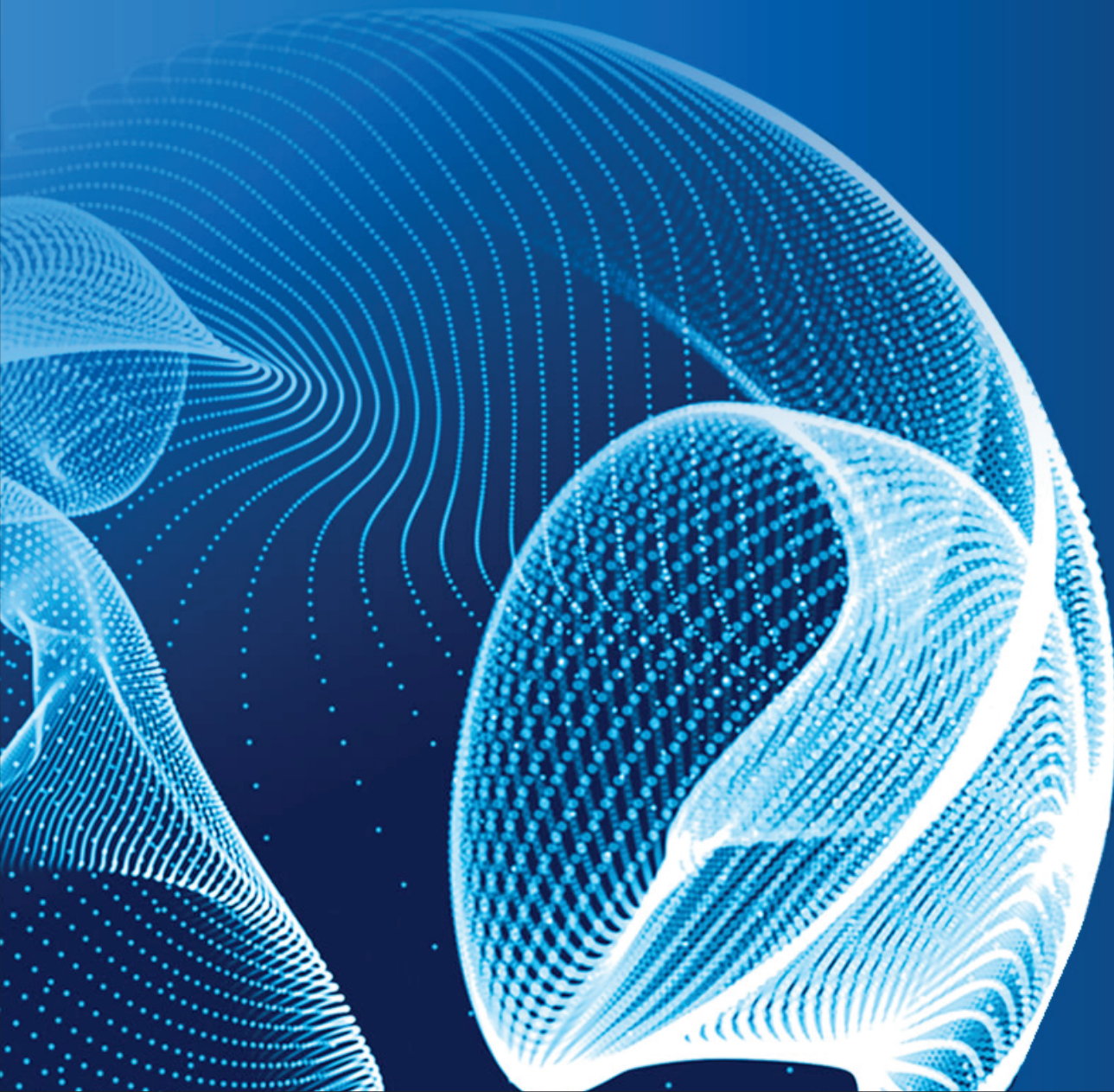


# ENGINEERING JOURNAL of Satbayev University

Volume 145 (Issue 6)  
December 2023



**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**



# **ENGINEERING JOURNAL OF SATBAYEV UNIVERSITY**

145 (6)

**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 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 Sdvyzhkova**, 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 Тау-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 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 Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

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

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

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

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

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

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

**Reimar Seltmann**, 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 Тау-кен-металлургия институты, Қазақстан

## ГЛАВНЫЙ НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

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

## ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

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

**Василий Лозинский**, PhD, асоц.профессор, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Украина

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

**Гулзия Буршукова**, PhD, асоц.профессор, Satbayev University, Казахстан

## ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

**Ata 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

**Мирсерик Байгенженов**, PhD, асоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

**Татьяна Чепуштанова**, PhD, асоц.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 Selmann**, 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 «Днепровская политехника», Украина

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

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i6.01>

## Study of gold-bearing ores using gravity enrichment methods

 G.E. Askarova<sup>1\*</sup>, A.B. Begalinov<sup>1</sup>, M.R. Shautenov<sup>1</sup>, K. Amantaiuly<sup>2</sup>
<sup>1</sup>Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan

 \*Corresponding author: [askarova\\_guljan@mail.ru](mailto:askarova_guljan@mail.ru)

**Abstract.** The article discusses issues related to increasing the efficiency of extracting gold-bearing ores from poor ores using the gravity enrichment method. Gold is a metal whose production and consumption are least susceptible to high fluctuations in the global and domestic markets. Global gold production faces certain challenges, including the depletion of rich and easily enrichable ores and shallow deposits suitable for open-pit mining. However, the simultaneous sharp increase in energy resources and transportation costs has reduced the profitability of domestic mining and technological production. The high variability in content, mineral composition, the presence of a large number of impurities, and differences in the forms and nature of deposits place gold among the most challenging raw materials to process. This requires the integration of various methods of enrichment and processing. The author presents the impact of the centrifugal concentrator Nelson (Knelson) on increasing the gold recovery from gold-bearing poor ores under high climatic conditions. The increase in extraction is achieved through the disruption of ore structure, substantial density reduction, and enhanced mineral liberation through gravity, reaching up to 63%. Thus, the optimization is classified as fine and medium-grained gold.

**Keywords:** raw materials, mineral processing, technological schemes, mineral, concentrate.

### 1. Кіріспе

Алтын – пайдалы қазбалардың ішіндегі асыл металдар түрлерінің бірі. Еліміздің экономикасының тұрақты дамуына байланысты, дағдарыс пен өндірістің құлдырауы жағдайында экономикалық қауіпсіздік үшін қажетті мемлекеттің валюталық резерві ретінде алтынның алатын маңызы өте зор. Қазақстан аумағы өзінің минералдық ресурстарына өте бай, басым бағыттардың бірі алтынның минералдық шикізат базасын нығайту болып табылады [1].

Еліміздің алтын байыту фабрикалары мен өндірісінің алдында алтын өндіруді Президентпен белгілеген деңгейге – жылына 70 тоннаға дейін ұлғайту маңызды міндет болып тұр. Бұл міндетті алтын кен орындарының неғұрлым келешегі бар түрлерін пайдалануға арқылы есебінен шешілуі мүмкін, олардың біріне құрамында алтынны бар қиын байытылатын кен орындарын зерттеу және игеру жатады, сондай-ақ кенді кешенді пайдалану. Мұндай кен орындарының болашағы зор, ең алдымен қазіргі таңда олардың көпшілігі үлкен және өте үлкен кенорын болып табылады. Васильков кен орны Қазақстандағы ең ірі алтын кен орны болып табылады, оны қазіргі уақытта «Altyntay Kokshetau» АҚ компаниясы әзірлеуде. Алайда, осы уақытқа дейін кен денелерінің қалыптасу механизміне, тау жыныстарының алтын кен денелерінің таралу тереңдігіне және т.б. бұл аталмыш кендерге қатысты көптеген мәселелер толық шешілмеген. Табиғи алтынның тығыздығы жоғары - 15.5-тен 19.7 т/м<sup>3</sup> дейін [2].

Алтын минералдары да жоғары тығыздыққа ие. Үлкендігіне қарай табиғи алтын бірнеше түрге бөлінеді: олар ірі (2 мм-ге), ұсақ (0.05-2 мм), шаң тәрізді (5-

50 мкм) және жұқа (5 мкм-ден аз) болып жіктеледі. Байыту үдерістеріндегі жақсы жүруі кен, сондай-ақ құрамында табиғи сап алтын мен кендегі алтын бар минералдардың түзілу табиғаты мен олардың құрамына кіретін кірмелердің және кендегі минералдардың өзара байланыстарына байланысты. Құрамында алтынны бар кендердегі сап алтынды, сондай-ақ ірі және ұсақ табиғи сап алтын гравитациялық үрдістері арқылы жақсы алынады. Кенді, оның ішінде құрамында алтынны бар байыту процесін дұрыс таңдау, сондай-ақ минералдарды ашу үшін қажетті ұсақтау дәрежесін таңдау пайдалы қазбаның заттық құрамы мен құрылымын егжей-тегжейлі зерттеу нәтижелерін ескере отырып қана жүргізілуі және сенімді негізделуі мүмкін. Зерттелетін кендердің заттық құрамы мен жеке ерекшеліктері туралы жеткілікті негізделген және сенімді қорытынды оларды бірқатар әдістерді қолдана отырып терең зерттеу нәтижесінде ғана алынуы мүмкін: химиялық (дисперстік, фазалық химиялық-минералогиялық талдаулар), рентгенқұрылымдық, рентгеноспектрлік, минералопетрографиялық және дисперстік т.б талдаулар жүргізілді [1, 3].

### Кесте 1. Зерттелетін кендегі алтынның рационалды құрамы

№	Алтынның бірлесу нысаны	Бағалы заттың үлесі, г/т	Бөліп алу дәрежесі, %
1	Сап алтын	6.6	68.75
2	Сульфидтер мен тау жыныстары бірге	2.1	21.87
3	Сульфидтермен байланысқан түрі	0.64	6.67
4	Тау жыныстарымен байланысқан түрі	0.26	2.71
	Барлығы	9.6	100

Кенді рационалды талдау нәтижесі бойынша ілеспе алтынның мөлшері: сульфидтермен 7-20%, тау жыныстарымен, минералдармен 2.7-7.11%. Сап алтынның мөлшері 2.4-3.8 г/т құрайды.

**Кесте 2. Зерттелетін алтын құрамды кеннің химиялық құрамы**

№	Элемент, байланыс	Символы	Бағалы заттың үлесі, %
1	Кремний оксиды	SiO <sub>2</sub>	64.62
2	Алюминий оксиды	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.99
3	Кальций оксиды	CaO	4.2
4	Магний оксиды	MgO	1.43
5	Темір жалпы	Fe <sub>жал</sub>	4.7
6	Күкірт жалпы	S <sub>жал</sub>	1.22
7	Сульфидті күкірт	S <sub>сульфид</sub>	1.18
8	Титан оксиды	TiO <sub>2</sub>	0.43
9	Мыс	Cu	0.005
10	Қорғасын	Pb	0.05
11	Мырыш	Zn	0.01
12	Мышьяк	As	2.22
13	Алтын	Au	9.6
14	Күміс	Ag	1.5

Минерологиялық талдауға сәйкес зерттеу сульфидті минералдануы орташа гранодиориттермен ұсынылған. Негізгі кен минералы – арсенопирит, пирит, пирротин және өте аз мөлшерде халькопирит, және басқалары аз мөлшерде кездеседі. Минерологиялық талдау бойынша Васильков кенорындарында сап алтын пирит, арсенопирит, аз мөлшерде халькопирит және висмутин, сондай-ақ кенде аз мөлшерде мышьяк кездеседі.

