 0.6)
Наличие охлаждающей воды для производства электроэнергии	в 50 м от скважины 3Т имеется действующая неглубокая скважина (300 – 400 м), температура воды 12°C
Климатические показатели, °C: – максимальная температура воздуха – средняя температура воздуха – минимальная температура воздуха	+41.5 (июль) +9 (среднегод.) - 42 (январь)

Таблица 2. Химический состав термальных вод

Наименование	Параметры	Скважина 3Т	Пояснение
Технологические параметры	Расход	33.2 л/с	
	Избыточное давление на устье скважин	220 м	
	Рабочее давление	220 м	
	t°	66-72°C	
Химический анализ	pH	8.4	Умеренно высокое число pH уменьшает растворимость HCO ₃
	минерализация	535 мг/дм ³	
	SiO ₂	35.5 мг/дм ³	Малая концентрация
	CO ₃ ⁻²	8 мг/дм ³	
	HCO ₃ ⁻	305.1 мг/дм ³	Ожидается небольшое образование окалин
	Cl ⁻	24.8 мг/дм ³	
	SO ₄ ⁻²	22.6 мг/дм ³	
	NO ₃ ⁻	1.8 мг/дм ³	
	NO ₂ ⁻	< 0.01 мг/дм ³	
	F ⁻	0.31 мг/дм ³	
	Na ⁺	142 мг/дм ³	
	K ⁺	1.3 мг/дм ³	
	Ca ⁺²	1.0 мг/дм ³	
	Mg ⁺²	0.6 мг/дм ³	
	NH ₄ ⁺	<0.05 мг/дм ³	
	Fe ⁺²	<0.1 мг/дм ³	
	Fe ⁺³	<0.1 мг/дм ³	

Температура резервуара в Жаркентском месторождении слишком низкая для обеспечения работы геотермальной электростанции обычного типа. Единственным практически реализуемым вариантом для производства электроэнергии от геотермального потока с температурой 70-96°C является бинарная технология [7].

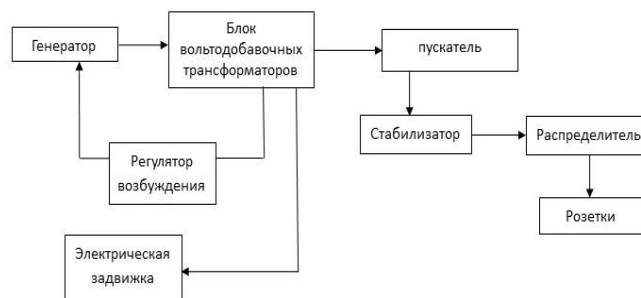


Рисунок 1. Принципиальная схема скважинной микроГЭС

Разработано обоснование добычи и утилизации геотермальной воды скважины 3Т по следующим направлениям:

- использование теплового потенциала скважины для тепло- и водоснабжения тепличного хозяйства;
- использование лечебно-минерального потенциала скважины для бальнеологии при строительстве процедурного комплекса;
- использование лечебно-минерального потенциала скважины для промышленного розлива лечебно-столовых вод.

В последние десятилетия производство электроэнергии с использованием технологии бинарного цикла приобретает все большую популярность. Такая технология, является надежной и практически не имеет влияния на окружающую среду, кроме этого, позволяет использовать жидкости из менее горячих термальных источников, путем нагревания рабочей жидкости с более низкой температурой кипения.

Стоимость бинарных геотермальных электростанций (ГеоТЭС) зависит от ряда факторов, таких как температура и химический состав геотермальной жидкости, глубина скважин, геологические условия, а также выбранные технологии и оборудование. Эти электростанции используют геотермальные источники с относительно низкими температурами (обычно от 70 до 150°C) и обладают большей гибкостью в выборе мест для строительства по сравнению с традиционными установками.

Основные производители оборудования для бинарных ГеоТЭС включают компании такие как:

Ormat Technologies - мировой лидер в производстве и эксплуатации бинарных ГеоТЭС. Их технологии применяются в различных странах и регионах.

Turboden - итальянская компания, которая производит турбогенераторы для бинарных ГеоТЭС и других промышленных применений.

Exergy - ещё одна итальянская компания, специализирующаяся на бинарных технологиях, использующих принцип Радкина (двухфазные циклы).

Atlas Copco - шведская компания, которая производит оборудование для компрессии и расширения газа, что может быть использовано в бинарных установках [12].