**Кесте 3. Әр түрлі класс бойынша алтынның дисперстік талдауы**

Классы, мкм	Шығым, %	Алтынның бағалы заттың құрамы, г/т	Таралуы, %
+60	24.63	1.8	41.7
-60+40	19.18	1.1	19.85
-40+20	18.6	0.065	11.37
-20+0	37.59	0.50	27.08
Барлығы	100	1.0	100.0

Мұндай зерттеудің тікелей мақсаты мынадай міндеттерді шешу болып табылады: - кеннің толық минералды құрамын анықтау; - алтынның минералды формалар бойынша таралуын зерттеу; - алтынның кеннің минералды компоненттерімен байланысын анықтау, онда ол жұқа дисперсті қосындылар мен изоморфты қоспалар түрінде болады. Осы сұрақтарға жауап бере отырып, жұқа дисперсті, микро және нано алу тұрғысынан құрамында алтын бар кендерді өңдеудің жоғары тиімді технологиясын жасауға болады. Құрамында алтын бар кендерді технологиялық зерттеу негізінен кендердің нақты құрамын және олардан асыл металдар мен басқа да құнды компоненттерді алу технологиясын анықтау үшін қажетті талдаулар мен эксперименттер жүргізуден тұрады. Құрамында алтын бар кендерді технологиялық зерттеу негізінен кендердің нақты құрамын және олардан асыл металдар мен басқа да құнды компоненттерді алу технологиясын анықтау үшін қажетті талдаулар мен эксперименттер жүргізуден тұрады.

## 2. Негізгі бөлім

Зерттеудің түпкі мақсаты-қауіпсіздік талаптарын сақтай отырып, экономикалық тиімділігі жоғары барлық өнеркәсіптік құнды компоненттерді кендерден максималды түрде алу технологиясын жасау. Байыту үдерісі-бұл жеке элементтер өзара байланысты болатын біртұтас жүйе [4].

Дүние жүзілік өнеркәсіптік тәжірибеде алтын өндіруші кәсіпорындардың негізгі заманауи мәселелері кенорындағы кеннің сапасының нашарлауына қарай сонымен қатар шикізат базасының өзгеруімен және заманауи талаптарға сай келмейтін дәстүрлі технологияларды қолданумен байланысты. Соңғы жылдары алтын кен шикізатын гравитациялық байыту технологиясында үлкен жетістіктерге қол жеткізілді.

Бұл, ең алдымен, алтынның үлкен ғана емес, сонымен қатар өте ұсақ түйіршіктерін де бөліп алуға қолданылатын жаңа құрылғылар қолданылуға болады. Алтын құрамды кендер мысалы, отсадкалау машиналарында, винттік сепараторларда, концентрациялау столдарында бөлу, онда сап алтындарды тығыздығы төмен басқа минералдардың бөліп алу тиімділігі бірнеше есе артты.

Алтын кендерін алдын ала байытуға бола ма деген сұраққа жауап беру үшін фракциялық талдау әдісін жүргізіледі. Фракциялық талдау кен ішіндегі пайдалы минералдардың өзгермейтін қасиеттеріне негізделген. Оларға жататындар, мысалы, тығыздық және магниттік қасиет [5].

Фракциялық талдау негізінде екі мақсатпен жүргізіледі:

1) кенді алдын ала байыту мүмкіндігін анықтау;

2) кенді гравитациялық және магниттік әдіспен байытуда алынатын технологиялық көрсеткіштерге болжам жасау. Кен кедейленген сайын технологиялық көрсеткіштердің төмендей беретіні белгілі. Осыған байланысты оны алдын ала байытудың айтарлықтай маңызы бар.

Оның тиімділігінің бірінші себебі- байыту алдында ұнтақтау жүргізілмейді, кен белгілі ірілікке дейін тек ұсатылады да, байытуға түседі. Бұлай байытуда кеннен екі өнім алынады: ауыр және жеңіл фракциялар. Кейінгі фракция ақырғы қалдық түрінде алынуы тиіс. Оның шығымы кеннің қасиетіне байланысты кең шекте өзгеруі мүмкін, мысалы, 15-40% шамасында. Жеңіл фракцияны қалдық түрінде алудың шарты – ондағы бағалы компоненттің пайздық үлесі егер кен алдын ала байытусыз, дәстүрлі түрде байытылғанда алынатын қалдықтағы компоненттің пайздық үлесінен жоғары болмау керек.

Фракциялық талдауда сынама кенді белгілі ірілікке дейін ұсатқаннан кейін алынады да, әртүрлі фракцияларға бөлініп бағалы компоненттің әр фракцияларға бөлінуі және олардағы бағалы компоненттің пайздық үлестері анықталады.

Осы деректерден алынған нәтижелер негізінде байытылу сызықтары сызылып, одан жеңіл фракцияның шығымы табылады. Толығырақ немесе дәлірек дерек алу үшін фракциялық талдау кенді бірнеше ұсақтыққа дейін жеткізіп, әр вариантта алынған нәтижелерді салыстыру жөн.

Әрине, фракциялық талдауға неғұрлым ұсақталған кен түскен сайын алынатын жеңіл фракцияның шығымы арта түседі. Себебі пайдалы компонентсіз кесектер немесе өте кедей кесектер саны көбейе бастайды.

Фракциялық талдауда кенді неше фракцияға бөлу керектігі кен қасиетіне және қойылған мақсатқа байланысты.

Көпшілік жағдайда төрт фракцияға бөлінеді. Егер фракциялық талдау тығыздыққа негізделсе, бастапқы сынама әртүрлі тығыздықты сұйықтардан өткізіледі. Талдау алдымен не аз тығыздықты (мысалы, 2700 кг/м<sup>3</sup>), не ең-үлкен тығыздықты (мысалы, 3500 кг/м<sup>3</sup>) сұйықтан өткізіліп, біртіндеп одан кейінгі тұрған тығыздықты сұйықтықтан өткізіледі. Алынған әр фракцияның шығымы есептеліп, ондағы компоненттің пайыздық үлесі анықталып, әр фракцияларға бөлінулері есептеледі [3,4].

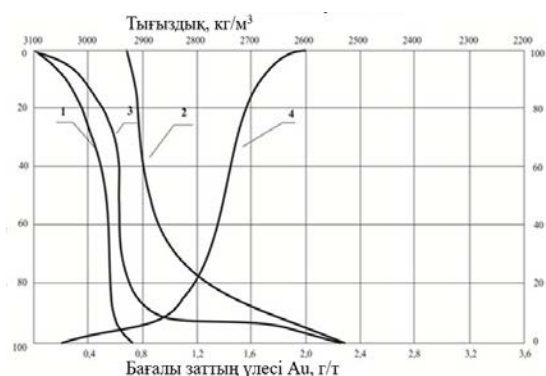
Фракциялық талдау жүргізудің екінші мақсаты – гравитациялық байыту әдістерімен дәстүрлі байытуда алынатын технологиялық көрсеткіштерге болжам жасау. Бұл мақсат қойылғанда кен фракциялық талдауға түсер алдында пайдалы минералдар жеткілікті ажырағанша ұсатылалы, демек одан ақырғы өнімдер – концентрат және қалдық алу мақсаты қойылады. Осы мақсатқа сай кенді қандай фракцияларға бөлу қажеттігі анықталады. Алынған деректер нәтижесінде концентрат сапасы, оған компоненттің бөліну дәрежесі және ақырғы қалдықта жоғалым мөлшері айқындалады. Кеннің фракциялық құрамы туралы мәліметтер бізге металдардың тығыздық фракциялары мен өлшем кластары бойынша таралуы

туралы ақпарат берді. Бұл жұмыста байыту сызықтары Анри-Рейнхард типі бойынша салынған, бұл сызықтар бастапқы кенде де, байыту өнімдерінде де мақсатты өнімнің бағалы заттың құрамы мен шығым арасындағы байланысты көруге көмектеседі. Алдын ала байыту үрдістері кеннің қасиеттерінің айырмашылығы негізінде жүргізіледі. Кеннің сепкілдігі байыту әдісін таңдауда өте үлкен роль атқарады. Кен ұсақ сепкілді болса, мысалы минерал түйіршіктерінің диаметрі 0.2 мм-ден артпаса, оны байыту тек флотациялық байыту әдісін қолданумен жүргізіледі, ал 1.0 мм-ден жоғары болса гравитациялық әдіс қолданылады, егер пайдалы минералдар тығыздығы бос жыныс минералдарынан айтарлықтай үлкен болса. Байытуда үлкен роль атқаратын бір жай - минералдардың өзара байланысу сипаттамалары. Пайдалы минералдардың жақсы бөлінуінің бір шарты-олардың бос жыныс минералдарынан және өзара неғұрлым жақсы ажырауы. Бірсыпыра кендерде оларды байыту алдында толық ажырату үшін өте ұнтақтау керек, ал ол кеннің шламдануына әкеліп соғады, демек қалдықта жоғалым өседі. Сондықтан минералдық талдауда осы жай нақтылы анықталуы керек. Егер шын мәнінде оларды кенді ұнтақтауда ажырату мүмкін болмаса, онда бір ғана қорытынды шығарылады: кенді ірілеу ұнтақтап бір-бірімен тығыз байланысты шоғырларды толығырақ бөліп, сапасыз концентрат түрінде бөліп алу. Негізгі байыту әдістері ретінде гравитациялық (отсадкалау столдарында, винтті сепараторларда концентрациялау столдарында) байыту жатады.

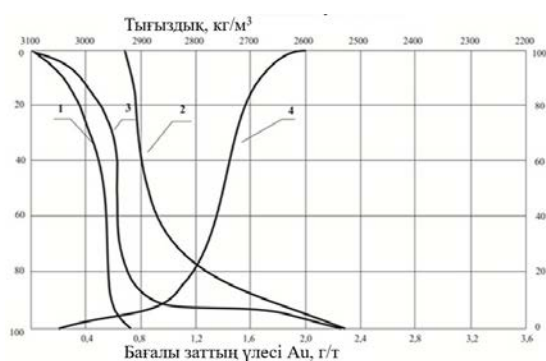
**Кесте 4. Әр кластағы -40+20, -20+10 және -10+5 мм Васильковск кенорнының фракциялық талдау**

0	Шығым, %	Бағалы заттың үлесі, %	Көбей- тіндісі	Жеңіл фракция			Ауыр фракция		
				Шығым,%	Бағалы зат- тың үлесі, %	Көбейтіндісі	Шығым, %	Бағалы заттың үлесі, %	Көбей- тіндісі
класс -40+20 мм									
+3000	8.23	0.24	1.97	8.23	0.24	1.97	100	0.65	65
-3000+2900	3.52	0.41	1.44	11.75	0.39	4.58	91.77	0.66	60.57
-2900+2800	10.75	0.59	6.34	22.5	0.95	21.4	88.25	0.70	61.78
-2800+2700	16.50	0.55	9.07	39	0.54	21.06	77.5	0.77	59.7
-2700+2600	38.0	1.62	61.56	77	0.61	46.97	61	0.20	12.2
-2600	23.0	2.91	66.93	100.0	0.65	65	23	2.91	66.93
Барлығы	100	1.47	147.31	-	-	-	-	-	-
класс -20+10 мм									
+3000	3.99	0.24	0.96	3.99	0.24	0.98	100.0	0.69	69
-3000+2900	11.64	0.41	4.77	15.63	0.30	4.7	96.01	0.70	67.21
-2900+2800	35.30	0.59	20.83	51.93	0.53	27.52	84.37	0.75	63.28
-2800+2700	37.11	0.55	20.41	90.04	0.57	51.32	49.07	0.86	42.20
-2700+2600	8.57	1.62	13.88	95.61	0.63	60.23	11.96	1.75	20.93
-2600	3.39	2.91	9.86	100.0	0.69	69	3.39	2.03	6.88
Барлығы	100	0.65	65	-	-	-	-	-	-
класс -10+5 мм									
+3000	6.98	0.17	1.19	6.98	0.17	1.19	100.0	0.71	71
-3000+2900	14.64	0.42	6.15	21.62	0.35	7.6	94.02	0.75	70.52
-2900+2800	26.73	0.64	17.11	48.35	0.53	25.63	78.38	0.81	63.5
-2800+2700	40.50	0.59	23.9	88.85	0.56	49.76	41.65	0.96	39.9
-2700+2600	5.45	1.31	7.14	94.3	0.60	56.58	11.15	1.97	21.96
-2600	5.70	2.60	14.82	100.0	0.71	71	5.70	2.60	14.82
Барлығы	100.0	0.71	71	-	-	-	-	-	-

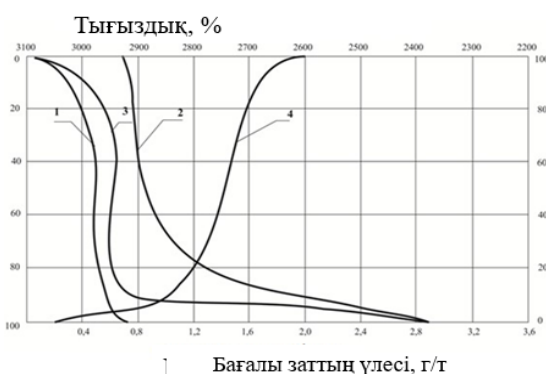




Сурет 1. -40+20 мм кластың алтын бойынша байыту сызығы



Сурет 2. -20+10мм кластың алтын бойынша байыту сызығы



Сурет 3. -10+5мм кластың алтын бойынша байыту сызығы: 1 – қалқып шыққан фракция; 2 – батқан фракция; 3 – элементарлы фракция; 4 – тығыздық сызығы

-40+20, -20+10 и -10+5 мм ірілік класы үшін гравитациялық байытылымдылығы есептелді.

Алтын құрамды кенді алдын-ала байыту үшін ірі ұсақталған кейін қолданылады. Қазіргі кезде көптеген байыту фабрикаларында алтынқұрамды кенді отсадкалау машинасында байытып бөлу әдісі кеңінен қолданылады.

Бұл әдісті қолданудың болашағы зор, бұл әдістің артықшылықтары төменде сипатталған:

- тиімді технологиялық өнімділікті сақтай отырып, 1000 т/сағ дейінгі кеннің едәуір үлкен көлемін игеруге мүмкіндік береді. Бұл ретте өңдеуге көлемі 300 мм-ден 6-ге дейінгі кендер қолданылады.

- үлкен күрделі шығындарды мысалы: электр энергиясы мен жұмыс материалдарына шығындарды қажет етпейді.

- үрдіс іс жүзінде толығымен автоматтандырылған.

- технологиялық аппараттарда минералды шикізатты бөлудің дәлдігі жоғары.

Алынған алтын құрамды Васильков кенорнының кенінің фракциялық талдауының қорытындысы бойынша отсадкалау машинасында байыту оңтайлы болып табылады. Алынған гравитациялық концентраттың оңтайлы технологиялық көрсеткіштерін анықтау. Отсадкалау машинасына әсер ететін факторлар: судың қозғалыс жиілігі, диафрагманың қозғалыс амплитудасы, табалдырықтың биіктігі, судың мөлшері [5,6].

Бірқатар бастапқы кенді отсадкалау (шөгілдіру) аппараттарында байыту кезінде бай концентраттарды алу үшін судың қозғалыс жиілігін арттыру және диафрагманың қозғалысын азайту арқылы қол жеткізіледі. Алынған бастапқы концентраттар концентрациялау столдарында екі рет тазарту операциясынан өтеді. Гравитациялық байыту әдістерінің (винттік сепаратор, бақылау операциясы ретінде шөгілдіргіш машиналарында және тазалау операциясы ретінде концентрациялау столының) көрсеткіштері 5-7 кестеде келтірілген [5,6].

Кесте 5. Винттік сепаратордағы байытудың технологиялық көрсеткіштері

Өнім аттары	Шығым		Бағалы заттың үлесі, г/т	Алтынның салмағы, г	Таралуы, %
	г	%			
1-концентрат	43.0	2.15	21.5	0.4622	13.39
2-концентрат	65.0	3.15	7.6	0.2470	7.15
Қалдық	1892.0	94.6	2.9	2.7434	79.46
Кен	2000	100	3.5	3.4526	100

Кесте 6. Отсадкалау машинасындағы байытудың технологиялық көрсеткіштері

Өнім аттары	Шығым		Бағалы заттың үлесі, г/т	Алтынның салмағы, г	Таралуы, %
	г	%			
1-концентрат	32	1.6	77	0.1232	5.76
2-концентрат	51	2.55	5.7	0.1454	6.8
Қалдық	1917	95.85	1.95	1.8690	87.44
Кен	2000	100	2.3	2.1376	100

Кесте 7. Концентрациялау столындағы байытудың технологиялық көрсеткіштері

Өнім аттары	Шығым		Бағалы заттың үлесі, г/т	Алтынның салмағы, г	Таралуы, %
	г	%			
1-концентрат	29.0	1.45	11	0.1595	4.57
2-концентрат	48.0	2.4	4.5	0.1080	3.1
Қалдық	1923	96.15	3.35	3.2210	92.33
Кен	2000	100	3.5	3.4885	100

6-кестеде келтірілген зерттеу нәтижелері сүйене отырып диафрагманың тербеліс жиілігімен минутына 295, су ағынының жылдамдығы 5.22 дм<sup>3</sup>/мин және диафрагманың жүрісі 10 мм болған кезде алынды.

Бастапқы концентраттың шығымдылығын арттыру үшін режимі өзгертілді:

- диафрагманың тербеліс жиілігі минутына 224;

Суды тұтыну өзгеріссіз қалдырылады. Тазалау операциясы концентрациялау столында жүргізілді.

**Кесте 8. Байыту үдерістерінің технологиялық көрсеткіштері**

Тербеліс жиілігі, мин <sup>-1</sup>	Өнімнің аттары	Шығымы, %	Алтынның құрамы, г/т	Алтынның бөліп алу дәрежесі, %
295	Концентрат	7.11	22.1	41.58
	Қалдық	92.89	2.39	58.42
	Кен	100	3.8	100
224	Концентрат	6.07	25.2	40.21
	Қалдық	93.93	2.4	59.71
	Кен	100	3.8	100

8-кестедегі деректер сүйенсек бастапқы концентраттың шығымы отсадкалау машинасында тазарту 6-7%-ға дейін алтынның бағалы заттың құрамы 22-25 г/т және бөліп алу дәрежесі 41.58-40.21% құрайды.

**3. Қорытынды**

Әдебиеттерді шолу нәтижелері бойынша келесі қорытындылар жасалды:

- алдын ала байыту үрдістері асыл металл кендерін өңдеуде кеңінен қолданылады және көптеген артықшылықтарға ие;

- Васильковск кен орнының кенінің сапалық және сандық талдауын ескере отырып, бұл кен шикізатын отсадка (шөгіндіргіш) гравитациялық әдіспен алдын ала байыту үшін жарамды деп санауға болады, өйткені бұл әдіс минералды шикізатты бөлуде жоғары дәлдікті қамтамасыз ете алады. Жоғарыда айтылғандарға сүйене отырып, зерттеу жұмыстың мақсаты Васильковск кен орнындағы қиын байытылатын алтын құрамды кендерін гравитациялық алдын ала байытудың оңтайлы технологиялық режимдерін жасау болып табылады.

Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды:

- кендегі құрамында алтын бар минералдары мен барлық минералдардың химиялық және минералдық құрамын зерттеу;

- фракциялық талдау әдісімен ұсатылған кеннің гравитациялық байытылуын зерттеу;

- кеннің фракциялық құрамын есептеу және гравитациялық байыту графиктерін құру;

- Негізгі байыту көрсеткіштерін есептеу, машина класын және гравитацияны алдын ала байыту үшін қажетті бөлу тығыздығын анықтау;

- алдын ала гравитациялық байыту сұлбасын жасау.

Ірі ұсақталған кеннің гравитациялық байытылуын (40-60 мм дейін) фракциялық талдауды қолдану арқылы бағалау кенді ауыр және жеңіл фракцияларға бөлу мүмкіндігін анықтады. Тығыздығы +2900 кг/м<sup>3</sup> ауыр фракцияда 10.2% өндірумен барлық алтынның 25% дейін ауыр фракцияда кенмен салыстырғанда, ол алтынмен 2.4 есе байытылған көрінді.

**Әдебиеттер / References**

- [1] Shohin, V.N. (1993). Gravitacionnye metody obogashhenija. *M.: Nedra*
- [2] Bert, R.O. (1990). Tehnologija gravitacionnogo obogashhenija. *M.: Nedra*
- [3] Arsent'ev, V.A., Bashhenko, N.T., Bogdanov, O.S. & etc. (1984). Spravochnik po obogashheniju rud. *M.: Nedra*
- [4] Mitrofanov, S.I. (1962). Issledovanie poleznyh iskopaemyh na obogatimost'. *M.: Gosgortehizdat*
- [5] Leonov, S.B., Bel'kova, O.N. (2001). Issledovanie poleznyh iskopaemyh na obogatimost'. *M.: Intermetinzhiniring*
- [6] GOST 4790-80. (1988). Metod frakcionnogo analiza. *M.: Nedra*

**Алтын құрамды кендерді гравитациялық байыту әдістерімен зерттеу**

Г.Е. Аскарова<sup>1\*</sup>, А.Б. Бегалинов<sup>1</sup>, М.Р. Шаутенов<sup>1</sup>, К. Амантайұлы<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [askarova\\_guljan@mail.ru](mailto:askarova_guljan@mail.ru)

**Аңдатпа.** Мақалада гравитациялық байыту әдісімен кедей кендерден құрамында алтын бар кендерді өндірудің тиімділігін арттыру мәселелері қарастырылған. Алтын-бұл әлемдік және отандық нарықтарда сұранысы мен тұтынуы жоғары ауытқуларға аз ұшырайтын металл. Әлемдік алтын өндіру бай және жеңіл байытылатын кендердің сарқылуымен және кен орнын ашық өндіру үшін қол жетімді таяз жатқан қорлармен байланысты белгілі бір қиындықтарға тап болады. Бірақ сонымен бірге энергия ресурстары мен көліктің күрт қымбаттауы отандық тау-кен-технологиялық өндірістердің рентабельділігін төмендетті. Құрамындағы минералды құрамындағы жоғары өзгергіштік, көптеген қоспалардың болуы, секрециялардың формалары мен сипатындағы айырмашылықтар алтынды байыту мен өңдеудің әртүрлі әдістерін біріктіруді қажет ететін шикізаттың ең қиын түрлеріне қояды. Автор Нельсонның (Knelson) орталықтан тепкіш хабының жоғары климаттық жағдайларда құрамында алтыны бар кедей кендерден алтын алу дәрежесінің жоғарылауына әсерін ұсынады. Кен құрылымын бұзу және тығыздықты айтарлықтай төмендету, сондай-ақ ауырлық күші арқылы минералдардың ашылуын 63%-ға дейін арттыру арқылы өндірісті арттыру. Осылайша оңтайландыру ұсақ және орташа түйіршікті алтын ретінде жіктеледі.

**Негізгі сөздер:** шикізат, пайдалы қазбаларды байыту, технологиялық сұлба, минерал, гравитациялық байыту әдісі, концентрат, қалдық.

## Исследование золотосодержащих руд методами гравитационного обогащения

Г.Е. Аскарова<sup>1\*</sup>, А.Б. Бегалинов<sup>1</sup>, М.Р. Шаутенов<sup>1</sup>, К. Амантайұлы<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [askarova\\_guljan@mail.ru](mailto:askarova_guljan@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности добычи золотосодержащих руд из бедных руд с помощью гравитационный метода обогащения. Золото является металлом, спрос и потребление которого на мировом и отечественном рынках в наименьшей степени подвержены высоким колебаниям. Мировая добыча золота испытывает определенные трудности, связанные с истощением запасов богатых и легкообогатимых руд и неглубоко залегающих, доступных для открытой добычи месторождения. Но одновременно резкое удорожание энергоресурсов и транспорта снизило рентабельность отечественных горно-технологических производств. Высокая изменчивость содержания, минерального состава, наличие большого количества примесей, различия в формах и характере выделений ставят золото в ряд наиболее трудно перерабатываемых видов сырья, требующих интеграции различных способов обогащения и переработки. Автором представлено влияние центробежного концентратора Нельсона (Knelson) на повышение степени извлечения золота из золотосодержащих бедных руд при высоких климатических условиях. Повышение добычи за счет разрушения структуры руды и существенному уменьшению плотности, а также увеличению раскрываемости минералов с помощью гравитации до 63%. Таким образом, оптимизация классифицируется как мелкое и средне-крупнозернистое золото.