Стоимость конкретной ГеоТЭС будет зависеть от проекта, включающего исследования и бурение, строительство и установку оборудования. В среднем, она может варьироваться от \$2 до \$5 миллионов за мегаватт установленной мощности.

Также рассмотрен вариант установки микроГЭС для преобразования гидродинамической энергии скважины 3Т в электрическую энергию. МикроГЭС является экологически чистым источником электроэнергии, не требующим при эксплуатации постоянного присутствия

обслуживающего персонала. МикроГЭС предназначена для работы на автономного - изолированного от энергетической системы потребителя. Технические характеристики микроГЭС приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные технические характеристики микроГЭС

Напор (нетто), м	160-180	
Расход воды, м ³ /сек	0.03-0.04	
Вырабатываемая мощность, кВт	до 50	
Частота вращения, об/мин	750	
Напряжение, В	230 (+15 -30)	
Частота тока, Гц	50 ± 2	
Число фаз, шт	3	
Соединение фаз	U	
Диаметр рабочего колеса, мм	460	
Масса, кг	– энергоблока	1400
	– блока балластной нагрузки	85
	– устройства автоматического регулирования	200

Оборудование для тепличного хозяйства

Планируется строительство тепличного комплекса площадью 0.5 га для круглогодичного выращивания овощных культур. Комплекс будет оснащен современным оборудованием, включая автоматическую систему управления минеральным питанием и микроклиматом. Выращивание овощей будет осуществляться на основе малообъемной технологии, что обеспечит высокую эффективность и стабильное производство в течение всего года.

Предлагаемые размеры теплицы составляют: ширина - 5 м, высота - 2.5 м, длина - кратная 2.10 м, при этом возможна любая длина. Каркас теплицы будет выполнен из оцинкованных стальных профильных труб и специальных стыковочных узлов. Теплица может быть установлена как на бетонный фундамент, так и без него, с использованием дополнительных металлических фундаментных столбов, которые закапываются в грунт.

Система отопления тепличного комплекса включает в себя источник теплоснабжения, наружные и внутренние тепловые сети, а также объекты теплопотребления. Эта система предназначена для поддержания оптимального температурного режима внутри теплицы в соответствии с технологическими требованиями. В системе отопления предусмотрено три независимых контура: подлотовый, шатровый и надпочвенный. В качестве теплоносителя будет использоваться геотермальная вода из скважины 3Т.

Система капельного полива с узлами приготовления и подачи раствора минеральных удобрений, а также с возможностью повторного использования дренажа питательного раствора, разработана в соответствии с действующими нормативными документами Европы и РФ. Эта система предназначена для приготовления и подачи питательного раствора нужной концентрации к растениям, выращиваемым по методу малообъемной технологии на кокосовом или минераловатном субстрате, в соответствии с техническим заданием заказчика.

Применение капельного полива в тепличном овощеводстве способствует организации высокоэффективного промышленного производства овощной продукции высокого качества, одновременно снижая себестоимость. Автоматизация процесса приготовления питательных растворов и подачи минерального питания позволяет сократить количество рабочих в теплицах и повысить общую производительность труда в тепличном хозяйстве.

Современные технологии выращивания овощей требуют постоянного поддержания определенных режимов микроклимата в теплицах. Автоматизация систем управления микроклиматом в защищенном грунте позволяет экономить 15-25% тепловой энергии, одновременно повышая урожайность, улучшая условия труда персонала и повышая общую культуру производства. Эта система предназначена для автоматизированного контроля параметров и управления микроклиматом в тепличном блоке, обеспечивая оптимальные условия для роста растений и эффективного использования ресурсов.

Оборудование для завода розлива лечебно-столовых и столовых (питьевых) вод

Планируется установка двух линий розлива для лечебно-столовых и столовых питьевых вод с производительностью не менее 1000 бутылок объемом 1.5 литра в час, при общем расходе воды 1800 литров в час, включая использование технической воды. Вода из скважин, будь то термальная или питьевая, сначала поступает в буферную емкость, а затем направляется в систему охлаждения.

После охлаждения до температуры +4°C вода подается в сатуратор, где она насыщается углекислым газом (CO₂). Для этого используются углекислотные баллоны с пищевой углекислотой, подключенные через газобаллонную станцию, а также система фильтрации. После насыщения CO₂ вода поступает на полуавтоматический розлив.