**Ключевые слова:** сырье, обогащение полезных ископаемых, технологические схемы, минерал, гравитационные обогащения, концентрат, хвосты.

Received: 06 July 2023

Accepted: 16 December 2023

Available online: 31 December 2023

# Electric smelting of phosphorites with production of a ferroalloy, calcium carbide and sublimation of phosphorus

R. Uteyeva<sup>1\*</sup>, V. Shevko<sup>1</sup>, D. Aitkulov<sup>2</sup>, A. Badikova<sup>1</sup>, S. Tleuova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan*

<sup>2</sup>*National Center on complex processing of mineral raw materials, Almaty, Kazakhstan*

\*Corresponding author: [raisa.uteyeva@mail.ru](mailto:raisa.uteyeva@mail.ru)

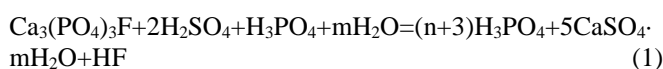
**Abstract.** The article presents the results of a study of the interaction of phosphorites from the Chulaktau deposit of the Karatau basin with coke and steel shavings. The studies were carried out by computer thermodynamic modeling using the HSC-10 software package, together with mathematical planning of experiments, as well as by electric phosphorite melting in an electric arc furnace. On the basis of the conducted studies it was established that the joint formation of intermediate products from the systems  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{-SiO}_2\text{-C-Fe}$  is possible at the temperature  $> 1635\text{-}1702^\circ\text{C}$ . Based on the obtained volumetric and planar images of the coke and steel shavings effect on the technological parameters of the phosphorite's electric smelting, it was found that in order to produce FS25 grade ferrosilicon containing 20-30% of Si and calcium carbide with a capacity of  $245.1\text{-}248.1 \text{ dm}^3/\text{kg}$  (2<sup>nd</sup> grade), the process should be carried out in the presence of 52-58% of coke and 24.4-38% of steel shavings. In this case, the extraction degree of silicon into the ferroalloy was 70-80%, and calcium into calcium carbide – 60-70%.

**Keywords:** phosphorite, thermodynamic modeling, electrical melting, calcium carbide, ferroalloy.

## 1. Introduction

Producing fertilizers from phosphate raw materials is possible not only on the basis of wet and dry phosphoric acid, but also directly from phosphorites [1-6]. The bulk of fertilizers, however, is produced using phosphoric acid.

The average  $\text{P}_2\text{O}_5$  content in Karatau phosphorites is 24.5%. To obtain wet phosphoric acid, phosphorite must contain  $\geq 28\%$  of  $\text{P}_2\text{O}_5$  [1]. Therefore, the phosphorites are concentrated using usually flotation or chemical methods. So, flotation of nodular phosphorites containing 9-18% of  $\text{P}_2\text{O}_5$  makes it possible to produce a 25-35%  $\text{P}_2\text{O}_5$  concentrate [7], and flotation of shell phosphorites containing 4-7% of  $\text{P}_2\text{O}_5$  – a 28.5-35%  $\text{P}_2\text{O}_5$  concentrate [8-10]. A phosphate concentrates with 26-27.9% of  $\text{P}_2\text{O}_5$  was obtained from phosphorite containing 16.2% of  $\text{P}_2\text{O}_5$  by nitric acid concentration [11], and when using acetic and formic acids, it is possible to obtain a 30-35%  $\text{P}_2\text{O}_5$  phosphate concentrate [12]. The chemical concentration of phosphorites based on the extraction of calcium into solution was shown in [13]. Production of phosphoric acid from phosphate concentrates is carried out using sulfuric, nitric, hydrochloric, fluorosilicic, and hydrofluoric acids [14-17]. Despite the fact that the nitric acid extraction makes it possible to obtain 27-35%  $\text{P}_2\text{O}_5$  phosphoric acid, hydrochloric acid extraction – 55-58%  $\text{P}_2\text{O}_5$  phosphoric acid, and fluorosilicic acid one – 25-30%  $\text{P}_2\text{O}_5$  phosphoric acid, the main method for producing wet phosphoric acid is decomposition of phosphate concentrates with a mixture of aqueous solutions of sulfuric and phosphoric acids according to the equation:

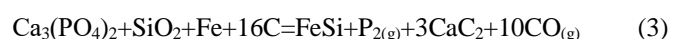


Disadvantages of this method are the high sulfuric acid consumption and formation of a large amount of waste – phosphogypsum (4.27-6.58 tonnes per 1 tonne of  $\text{P}_2\text{O}_5$  in terms of dry dihydrate) [18]. Less stringent requirements for  $\text{P}_2\text{O}_5$  content ( $\geq 21\%$ ) are imposed on phosphorites used for producing yellow phosphorus by the electrothermal method [1]. However, electric smelting of these phosphorites is accompanied by the formation of waste slag (10-12 tonnes per 1 tonne of phosphorus), which not only occupies land, but also has a limited demand in the construction industry because it contains 2-2.5% of  $\text{P}_2\text{O}_5$ , which, in the presence of moisture, emits a poisonous gas – phosphine.

## 2. Materials and methods

The main components of Karatau and Aktobe phosphorites are  $\text{P}_2\text{O}_5$  (16-27%), and, in addition,  $\text{CaO}$  (20-44%) and  $\text{SiO}_2$  (14-55%). Therefore, the phosphorites are a potential source for obtaining products containing calcium and silicon. In this regard, we have developed a technology for the processing of phosphorites by electric smelting with the simultaneous production of siliceous ferroalloy, calcium carbide and stripping of phosphorus into the gas phase.

The proposed method for processing phosphorites is based on the following reactions:



From a thermodynamic point of view, these reactions become possible at temperatures of above 1702.8; 1692.4; 1635.1 and 1639.2, respectively (Table 1, shaded area).

We have previously shown [20] that at the interaction of  $Ca_3(PO_4)_2$  with silicon dioxide, carbon, and iron under equilibrium conditions, at a temperature of 1850-1950°C, it is possible to obtain calcium carbide with a capacity of 300-

360 dm<sup>3</sup>/kg and FS45 ferrosilicon (39-42% of Si) and to achieve the complete sublimation of phosphorus into gas.

This article examines the results of electric smelting of Chulaktau phosphorites (Karatau basin) with production of a ferroalloy, calcium carbide and sublimation of phosphorus into the gas phase.

Table 1. Effect of temperature on  $\Delta G(kJ)$ \*of  $Ca_3(PO_4)_2$ ,  $SiO_2$ , Fe and C interaction

Reaction #	Temperature, °C										
	1000	1200	1400	1600	1635.1	1692.4	1693.2	1702.8	1800	2000	2200
2	2022.4	1437.5	860.9	290.6	280.7	29.4	27.1	0	-272.9	-544.9	815.0
3	1777.9	1259.3	748.4	235.2	221.8	0	-2.0	-26.4	-272.8	-759.9	-1235.5
4	2059.3	1401.7	752.1	110.9	0	-180.6	-183.1	-213.0	-518.8	-1126.8	-1722.7
5	1748.8	1225.9	713.3	219.2	140.4	1.9	0	-13.6	-241.4	-638.8	-960.7

\*-  $\Delta G_0$  was calculated using the Reactions Equation module of the HSC-10.0 software package [19]

The differential thermal analysis of the Chulaktau phosphorite used for the electric smelting is shown in Figure 1.

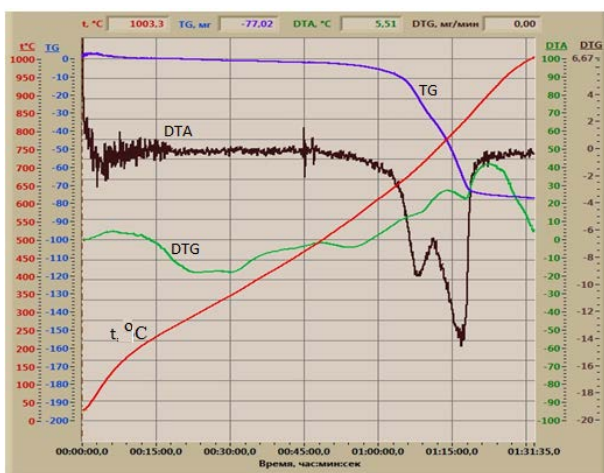


Figure 1. DTA of Chulaktau phosphorite

It can be seen that the heating is accompanied by two endothermic effects at temperatures of 674 and 838°C, which are associated with the decarbonization of  $MgCO_3$  and  $CaCO_3$ . The phosphorite weight loss was 11.6%. The phosphorite after calcination at 950-960°C contained, wt %: 51.1  $Ca_3(PO_4)_2$ ; 25.59  $SiO_2$ ; 12.9 CaO; 1.8 MgO; 1.3 FeO; 0.91  $Fe_2O_3$ ; 1.7  $Al_2O_3$ ; 0.4  $CaSO_4$ ; 0.4  $Na_2O$ ; 0.6  $K_2O$ ; 0.1  $TiO_2$ ; 0.1 MnO; 2.7  $CaF_2$ ; 0.5  $CO_2$ ; 0.2  $H_2O$ . The composition of steel shavings, wt %: Fe-97.6%, C-1.7%, Si-0.3%, Mn-0.2%, Cr-0.1, others-0.1%. The composition of coke, wt %: C-86.0;  $SiO_2$ -4.9;  $Fe_2O_3$ -2.2; CaO-1.5;  $Al_2O_3$ -1.8; MgO-0.4; S-0.8;  $H_2O$ -1.1; others-1.3. The composition of quartzite, wt %:  $SiO_2$ -97; CaO-0.7;  $Al_2O_3$ -0.8;  $Fe_2O_3$ -0.8;  $H_2O$ -0.1; others-0.3.

The studies included the process' computer thermodynamic modeling combined with mathematical planning of experiments, as well as the electric smelting of the phosphorite in an electric arc furnace.

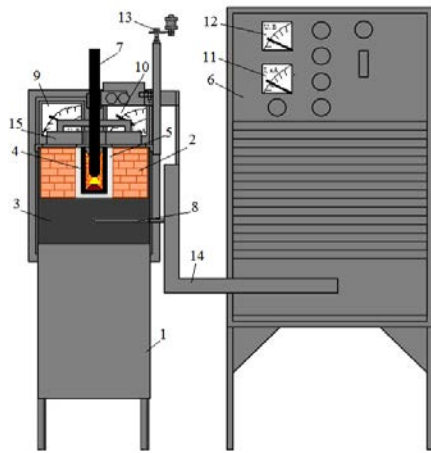
The thermodynamic modeling was carried out using the HSC-10.0 Chemistry software package developed by Outokumpu Research Oy (Finland) [19]. The developers of the software package were based on the ideology of the SGTE (Scientific Group Thermodata Europe) consortium, which is engaged in the creation, support and distribution of high-quality databases designed to calculate the equilibrium composition of chemically reacting systems, as well as combining the efforts of researchers from different countries in order

to unify thermodynamic data and methods for obtaining them. The SGTE includes specialized research centers in Germany, Canada, France, Sweden, the UK and the USA. To calculate the equilibrium, we used in our work the Equilibrium Compositions subprogram of the HSC-10.0 software package, which is based on the minimum Gibbs energy principle. The equilibrium parameters of a thermodynamic system are determined by solving the mathematical problem of finding the extremum, considering all restrictions, using the Lagrange functions and Newton's method of successive approximations. The calculation of the equilibrium distribution of elements was implemented according to the algorithm developed in M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan) [21]. The experiments were carried out at the installation shown in Figure 2.

The electric smelting of the charge was carried out in a single-electrode arc furnace (up to 15 kVA power) lined with chromium magnesite bricks. The bottom electrode was made of a graphite block. A graphite crucible (d=6 cm, h=12 cm) was placed on the hearth. The upper part of the furnace was closed with a removable cover with holes for the graphite electrode with diameter of 3 cm and gas outlet. The crucible was preliminarily heated by an arc for 20-25 min. After that, the first portion of the charge (200-250 g) was loaded into the crucible and melted for 3-6 minutes. Then, every 4-6 minutes, 100-150 g portions of the charge were added to the crucible. The total charge weight for 1 experiment was 700-1000 g. During the melting period, the current strength was 350-400A; the voltage was 30-35V. Electricity was supplied to the furnace from a TDZhF-1002 transformer. The required power was maintained by a thyristor regulator. After the end of the melting process, the furnace was cooled for 6-7 hours. The graphite crucible was removed from the furnace and broken. The resulting ferroalloy was weighed and analyzed to determine metals by the atomic absorption method using an AAS-1 instrument (Germany), as well as a JSM-6490LV scanning electron microscope with an INSA Energy energy-dispersive microanalysis system (Japan).

In addition, the silicon content in the alloy ( $Si_{(alloy)}$ , %) was determined on the basis of its density (D, g/cm<sup>3</sup>), which was found by the pycnometric method. Then the silicon content in the alloy was also calculated using the expression [22]:

$$Si_{(alloy)} = 252.405 - 101.848 \cdot D + 18.209 \cdot D^2 - 1.243 \cdot D^3 \quad (6)$$



I-sketch



II – general appearance

Figure 2. Electrothermal installation for the phosphorite’s electric smelting: 1 – furnace casing, 2 – chromium magnesite lining, 3 – carbon graphite hearth, 4 – graphite crucible, 5 – carbon graphite layer, 6 – transformer TDZhF-1002, 7 – graphite electrode, 8 – lower current supply, 9-12 – control ammeters and voltmeters, 13 – electrode movement mechanism, 14 – flexible part of the short network, 15 – furnace cover

The quality of the resulting calcium carbide and the content of the main substance (CaC<sub>2</sub>) in it were determined by measuring its capacity – the volume of acetylene (dm<sup>3</sup>) that is released during the interaction of 1 kg of calcium carbide with water.

To determine the optimal values of temperature and amount of iron, which ensure the maximum extraction of silicon from the phosphorite into the alloy, calcium into calcium carbide and phosphorus into the gas phase and production of commercial products, further studies included planning the experiments using the second-order rotatable designs (Box-Hunter plans) [23] with the construction of volumetric and planar images of the process parameters [24] followed by their geometric optimization. The independent factors in the study were the amount of steel shavings and the amount of coke (% of the phosphorite mass).

### 3. Results and discussion

Figures 3 and 4 show the effect of coke and steel shavings on the extraction degree (α, %) of silicon into the alloy, calcium into calcium carbide, and the concentration (C, %) of these metals in the resulting alloy and calcium carbide.

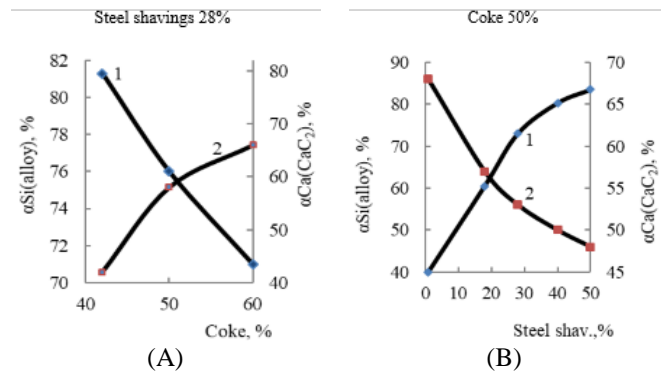


Figure 3. Effect of coke (a) and steel shavings (b) on the extraction degrees of silicon into the alloy and calcium into calcium carbide: 1-αSi(alloy), %; 2-αCa(CaC<sub>2</sub>), %

It can be seen that at a constant amount of steel shavings (28%), an increase in the amount of coke leads to a decrease in αSi(alloy) and a marked growth in αCa(CaC<sub>2</sub>) (from 40.3% at 42% of coke to 68.8% at 58% of coke). The decrease in αSi(alloy) is associated with the development of the processes of formation of SiC and SiOgas, that is, with the loss of part of the silicon. The effect of the amount of steel shavings on the extraction degrees of silicon into the alloy and calcium into the calcium carbide is opposite: αSi(alloy) increases with an increase in the amount of steel shavings, and αCa(CaC<sub>2</sub>) decreases.

The positive influence of steel shavings on αSi(alloy) is explained by an increase in the solubility of silicon in iron with formation of liquid iron silicides. This increases the equilibrium shift of the reduction of silicon from silicon dioxide with carbon (SiO<sub>2</sub> + 2C = Si + 2CO) to the right.

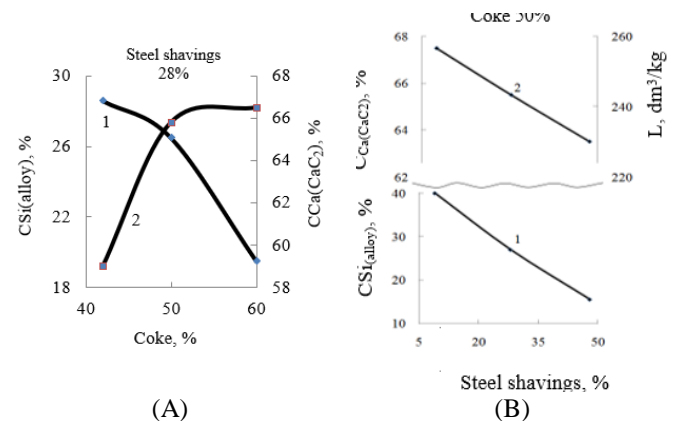


Figure 4. Effect of coke (A) and steel shavings (B) on the concentration of silicon in the alloy, calcium in the carbide and its capacity: 1-CSi(alloy), %; 2-CCa(CaC<sub>2</sub>), %

The decrease in the extraction level of calcium into CaC<sub>2</sub> with the increase in the amount of steel shavings is due to by-reactions in the bath, in particular, the reaction:



This exothermic reaction is possible over a wide temperature range (Table 2).

The decrease in the thermodynamic probability of the reaction with increasing temperature, in accordance with the expression  $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$ , is due to the fact that  $\Delta H$  and  $\Delta S$  become less negative ( $\Delta G$ ,  $\Delta H$  and  $\Delta S$  of the reaction were calculated using the Reactions Equation module of the HSC-10 software package [19]).

**Table 2. Effect of temperature on ΔG, ΔH and ΔS of reaction 7**

Reaction Equation					
CaC <sub>2</sub> +2SiO(g)=CaSi <sub>2</sub> +2CO(g)					
T	ΔH	ΔS	ΔG	K	Log K
°C	kJ	J/K	kJ		
300	-107.085	-47.925	-79.617	1.805E+007	7.257
500	-112.979	-56.198	-69.529	4.987E+004	4.698
700	-111.969	-55.053	-58.394	1.363E+003	3.135
900	-110.145	-53.361	-47.544	1.309E+002	2.117
1100	-107.476	-51.269	-37.076	2.573E+001	1.410
1300	-103.971	-48.893	-27.056	7.915E+000	0.898
1500	-99.653	-46.314	-17.532	3.285E+000	0.517
1700	-94.552	-43.592	-8.540	1.683E+000	0.226
1800	-91.719	-42.191	-4.250	1.280E+000	0.107

The silicon concentration in the ferroalloy decreases with an increase in coke in the charge, while the calcium concentration in CaC<sub>2</sub> increases (Figure 4). At an increase in the amount of steel shavings in the charge at a constant amount of coke (50%) the silicon concentration in the alloy, calcium concentration in the calcium carbide and calcium carbide capacity decrease, and most noticeably, the silicon concentration in the alloy (Figure 4).

**Table 3. Effect of coke and steel shavings on the technological parameters of the phosphorite’s electric smelting**

#	Variables				αSi <sub>(alloy)</sub> , %	αCa <sub>(CaC<sub>2</sub>)</sub> , %	CSi <sub>(alloy)</sub> , %	C <sub>Ca(CaC<sub>2</sub>)</sub> , %	L, dm <sup>3</sup> , kg
	Coded appearance		Natural appearance						
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	St, %	C, %					
1	-1	-1	14	44.4	56.0	49.2	34	64	238
2	+1	-1	42	44.4	90.2	42	22.6	59.4	220
3	-1	+1	14	55.6	51.7	72.3	31.8	68	253
4	+1	+1	42	55.6	82.5	58.1	19.7	65.6	244
5	+1.414	0	48	50	88.2	49.6	18.9	63.3	237
6	-1.414	0	8	50	43.3	66.8	41.1	67	249
7	0	+1.414	28	58	71	70.3	23.8	66.3	246
8	0	-1.414	28	42	85.3	38.7	29.6	58.4	215
9	0	0	28	50	74	53.6	26.8	65.5	244
10	0	0	28	50	76	55	26	65.6	245.5
11	0	0	28	50	76.2	54.3	27	65.15	243
12	0	0	28	50	75.8	54.8	25.6	65.3	243.2
13	0	0	28	50	76.3	53.9	27.6	65.72	245

Values of the tabular Fisher criterion (F<sub>tab</sub>) for the confidence level ≥95% and the calculated Fisher criteria (F<sub>calc</sub>) are shown in Table 4.

**Table 4. Tabular and calculated Fisher criterion values for equations 8-12**

F <sub>tab</sub>	6.59	6.59	6.59	6.59	6.59
F <sub>calc</sub>	Equation 8 =5.78	Equation 9 =6.38	Equation 10 =6.52	Equation 11 =6.39	Equation 12 =6.54

It follows from Table 4 that F<sub>tab</sub>>F<sub>calc</sub> for all regression equations. Therefore, in accordance with [23], all these equations are adequate. Based on equations 8-12 according to [24], we built volumetric and planar images of changing the process parameters depending on the amount of steel shavings and coke (Figure 5, 6).

The highest extraction degree of silicon into the alloy (92%) was achieved in the presence of the maximum amount of steel shavings (48%) and the minimum amount of coke (42%). On the contrary, the maximum C<sub>Ca(CaC<sub>2</sub>)</sub> (84.2%) was achieved when the smelting of the charge containing the minimum amount of steel shavings (8%) and maximum amount of coke (58.0%). The silicon concentration in the

Bearing in mind the opposite influence of steel shavings and coke on the extraction degrees of silicon and calcium into the target products and concentration of the metals in them, further studies were carried out by the experiment planning method with subsequent geometric optimization. Table 3 provides a matrix of the studies and their results.