Производство ПЭТ-бутылок осуществляется на полуавтоматическом выдуве из преформы методом вытяжки и раздува. Готовые ПЭТ-бутылки проходят полуавтоматическое ополаскивание для внутренней обработки, затем направляются на конвейерную систему, которая перемещает их в зону налива. Наполненные ПЭТ-бутылки перемещаются по конвейеру к полуавтоматической укупорочной машине для укупоривания. После этого бутылки проходят через этикетировочную машину, где на них наносится полипропиленовая этикетка. Дополнительно может быть нанесена дата изготовления и срок хранения с помощью маркировочного принтера.

После того как ПЭТ-бутылка наполнена, укупорена, снабжена этикеткой и датой производства, она поступает на накопительный стол линии розлива для дальнейшей упаковки. Оператор термотуннеля берет готовый продукт с накопительного стола и устанавливает его на накопительный стол термотуннеля, предварительно поместив подложку из гофрокартона, которая может быть как с буртиком, так и без него. После этого толкатель перемещает бутылку в устройство оборачивания и сваривания пленки, а затем она направляется в термоусадочный туннель для завершения процесса упаковки.

Оздоровительный комплекс

Оздоровительный комплекс, использующий геотермальную энергию в водолечебницах и других банных учреждениях, является крайне эффективным решением. Температура воды в бассейнах обычно составляет 26-29°C, а в ваннах — 38-42°C. Тепловая нагрузка при использовании геотермальной энергии зависит от множества факторов, таких как кондуктивный и конвективный теплообмен, а также теплопередача между бассейном и окружающей средой. Важную роль играют температура наружного воздуха, скорость испарения, осадки и тип системы (замкнутая или открытая).

Проектирование и эксплуатация геоэнергетического комплекса требуют решения множества технико-экономических задач, среди которых:

- выбор оптимальных технологических режимов для разработки и эксплуатации геотермальных месторождений;
- увеличение объемов добычи термальной воды и максимальное использование её энергетического потенциала;
- сокращение сроков ввода в эксплуатацию термодозаборов и увеличение срока их службы;
- повышение надежности и качества работы геотермальных систем;
- обеспечение экологической безопасности при извлечении и утилизации геотермального теплоносителя;
- использование современных методов маркетинга для максимизации прибыли всех участников проекта.

4. Выводы

В результате проведенных исследований в пределах Жаркентской депрессии общие прогнозные запасы геотермальных вод (с температурой более 40°) оцениваются в 295 тыс. м³/сутки, из них 41.63 тыс. м³/сутки - методом опробования скважин. Дебит скважины при самоизливе более 30 дм³/с, температура воды на устье - 66°С.

Анализ опубликованных данных показывает, что наиболее рациональным и перспективным является использование тепловых запасов термальных вод для обогрева теплиц, отопления производственных и жилых помещений, в бальнеологии.

Минеральная вода скважины 3Т является представителем особой группы слабоминерализованных лечебных вод, называемых азотными акротермами, широко используемыми для лечения как в России – Анненские (Хабаровский край), Апачинские (Камчатка), Горячинские (Саяно-Байкальская обл.), Кульдурские (Дальний Восток), так и в Болгарии, Румынии, Югославии и Австрии. В Казахстане близкими аналогами ее являются термы Сарыагаша, Арасан-Капала, Барлык-Арасана. Воду скважины 3Т можно использовать для промышленного розлива в качестве столово-минеральной питьевой. Аналогичные термы уже разливаются – Березанская (РФ), Запорожская (Украина), Ташкентская (Узбекистан), Сары-Агачская (РК). Также есть возможность использования термоминеральных вод для развития санаторно-курортного направления.

Основанием для привлекательности геотермального комплекса является наличие следующих показателей эффективности:

- экономической (общественной) эффективности, учитывающие затраты и результаты, связанные с реализацией проекта, выходящие за пределы прямых финансовых интересов участников проекта и допускающие стоимостное измерение;
- коммерческой (финансовой) эффективности, учитывающие финансовые последствия реализации проекта для его непосредственных участников;
- эффективности акционерного капитала, характеризующие соотношение чистого дохода инвестиционного проекта и величины акционерного (собственного) капитала);
- бюджетной эффективности, отражающие финансовые последствия осуществления проекта для республиканского, регионального или местного бюджета.

Длительность периода оценки для геотермальных объектов принята на уровне 20-25 лет. Это обусловлено тремя главными факторами: средневзвешенный срок амортизации создаваемых основных фондов (геотермальных скважин, теплотрасс, зданий и сооружений) составляет в среднем 20-25 лет; расчетный период оценки эксплуатационных запасов геотермальных месторождений – 25-30 лет. Опыт расчетов эффективности геотермальных месторождений показывает, что после 10-15 лет основные критерии эффективности сильно не меняются, колебания составляют 1-3%.