Based on the results given in Table 3 according to [23], the following regression equations were obtained:

$$\alpha_{Si(alloy)} = 104.9 + 3.23 \cdot St - 2.91 \cdot C - 27.63 \cdot 10^{-3} \cdot St^2 + 24.93 \cdot 10^{-3} \cdot C - 10.84 \cdot 10^{-3} \cdot St \cdot C \quad (8)$$

$$\alpha_{Ca(CaC_2)} = -64.03 + 0.22 \cdot St + 2.96 \cdot C + 8.68 \cdot 10^{-3} \cdot St^2 - 4.68 \cdot 10^{-3} \cdot C^2 + 2.32 \cdot 10^{-3} \cdot St \cdot C \quad (9)$$

$$C_{Si(alloy)} = 35.16 - 0.76 \cdot St + 0.65 \cdot C + 6.97 \cdot 10^{-3} \cdot St^2 - 8.92 \cdot 10^{-3} \cdot C^2 - 2.23 \cdot 10^{-3} \cdot St \cdot C \quad (10)$$

$$C_{Ca(CaC_2)} = 59.37 - 0.45 \cdot St + 4.83 \cdot C + 13.77 \cdot 10^{-5} \cdot St^2 - 45.5 \cdot 10^{-3} \cdot C^2 + 7.01 \cdot 10^{-3} \cdot St \cdot C \quad (11)$$

$$L = -301.25 - 1.80 \cdot St + 21.19 \cdot C + 3.57 \cdot 10^{-5} \cdot St^2 - 0.20 \cdot C^2 + 2.86 \cdot 10^{-3} \cdot St \cdot C \quad (12)$$

alloy varied from 18.8 to 40.6% (8% of steel shavings and 42% of coke). The resulting alloy in terms of silicon content is FS15 ferrosilicon (tpf area in Figure 5-III), FS25 ferrosilicon (tfzor area in Figure 5-III) and FS45 ferrosilicon (kxd area in Figure 5-III). The 3rd grade calcium carbide was formed in the lghd area (Figure 6), and the 2nd grade one – in the jygl region (Figure 6).

One of the effective and efficient methods for determining the optimal parameters for processes with a large number of output parameters is the geometric optimization method, which we have used repeatedly for various systems [25,26]. The method consists in superimposing the patterns of output parameters on top of each other; and, taking into account the accepted assumptions, the optimal values of the independent factors (in our case, the amount of coke and steel shavings) are determined, that provide the accepted levels of output parameters: α<sub>Si(alloy)</sub>, α<sub>Ca(alloy)</sub>, C<sub>Si(alloy)</sub>, C<sub>Ca(CaC<sub>2</sub>)</sub>, L<sub>CaC<sub>2</sub></sub>. Combining the output parameters with the condition that α<sub>Si(alloy)</sub> = 70-80%, α<sub>Ca(alloy)</sub> ≥ 60%, C<sub>Si(alloy)</sub> ≤ 20% is shown in Figure 7 and Table 5. The abcde area corresponds to the set conditions regarding α<sub>Si(alloy)</sub>, α<sub>Ca(alloy)</sub> and C<sub>Si(alloy)</sub>.

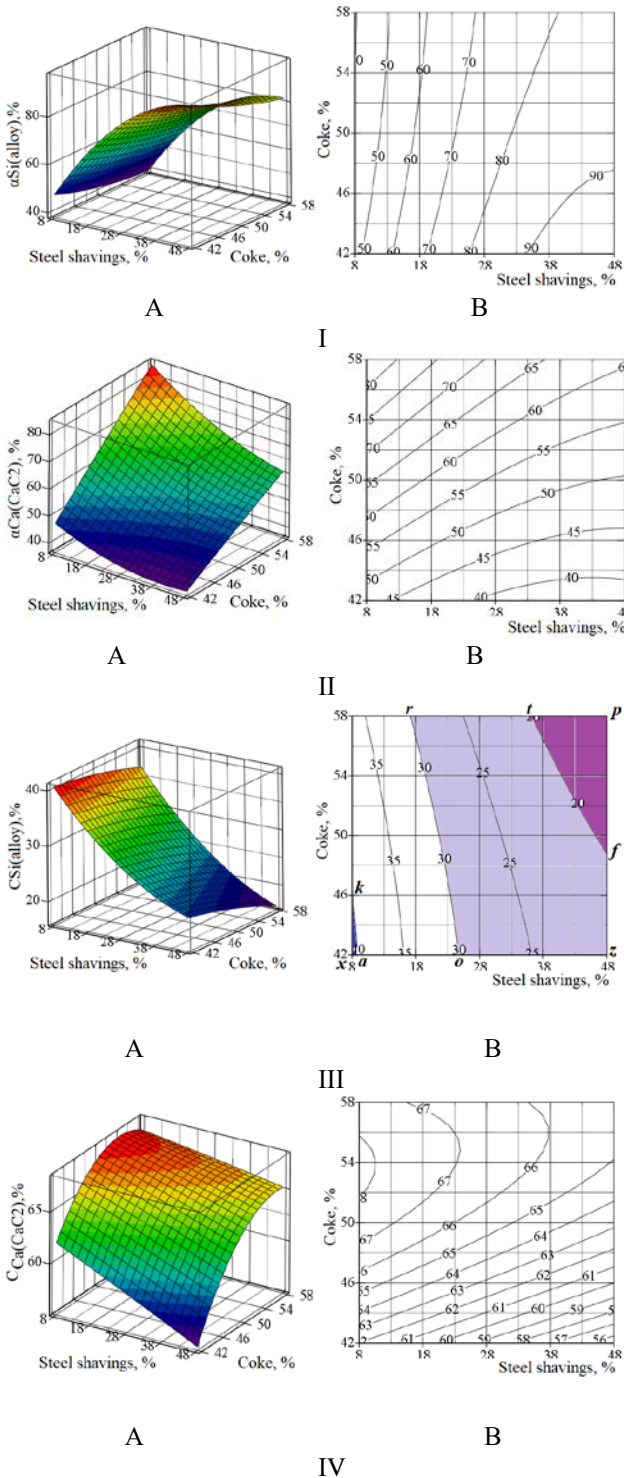


Figure 5. Effect of coke and steel shavings on  $\alpha_{Si(alloy)}$ ,  $\alpha_{Ca(CaC_2)}$ ,  $C_{Si(alloy)}$ ,  $C_{Ca(CaC_2)}$  during the phosphorite's electric smelting (A – Volumetric image, B – Planar image): I –  $\alpha_{Si(alloy)} = f(C, St)$ , II –  $\alpha_{Ca(CaC_2)} = f(C, St)$ , III –  $C_{Si(alloy)} = f(C, St)$ , IV –  $C_{Ca(CaC_2)} = f(C, St)$

It follows from Table 5 and Figure 8 that in order to produce FS25 grade ferrosilicon containing 20-30% of silicon and calcium carbide with a capacity of 245.1-248.1 dm<sup>3</sup>/kg (2<sup>nd</sup> grade), the smelting process should be carried out in the presence of 52-58% of coke and 24.4-38% of steel shavings. In this case, the extraction degree of silicon into the ferroalloy was 70-80%, and calcium into calcium carbide – 60-70%.

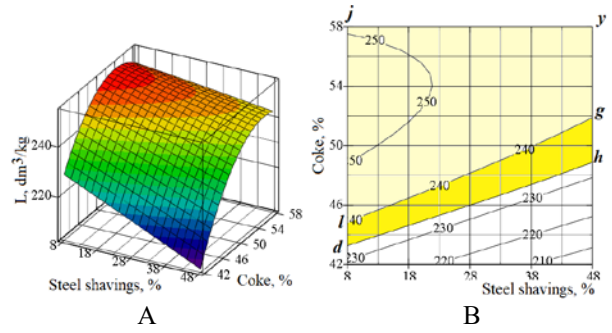


Figure 6. Effect of coke and steel shavings on  $L = f(C, St)$  during the phosphorite's electrosmelting. A – Volumetric image, B – Planar image

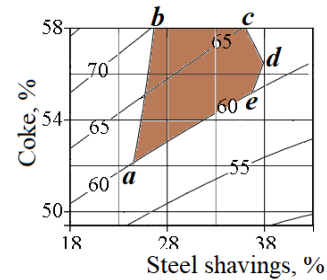


Figure 7. Combined information on the effect of coke and steel shavings on the technological parameters of phosphorite's electric smelting. Lines:  $ab - \alpha_{Si(alloy)} = 70\%$ ;  $ed - \alpha_{Si(alloy)} = 80\%$ ;  $ae - \alpha_{Ca(CaC_2)} \geq 65\%$ ;  $cd - C_{Si(alloy)} \geq 20\%$

Table 5. Values of variables and output parameters in the abcde area of Figure 7

Point in Fig. 7	Variables		Output process parameters				
	Steel shavings, %	Coke, %	$\alpha_{Si(alloy)}$ , %	$\alpha_{Ca(CaC_2)}$ , %	$C_{Si(alloy)}$ , %	$C_{Ca(CaC_2)}$ , %	$L$ , dm <sup>3</sup> /kg
a	24.4	52.0	70.0	60.0	30.0	66.7	248.1
b	26.6	58.0	70.0	70.0	24.4	66.6	247.7
c	35.9	58.0	77.8	65.0	20.0	65.9	245.1
d	38.0	56.6	80.0	61.9	20.0	66.0	245.5
e	36.6	55.2	80.0	60.0	24.1	66.0	245.5

#### 4. Conclusions

Based on the electric smelting of Chulaktau phosphorite mixed with coke and steel shavings in an arc furnace, the following conclusions can be drawn:

1. From the thermodynamic point of view, the joint formation of iron silicides, gaseous phosphorus and calcium carbide from  $Ca_3(PO_4)_2-SiO_2-C-Fe$  systems is possible at a temperature of above 1635-1702°C.

2. With a constant amount of coke, an increase in the amount of steel shavings in the charge increases the extraction degree of silicon into the alloy and decreases the extraction degree of calcium into calcium carbide. An increase in the amount of coke in the charge at a constant amount of steel shavings leads to an increase in the extraction degree of calcium into  $CaC_2$  and silicon into the alloy.

3. Based on the obtained volumetric and planar images of the coke and steel shavings effect on the technological parameters of the phosphorite's electric smelting, it was found that in order to produce FS25 grade ferrosilicon containing 20-30% of Si and calcium carbide with a capacity of 245.1-248.1 dm<sup>3</sup>/kg (2<sup>nd</sup> grade), the process should be carried out in



the presence of 52-58% of coke and 24.4-38% of steel shavings. In this case, the extraction degree of silicon into the ferroalloy was 70-80%, and calcium into calcium carbide – 60-70%.

## Acknowledgements

This study is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. AP14869066).