Таким образом, по результатам проведенных работ, а также с высокими показателями эффективности геотермального проекта можно сказать это будет служить основанием для привлекательности геотермального комплекса и иметь перспективу его внедрения.

References / Литература

- [1] Normative legal act. (2023). The Carbon Neutrality Strategy Until 2060" by Decree No. 121. Retrieved from: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121>
- [2] Kalugin, O.A., Kan, S.M. & Tleuova, Zh.T.. (2015). Some features modern state of thermal mineral waters of Southern Kazakhstan. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technical sciences*, (5), 34-42
- [3] Retrieved from: <https://gisee.ru/articles/geothermic-energy/24511/>
- [4] News portal. (2015). Islandskaja jenergeticheskaja utopiya. Retrieved from: <https://www.meteovesti.ru/news/63566936511-islandskaya-energeticheskaya-utopiya>
- [5] IRENA report. (2023). Renewable energy statistics 2023. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Retrieved from: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>
- [6] Think GeoEnergy portal. Retrieved from: <https://www.thinkgeoenergy.com/>
- [7] Mineral portal. (2018). Teplojenergeticheskie podzemnye vody. Retrieved from: <https://www.mineral.ru/Analytics/StateReport/index.html#>
- [8] Baikadamova, A.M. & Sagin, J. (2021). Survey of the well of the zharkent deposit termalny underground water (well 3-T). *Engineering Journal of Satbayev University*, 143(3), 12–18. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i3.02>
- [9] Вода – источник тепловой энергии [Электронный ресурс]: Retrieved from: URL: <http://watersite.ru/voda-istochnik-teplovo>
- [10] Баева А.Г., Москвичёва В.Н. Геотермальная энергия: проблемы, ресурсы, использование. Изд. М.: СОАН СССР, Институт теплофизики, –1979. – 350 с.
- [11] Муртазин Е.Ж., Байкадамова А., Кисмелёва Б., Комплексное использование термальных вод скважины 3-Т Жаркентской впадины, Вестник КазНУТУ, 7 номер, 2017 год
- [12] Создание опытного производства и разработка принципиальной технологической схемы каскадного использования водно-энергетического потенциала Жаркентского месторождения геотермальных вод для нужд международного центра приграничного сотрудничества «Хоргос» и населенных пунктов Панфиловского района Алматинской области: отчет НИР (промежуточный) / ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина». - Алматы, 2012. – 88 с. – Инв. № 0212РК01125
- [13] Абсаметов М.К., Касымбеков Д.А., Муртазин Е.Ж. Перспективы освоения гидрогеотермальных и гидроминеральных ресурсов Казахстана. /Ж. Вестник КазНАЕН.- Астана, № 4.- 2013

Жаркент геотермалды су кен орнының үлгісінде геотермалды энергияны пайдалану

А.М. Байкадамова*

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: ainurchuk90@mail.ru

Андатпа. Бүгінгі таңда Қазақстан, басқа да көптеген елдер сияқты, жаһандық климаттың өзгеруіне бейімделудің жолдарын іздестіріп, халықаралық ынтымақтастық аясында тұрақты экономикалық дамуды, әлеуметтік жауапкершілікті және қоршаған ортаны қорғауды қамтамасыз етуге тырысуда. 2023 жылдың басында «Қазақстан Республикасының 2060 жылға дейін көміртегі бейтараптығына қол жеткізу стратегиясы» қабылданды, ол «Қазақстан Республикасының жасыл экономикаға көшу тұжырымдамасын» іске асыру, сондай-ақ индустриялық-инновациялық дамудың мемлекеттік бағдарламаларын әзірлеу және іске асыру, БҰҰ-ның Тұрақты даму мақсаттарын жүзеге асыру бойынша ауқымды жұмыстың нәтижесі болды. Стратегияның негізгі мақсаты – 2060 жылға қарай климаттың өзгеруіне және көміртегі бейтараптығына бейімделу үшін Қазақстан экономикасының тұрақты дамуына қол жеткізу. Көмірмен жұмыс істейтін энергия өндірісінің үлесін біртіндеп қысқартып, жаңартылатын энергия көздері мен баламалы энергия үлесін арттыру, сондай-ақ аралық отын ретінде табиғи газды пайдалану жоспарлануда. Орта және ұзақ мерзімді перспективада су ресурстарының жеткіліктілігіне қатысты белгісіздік бар, сондықтан Қазақстанда гидроэнергетиканы дамытудың ұзақ мерзімді көзқарасы қалыптасады. Осыған байланысты елімізде баламалы энергия өндірісін дамыту қажеттілігі туындауда. Дәстүрлі емес энергия көздерінің ішінде геотермалдық энергия – жер қойнауында табиғи түрде пайда болатын жылу – күн радиациясынан кейінгі екінші орынды иеленеді. Соңғы жылдары Жаркент ойпатындағы бор дәуірінің шөгінділеріндегі термалды сулар туралы бірегей фактілер алынды. Жаркент ойпаты әлі күнге дейін ұтымды экономикалық қолданылмаған табиғи термоминералды ресурстардың үлкен әлеуетіне ие. Термалды суларды өндіру баламалы энергия көздерін өндіруді дамыту және республиканы «жасыл экономика» жолына көшіру жағдайында өзекті болып табылады.

Негізгі сөздер: термалды сулар, геотермалдық энергия, ұңғыма, Жаркент ойпаты.

Использование геотермальной энергии на примере Жаркентского месторождения геотермальных вод

А.М. Байкадамова*

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: ainurchuk90@mail.ru

Аннотация. Сегодня Казахстан, как и многие другие страны, активно ищет пути адаптации к глобальному изменению климата, стремится обеспечить устойчивое экономическое развитие, социальную ответственность и охрану окружающей среды в контексте международного сотрудничества. В начале 2023 года была принята «Стратегия достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года», которая стала результатом значительной работы по реализации «Концепции перехода Республики Казахстан к зеленой экономике», а также разработки и реализации государственных программ индустриально-инновационного развития и выполнения Целей устойчивого развития ООН. Основная цель Стратегии — достичь устойчивого развития экономики Казахстана в условиях изменения климата и углеродной нейтральности к 2060 году. Планируется постепенное и планомерное сокращение доли угольной генерации с увеличением доли ВИЭ и альтернативной энергетики, а также использование природного газа в качестве промежуточного топлива. В среднесрочной и долгосрочной перспективе существует неопределенность в отношении наличия достаточных водных ресурсов, поэтому будет сформировано долгосрочное видение развития гидроэнергетики в Казахстане. В связи с этим возникает необходимость развития производства альтернативной энергетики в нашей стране. Среди нетрадиционных источников энергии второе место после солнечной радиации занимает геотермальная энергия — тепло, образующееся естественным образом в недрах Земли. В последние годы на территории Жаркентской впадины были получены уникальные фактические данные о термальных водах меловых отложений. Жаркентская впадина обладает огромным потенциалом природных термоминеральных ресурсов, которые пока не нашли рационального экономического применения. Разработка термальных вод актуальна в условиях развития производства альтернативных видов энергии и при переходе республики на рельсы «зеленой экономики».

Ключевые слова: термальные воды, геотермальная энергия, скважина, Жаркентская впадина.

Received: 05 May 2024

Accepted: 15 August 2024

Available online: 31 August 2024

CONTENTS

<i>Aimbetova I.O., Baigenzhenov O.S., Dagubayeva A.T., Kuzmin A.V., Sarbayeva M.T., Berdi D.K.</i> A MINI REVIEW ON KEY PROPERTIES AND REQUIREMENTS OF VANADIUM ELECTROLYTES	1
<i>Koishina G.M., Dosmukhamedov N.K., Kaplan V.A., Zholdasbay E.E., Argyn A.A., Icheva Yu.B.</i> EXTRACTION OF ZINC FROM DUST FROM ELECTRIC ARC FURNACES BY HIGH-TEMPERATURE CHLORINATING SINTERING.....	8
<i>Abdurzakova B.B., Kauanova L.S., Saimaganbetova N.K.</i> ANALYSIS AND RESEARCH OF FLOCCULANT REAGENTS FOR THICKENING OPERATIONS OF FLOTATION CONCENTRATE IN THE PROCESSING TECHNOLOGY OF FINE-DISPERSED CHROME ORES.....	16
<i>Istekova S.A., Tolybayeva D.N., Issayeva L.D., Ablessenova Z.N., Talassov M.A.</i> THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF GEOPHYSICAL RESEARCH IN THE UNDERGROUND DEVELOPMENT OF ORE DEPOSITS.....	24
<i>Orynbassarova E., Bekbotayeva A., Abdullayeva T., Urmanova D., Nurtas M.</i> METASOMATIC ZONING AND FEATURES OF MINERALIZATION OF PORPHYRY COPPER DEPOSITS OF THE NORTH-EASTERN BALKHASH REGION.....	34
<i>Baikadamova A.M.</i> THE USE OF GEOTHERMAL ENERGY USING THE EXAMPLE OF THE ZHARKENT GEOTHERMAL WATER DEPOSIT.....	41