## References

- [1] Evenchik, S.D., Brodskiy A.A. (1987). *Tekhnologiya fosfornykh i kompleksnykh udobreniy. Moskva: Khimiya*
- [2] Raiymbekov, Y., Besterekov, U., Abdurazova, P., Nazarbek, U. (2022). Review of methods and technologies for the enrichment of low-grade phosphorites. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 42 (4), 385 – 395. <https://doi.org/10.1515/revic-2021-0041>
- [3] Tugolukov, A.V., Valyshev, D.V., Yelin, O.L. (2017). Sposob polucheniya kompleksnykh mineral'nykh udobreniy iz fosfatnoy rudy i ustanovka dlya yego realizatsii. *Patent RF RU §2634936 C2*
- [4] Temirov, U., Doniyarov, N., Jurakulov, B., Usanbaev, N., Tagayev, I., Mamataliyev, A. (2021). Obtaining complex fertilizers based on low-grade phosphorites. *E3S Web of Conferences*, 264, 04009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404009>
- [5] Weeks, J.J., Jr., Hettiarachchi, G.M. (2019). A Review of the Latest in Phosphorus Fertilizer Technology. Possibilities and Pragmatism. *Journal of Environmental Quality*, 48, 1300-1313. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0067>
- [6] Nurmuradov, T.I., Erkaev, A.U., Kucharov, B.Kh. (2018). Development of technology on the hydrochloric-, nitric- and sulfuric acid processing of low-grade phosphorites of Central Kyrgyzstan. *Chemical Technology: Control and Management*, 1-2(79-80), 65-70
- [7] Schrödter, K., Bettermann, G., Staffel, T., Wahl, F., Klein, T. & Hofmann, T. (2023). Phosphoric Acid and Phosphates. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. [https://doi.org/10.1002/14356007.a19\\_465](https://doi.org/10.1002/14356007.a19_465)
- [8] Lygach, A.V., Ignatkina, V.A. (2018). Flotation properties of base minerals in egorievsk nodular phosphorite. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (8), 163-175. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-163-175>
- [9] Kurbanov, Sh.A. (2023). Fiziko-khimicheskiye osnovy tekhnologii pererabotki fosforitnykh rud Rivatskogo mestorozhdeniya Tadjikistana (Doctoral dissertation). *Dushanbe*
- [10] Raiymbekov, Y., Abdurazova, P., Nazarbek, U. (2023). Enrichment of low-grade phosphorites by the selective leaching method. *Green Processing and Synthesis*, 12 (1), 20228150. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-8150>
- [11] Seitnazarov, A., Namazov, S., Beglov, B. (2014). Beneficiation of high-calcareous phosphorites of central Kyzylkum with organic acid solutions. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49 (4), 383-390
- [12] Aripzhanova, M.A., Ayupova, M.B., Alkanov, Z.S. (2023). Nitric acid enrichment of phosphorites of Central Kyzylkums. *Technical sciences*, 3(108)
- [13] Zafar, I.Z., Anwar, M.M., Pritchard, D.W. (2006). Selective leaching of calcareous phosphate rock in formic acid: Optimisation of operating conditions, *Minerals Engineering*, 19(14), 1459-1461. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.03.006>
- [14] Astrelin, I.M., Bogachev, V.G., Karmyshov, V.F., Buryak, K.A., Sinyushkin, A.N. & Matvienko, N.V. (1985). Influence of acidity of extracting solutions on the decomposition of a Chilisai phosphorite concentrate. *Zurnal Prikladnoj Himii*, 58(10), 2335-2337
- [15] Kopylev, B. A. (1981). *Tekhnologiya ekstraktsionnoy fosfornoj kisloty. L.: Khimiya*
- [16] Gelmboldt, V.O. (2023). Fluorosilicic acid: secondary raw material and reagent in technological practice and preparative synthesis. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 3, 3-21. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-148-3-3-21>
- [17] Liu, X., Wu, F., Qu, G., Jin, C., Liu, Y., Kuang, L., Li, H., Chen, X., Wang, Z. & Cheng, Y. (2022). Application prospect of advanced oxidation technology in wet process phosphoric acid production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10 (6), 108868. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108868>
- [18] Andrienko, N.I., Plyacuk, L.D. & Chernish, E.Y. (2015). Technology of obtaining enriched phosphate materials with removal of heavy metals in wasteless process. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 2(12), 100–106
- [19] Roine, A. (2021). HSC Chemistry. *Metso: Outotec, Pori*. Retrieved from: [www.mogroup.com/hsc](http://www.mogroup.com/hsc)
- [20] Shevko, V.M., Uteeva, R.A., Badikova, A.B., Karataeva, G.E. & Bitanova, G.A. (2023). Production of Ferroalloys, Calcium Carbide, And Phosphorus from High-Silicon Phosphorite. *Rasayan Journal of Chemistry*, 16(2), 955-963. <https://doi.org/10.31788/RJC.2023.1628310>
- [21] Shevko, V.M., Serzhanov, G.M., Karatayeva, G.Ye. & Amanov, D.D. (2019). Raschet ravnovesnogo raspredeleniya elementov primenitel'no k programnomu kompleksu HSC-5.1. Programma dlya EVM. *Certificate for an object protected by copyright RK §1501*
- [22] Shevko, V.M., Amanov, D.D., Karatayeva, G.Ye. & Aytkulov, D.K. (2016). Kinetika polucheniya kompleksnogo ferrosplava iz kremniy-alyuminiysoderzhashchey opoki. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 10-2. 194-196
- [23] Amanov, D., Shevko, V., Karatayeva, G. & Serzhanov, G. (2017). Thermodynamic analysis of obtaining ferroalloy from silicon-aluminum-containing silica clay. *Chemistry and Chemical Technology*, 11(4), 410-414. <https://doi.org/10.23939/chcht11.04.410>
- [24] Grinfel'd, G.M., Moiseyev, A.V. (2014). Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii. *Komsomol'sk-na-Amure, FGBOU VPO KnAGTU*
- [25] Ochkov, V.F. (2009). Mathcad 14 dlya studentov, inzhenerov I konstruktorov. *St-Petersburg*
- [26] Shevko, V., Aitkulov, D. & Badikova, A. (2022). Comprehensive Processing of Vanadium-Containing Black Shale Tailings. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(4), 617-628. <https://doi.org/10.3311/PPch.20050>
- [27] Shevko, V., Karataeva, G., Badikova, A., Amanov, D. & Tuleev M. (2018). Thermodynamic model of the influence of temperature and carbon on the production of ferroalloy and calcium carbide from the basalt of Dubersay deposit. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 306(3), 86-94. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.21>

## Феррокорытпалар, кальций карбиді және фосфордың сублимациясы өндірісімен фосфориттердің электрлік балқуы

Р. Утеуова<sup>1\*</sup>, В. Шевко<sup>1</sup>, Д. Айткулов<sup>2</sup>, А. Бадикова<sup>1</sup>, С. Тлеуова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

<sup>2</sup>Минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [raisa.uteyeva@mail.ru](mailto:raisa.uteyeva@mail.ru)

**Андатпа.** Мақалада Қаратау бассейнінің Чулақтау кен орнындағы фосфориттердің кокс пен болат жоңқаларымен өзара әрекеттесуін зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеулер HSC-10 бағдарламалық кешенін пайдалана отырып, компьютерлік термодинамикалық модельдеу әдістерімен эксперименттерді математикалық жоспарлаумен, сондай-ақ электр доғалы пеште фосфори балқыту әдісімен жүргізілді. Жүргізілген зерттеулер негізінде  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{-SiO}_2\text{-C-Fe}$  жүйелерінің аралық өнімдерінің бірлескен түзілуі 1635-1702°C температурада мүмкін екендігі анықталды. Фосфоритті электрмен балқытудың технологиялық параметрлеріне кокс пен болат жоңқаларының әсері нәтижесінде алынған көлемді және жазықтық бейнелер негізінде құрамында 20-30% Si және кальций карбиді бар, өнімділігі 245.1-248.1  $\text{дм}^3/\text{кг}$  (2-ші сорт) болатын FS25 маркалы ферросилицийді алу үшін процессті 52-58% кокс және 24.4-38% болат жоңқалары бар болғанда жүргізу керек. Бұл жағдайда феррокорытпаға кремнийді алу дәрежесі 70-80%, ал кальций карбидіне кальций алу дәрежесі 60-70% құрады.

**Негізгі сөздер:** фосфорит, термодинамикалық модельдеу, электр балқыту, кальций карбиді, феррокорытпалар.

## Электрическое плавление фосфоритов с производством ферросплава, карбида кальция и сублимацией фосфора

Р. Утеуова<sup>1\*</sup>, В. Шевко<sup>1</sup>, Д. Айткулов<sup>2</sup>, А. Бадикова<sup>1</sup>, С. Тлеуова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

<sup>2</sup>Национальный центр по комплексной переработки минерального сырья, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [raisa.uteyeva@mail.ru](mailto:raisa.uteyeva@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования взаимодействия фосфоритов Чулактауского месторождения бассейна Каратау с коксом и стальной стружкой. Исследования проводились методами компьютерного термодинамического моделирования с использованием программного комплекса HSC-10 совместно с математическим планированием экспериментов, а также методом электроплавки фосфорита в электродуговой печи. На основании проведенных исследований установлено, что совместное образование промежуточных продуктов систем  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{-SiO}_2\text{-C-Fe}$  возможно при температуре  $> 1635\text{-}1702^\circ\text{C}$ . На основании полученных объемных и плоскостных изображений влияния кокса и стальной стружки на технологические параметры электроплавки фосфорита установлено, что для получения ферросилиция марки FS25, содержащего 20-30% Si и карбида кальция, производительностью 245.1-248.1  $\text{дм}^3/\text{кг}$  (2-й сорт), процесс следует проводить при наличии 52-58% кокса и 24.4-38% стальной стружки. При этом степень извлечения кремния в ферросплав составила 70-80%, а кальция в карбид кальция – 60-70%.

**Ключевые слова:** фосфорит, термодинамическое моделирование, электроплавка, карбид кальция, ферросплавы.

Received: 06 September 2023

Accepted: 16 December 2023

Available online: 31 December 2023

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i6.03>

## Thermodynamic modeling of the process of reduction of nickel and iron by a silicothermal process

B. Kelamanov, D. Yessengaliyev\*, O. Sariev, A. Nurzhanov

Aktobe regional university named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

\*Corresponding author: [dauralga@mail.ru](mailto:dauralga@mail.ru)

**Abstract.** The results of studying the effect of silicon concentration of ferrosilicon: FeSi5 (5% Si), FeSi20 (20% Si), FeSi35 (35% Si), FeSi50 (50% Si), FeSi65 (65% Si) on the degree of nickel ( $\eta_{Ni}$ ) and iron ( $\eta_{Fe}$ ) reduction of the CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> multicomponent oxide system at a temperature of 1500°C by thermodynamic simulation are given. The HSC Chemistry 6.12 software package developed by Outokumpu (Finland) was used for the simulation. The chemical compounds Ni<sub>3</sub>Si and Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub> with the corresponding thermodynamic characteristics are entered into the database. The calculations were performed by the "Equilibrium Compositions" subroutine at a gas pressure of 1 atm, containing 2.24 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub> as a neutral additive. The obtained modeling results indicate the thermodynamic possibility of nickel and iron reduction from the CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> oxide system by silicon of ferrosilicon. The degree of iron reduction increases from 88.8 to 91.4% with an increase in the silicon concentration of ferrosilicon [Si]<sub>FeSi</sub> from 5 to 65%. The degree of nickel reduction with an increase in the silicon concentration of ferrosilicon remains almost unchanged and amounts to 99.8-99.7%. The degree of use of silicon is 92.1-94.5%. The chemical composition of the complex alloy - ferrosiliconnickel is determined. The obtained simulation results can be used to develop the technology for producing ferrosiliconnickel from nickel ore by silicothermal method.

**Keywords:** oxide system, thermodynamic simulations, nickel ore, ferrosilicon, degree of reduction, complex alloy.

### 1. Кіріспе

Металлургия өнеркәсібінде феррокорытпалардың (феррохром, ферротитан, феррованадий, ферромарганец және т.б.) төмен көміртекті сұрыптарын өндірудегі негізгі тотықсыздандырғыштардың бірі болып табылатын кремний тотықтарынан элементтердің металлотермиялық тотықсыздануы кең таралды [1]. Хром және никель тот баспайтын болатты алу үшін маңызды легірлеуші компоненттер ретінде қолданылады, олардың әлемдік өндірісі үнемі өсіп келеді және 2018 жылы 50.7 млн.тоннаны құрады [2, 3].

Әлемдегі никельдің жалпы қорын АҚШ-ның Геологиялық қызметі 160 миллион тоннаға бағалайды. Бірегей кен орындары (20 миллион тоннадан астам) Австралия (25 миллион тонна) және Куба (23 миллион тонна), өте үлкен (10-15 миллион тонна) - Жаңа Каледония және Канада (15 миллион тонна), Индонезия (13 миллион тонна), Оңтүстік Африка (12 миллион тонна), Филиппиндер (11 миллион тонна) [4].

Қазақстан Республикасында никель кендерінің едәуір қорлары бар, оларды өндіруді жүзеге асырады, бірақ құрамында никель бар шикізатты бастапқы өндеуге де қуаттылығы мен технологиясының жетіспеушілігі сезінуде. Қазіргі уақытта Қазақстан Республикасында силикатты тотықты никель кендерінің өнеркәсіптік қызығушылығы бар 40-қа жуық кен орындары табылды. Кендерде орта есеппен 1.4% никель бар, ал кендердің жекелеген аймақтарында 1.5-3.0%-ға дейін. Көбінесе кен орындары бос жыныстар аймақтармен бөлінген кен

орындарының тізбектерінен тұрады. Кендерді өндіру арзан ашық әдіспен жүзеге асырылады, бірақ бұл жағдайда көптеген бос жыныстар карьерлерден шығарылады [5].