МАЗМҰНЫ

<i>Аимбетова И.О., Байгенженев О.С., Дагубаева А.Т., Кузмин А.В., Сарбаева М.Т., Берди Д.К.</i> ВАНАДИЙ ЭЛЕКТРОЛИТТЕРІНІҢ НЕГІЗГІ ҚАСИЕТТЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРҒА ҚОЙЫЛАТЫН ТАЛАПТАР БОЙЫНША ШАҒЫН ШОЛУ.....	1
<i>Қойишина Г.М., Досмухамедов Н.К., Каплан В.А., Жолдасбай Е.Е., Арғын А.Ә., Ичева Ю.Б.</i> ЭЛЕКТР ПЕШТЕРІ ШАҢДАРЫНАН МЫРЫШТЫ ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ХЛОРЛАП КҮЙДІРУ АРҚЫЛЫ БӨЛІП АЛУ.....	8
<i>Абдурзакова Б.Б., Кауанова Л.С., Саймаганбетова Н.К.</i> ҰСАҚ ДИСПЕРСТІ ХРОМ КЕНДЕРІН ӨНДЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДАҒЫ ФЛОТАЦИЯЛЫҚ КОНЦЕНТРАТТЫ ҚОЮЛАНДЫРУ ОПЕРАЦИЯЛАРЫ ҮШІН ФЛОКУЛЯНТ РЕАГЕНТТЕРІН ТАЛДАУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ.....	16
<i>Истекова С.А., Толыбаева Д.Н., Исаева Л.Д., Аблесенова З.Н., Таласов М.А.</i> РУДАЛЫҚ КЕНДОРЫНДАРЫН ЖЕР АСТЫ ӘДІСІМЕН ИГЕРУДЕ ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРДІ ҚОЛДАНУДЫҢ ТИІМДІЛІГІ.....	24
<i>Орынбасарова Э., Бекботаева А., Абдуллаева Т., Урманова Д., Нұртас М.</i> СОЛТҮСТІК-ШЫҒЫС БАЛҚАШ АУМАҒЫНЫҢ МЫС ПОРФИР КЕНОРЫНДАРЫНЫҢ МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ ЖӘНЕ МЕТАСОМАТИКАЛЫҚ БЕЛДЕМДЕРІ.....	34
<i>Байкадамова А.М.</i> ЖАРКЕНТ ГЕОТЕРМАЛДЫ СУ КЕН ОРНЫНЫҢ ҮЛГІСІНДЕ ГЕОТЕРМАЛДЫ ЭНЕРГИЯНЫ ПАЙДАЛАНУ.....	41

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Аимбетова И.О., Байгенженев О.С., Дагубаева А.Т., Кузмин А.В., Сарбаева М.Т., Берди Д.К.</i> МИНИ-ОБЗОР ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ И ТРЕБОВАНИЙ К ВАНАДИЕВЫМ ЭЛЕКТРОЛИТАМ...	1
<i>Қойишина Г.М., Досмухамедов Н.К., Каплан В.А., Жолдасбай Е.Е., Арғын А.А., Ичева Ю.Б.</i> ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦИНКА ИЗ ПЫЛИ ОТ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПУТЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ХЛОРИРУЮЩЕГО СПЕКАНИЯ.....	8
<i>Абдурзакова Б.Б., Кауанова Л.С., Саймаганбетова Н.К.</i> АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАГЕНТОВ - ФЛОКУЛЯНТОВ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ СГУЩЕНИЯ ФЛОТАЦИОННОГО КОНЦЕНТРАТА В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ХРОМОВЫХ РУД.....	16
<i>Истекова С.А., Толыбаева Д.Н., Исаева Л.Д., Аблесенова З.Н., Таласов М.А.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ.....	24
<i>Орынбасарова Э., Бекботаева А., Абдуллаева Т., Урманова Д., Нұртас М.</i> МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА БАЛХАША.....	34
<i>Байкадамова А.М.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ ЖАРКЕНТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД.....	41

Учредитель: Satbayev University

Регистрация:

Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан
№ KZ19VPY00056529 от 30.09.2022

Официальный сайт: <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/>

Основан в августе 1994 г. Выходит 6 раз в год

Адрес редакции:

г. Алматы, ул. Сатпаева,
22 тел.: 292-63-46