Қазіргі уақытта Ақтөбе облысында Батамшы кен орындары тобында шоғырланған никель кендерінің ең ірі кен орындары әзірленуде: Никельтау, Рождественское, Көкпекті және т.б. барланған баланстық қорлары 423.5 млн.тоннаға дейін, шығыс Қазақстанда Белогорск, Қарауыл-төбе, Қызылтыр, Букорск, Горностаев кен орындары. Бурановск, Рождественское, Ново-Саздык, Щербаков, Старо-Тайкетенское, Каменный Кобчик кен орындары өндіруге ұсынылған. Қазіргі уақытта әлемдік тәжірибеде әдетте құрамында 1.4%-дан астам никель бар кендер өндіріледі, бірақ кедей кендерді қолдану тенденциясы байқалады. Тотыққан никель кендерінің ерекшелігі - химиялық және заттық құрамдардың тұрақсыздығы [6].

Никель болатқа металдық никель және ферроникель түрінде енгізіледі. Ферроникельді алу әртүрлі никельді шикізаттан әртүрлі тәсілдермен жүзеге асырылады. Ферроникельді алудың әдістерінің бірі - карботермиялық және металлотермиялық әдістермен кедей тотыққан никель кендерінен (0.8-1.5% NiO, 20-40% FeO) темірмен бірге никельді тотықсыздандыру болып табылады. Бұл процестерді зерттеу үшін қолданбалы химиялық термодинамиканың жарамды және тиімді әдістерін қолдана отырып, оларды жүзеге асырудың термодинамикалық мүмкіндігін білу қажет болады [7].

Жаңа процестер туралы мәліметтер алу үшін олардың өтуінің термодинамикалық мүмкіндігін білу қажет. Термодинамикалық есептеулердің белгілі әдістері бірқатар өзекті және перспективті міндеттерді жедел және сапалы шешуге мүмкіндік береді [8-10].

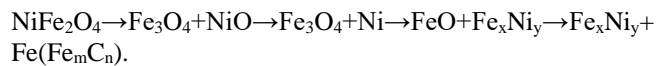
Авторлар никельді тотықтан көміртегімен тотықсыздандыру мүмкіндігін растайтын қарапайым жүйелердегі термодинамикалық модельдеу нәтижелері келтірілген [11]. Алынған нәтижелер негізінде никельді болатқа қосу арқылы тікелей легірілеу технологиясын жасауға мүмкіндік берді.

Авторлар ұсынған жұмыста полиметалл марганец кендерін гидрометаллургиялық байыту және селективті тұндыру арқылы алынған никель концентратын пайдалану кезінде никельді көміртегі тотығынан тотықсыздандыру мәселелері қарастырылды [12]. «Тетра» бағдарламалық кешенін қолдана отырып, болатты легірілеу кезінде концентраттан никельді тотықсыздандырудың технологиялық параметрлері анықталды. Доғалы электр пешінде балқытылған болатты легірілеу кезінде никель концентраты мен кокстан жасалған брикеттерді пайдаланған жағдайда концентраттан никельді алу - 92-95% болды.

Тотықты балқымалардан металдарды тотықсыздандыру бойынша зерттеулердің маңыздылығы, ең алдымен, қара және түсті металдардың кендерін пирометаллургиялық өңдеумен байланысты болып келеді. Тотыққан никель кендерін өндірудегі негізгі міндет - ферроникельдегі никельдің қажетті мөлшерін (10-20%) және қоспалардың минималды мөлшері кезінде құнды металдардың алынуын арттыру болып табылады. Термодинамикалық модельдеу әдістерін қолдана отырып, авторлармен тотықты балқымасынан темір мен никельді тотықсыздандыру кезінде қол жеткізілген көрсеткіштерге баға берілді.  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-NiO}$  жүйесі жұмыс денесі ретінде алынды, оның құрамы NiO-ның мазмұны бойынша 1-ден 2.5%-ға дейін, ал FeO 17.4-тен 35.2%-ға дейін өзгерді. Тотықсыздандырғыш ретінде 1 тонна балқымаға  $3.7\text{ м}^3$ -ке тең бөліктерде енгізілетін көміртегі монототығы қолданылды. CO-ны жұмыс денесіне енгізу процестің негізгі параметрлерін бағалауға мүмкіндік берді, никельді тотықсыздандыру дәрежесі 98%-ды құрады [13].

[14] жұмыс авторларымен кендерден никельді алу процесін модельдеу үшін пайдалануға болатын термодинамикалық мәліметтер базасы жасалды.  $\text{MgO-NiO-SiO}_2$  жүйесіндегі термодинамикалық қасиеттер мен фазалық тепе-теңдіктердің ең жақсы сипаттамасын қамтамасыз ететін Гиббстің өзін-өзі үйлестіретін энергетикалық функцияларының жиынтығы алынды.

Fe-Ni-O жүйесіндегі қосылыстарды ( $\text{NiO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{+NiO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{+Ni}$ ) тотықсыздандыру процесі  $\text{H}_2$  тотықсыздандырғышын және белсендірілген көміртекті қолдану арқылы зерттелді және  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  тотықсыздану механизмі талданды [15].  $\text{H}_2$ -ні тотықсыздандырғыш ретінде пайдаланған кезде бұл жүйелерде белсендірілген көміртегіге қарағанда бастапқы реакция температурасы және реакция жылдамдығы төмен болатыны анықталды. Температураның жоғарылауымен  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  тотықсыздану өнімдері келесі ретпен пайда болады:



Авторлар лимониттен (> 35% Fe, ~ 1% Ni) никельді шойынды (2-5% Ni) алу технологиясын агломерациялық машинада агломерациялау арқылы, содан кейін 1500°C температурада домна пешінде балқыту арқылы жасады [16]. Никельдің тотықсыздану деңгейі ~ 80% құрайды. Бұл процесс Қытайда тез дамыды, бірақ никель бағасының төмендеуіне және қатаң экологиялық саясаттың жүзеге асырылуына байланысты ол кең дамымады.

Krupp-Renn (Nipon Yakin Oneyama) процесінде сапролит-латерит кеніндегі ферроникель бөлшектерінің балқу процесіне және өсуіне негізділіктің  $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)$  әсері зерттелді [17]. Жұмыста 1300-1350°C-де айналмалы реакторда балқытылған кендерден ферроникель жасау үшін Krupp-Renn процесін қолданудың артықшылықтары көрсетілген. CaO қосу және негізділіктің 0.5-тен 0.8-ге дейін жоғарылауы латерит кенінің балқу температурасын төмендететіні анықталды, ал оның 0.9-дан 1.8-ге дейін жоғарылауы құрамында 100% CO бар атмосферада жоғарылайды. Сұйық фазаның түзілуі ферроникель бөлшектерінің өсуіне ықпал етеді, ал ферроникель бөлшектерінің мөлшерін латерит кендерін тотықсыздандыру процесінде негізділікті оңтайландыру арқылы арттыруға болады.

[18] жұмыста автор кедергі режимінде жабық колошникпен жұмыс істейтін кендітермиялық пеште металдандырылған шекемтастарды үздіксіз балқыту процесінде хромникельді жартылай өнімді алу мүмкіндігін анықтады. Бастапқы шикіқұрам материалдары ретінде Новомихайловский КБК-ның металдандырылған шекемтастары, кокс жаңғағы, никель тотығы, Дөң кен орнының хром кені пайдаланылды. Металдағы хром мен никельдің мөлшері сәйкесінше 7.78-19.3 және 5.6-10.8%-ды құрады. Хромның тотықсыздану деңгейі 92%-ды құрады.

Тот баспайтын болат өндірісінде құрамында никель бар қымбат легірілеуші материалдар қолданылады. Оның құнын төмендету үшін болатты легірілеу процесінде металдық никельді оның тотықтарымен ауыстыру өзекті болып табылады [19]. Жұмыста никельді оның тотығынан тотықсыздандырудың термодинамикалық және эксперименттік зерттеулерінің нәтижелерін талдау нәтижелері, құрамында марганец бар полиметалл шикізатын байыту кезінде никель тотығын алу әдістері келтірілген. Құрамында марганец бар полиметалл шикізатын марганец, никель, темір, кобальт және мыс сияқты құнды компоненттердің ерітіндісінен шаймалауды және селективті алуды қамтитын кешенді өңдеу технологиясы қарастырылды. Теориялық және эксперименттік зерттеулер негізінде металдық никельді гидрометаллургиялық байыту нәтижесінде алынған концентраттармен алмастыру мүмкіндігі расталды. Термодинамикалық модельдеу нәтижелері бойынша никельді оның тотығынан Ni-O-C жүйесінде толық тотықсыздандырудың оңтайлы параметрлері 1073K температураны және Ni-O-C-Fe жүйесінде 1873K температураны қарастыру керек екендігі анықталды. Болатты тікелей легірілеу үшін никель концентраты мен кокс ұсақ-түйегінен тұратын шекемтастарды енгізген жөн, бұл никельді 90% деңгейінде алуға мүмкіндік береді.

[20] жұмыста Шығыс Қазақстандағы Горностаев кен орнының тотыққан кобальт-никель кендерін (ТНК) ферроникельге балқыту процесін тәжірибелік зерттеу нәтижелері келтірілген. Алынған металл және тотық өнімдерінің құрамы авторлармен зерттелді. Күйдірілген зерттеу кенінің химиялық құрамы келесідей болды, %:  $Ni_{ж.}$  - 0.87;  $Fe_{ж.}$  - 13.48;  $SiO_2$  - 65.39;  $CaO$  - 2.63;  $Al_2O_3$  - 3.93;  $P$  - 0.0045. Осы кеннен, кальций тотығынан және кокстан тұратын шикіқұрам 1470-1600°C температуралық интервалда 10 және 15%  $Ni$  бар ферроникельдің екі құрамын алуға арналған. Тәжірибелік балқымалардың температурасы 1600°C болғанда және салмақтың 2.0-12.0% шегінде тотықсыздандырғыш - металлургиялық кокс мөлшерінің өзгеруі кезінде кендер қорытпалардағы металл құрамы келесі шектерде өзгерді, %:  $Ni$  – 6.45-41.0 және  $Co$  – 0.74-3.4. Горностаев кен орнының кобальт-никель кенін зертханалық тигельді балқыту екі кондырғыда жүргізілді. Тәжірибелік балқытулардың бірінші сериясы тәжірибенің оңтайлы температурасын және қождаманың - кальций тотығының оңтайлы шығынын анықтау мақсатында "Тамман" пешінің көмегімен жүргізілді. Тәжірибелік балқытулардың екінші сериясы 120/600/С 40 «Nabertherm» (Германия) жоғары температуралы құбырлы пешін пайдалану арқылы жүргізілді. Бұл пеште вакуумдау немесе инертті газбен үрлеу мүмкіндігі бар тығыздалған жылытқыш бар. Жүргізілген тәжірибелер нәтижесінде, никель кенін ферроникельге балқыту кезінде қождың оңтайлы құрамы келесідей болды, %:  $SiO_2$ -40,  $CaO$ -25,  $Fe$ -14. Мұндай қож балқудың орташа температурасын шамамен 1500°C қамтамасыз етеді.

[21] жұмыста автор Қазақстанның тотықты кендерінен, атап айтқанда, «Бөгеткөл» кен орнының кендерінен ферроникельді алу мақсатында «никель кен-көміртек» жүйесіне термодинамикалық зерттеу жүргізді. Термодинамикалық модельдеу әдісімен жүйені теориялық зерттеу 1000-1700К температурада мен  $P = 0.1$  МПа қысым аралығында жүргізілді. Металдарды алу процестерін сандық термодинамикалық модельдеу үшін, атап айтқанда, темірді, никельді және кобальтты максималды энтропия принципіне негізделген «Астра-4» бағдарламалық кешені пайдаланылды. Жүргізілген термодинамикалық зерттеу ферроникельді алумен электротермиялық балқытудың технологиялық процесін модельдеу арқылы «Бөгеткөл» кен орнының құрамында никель бар тотықты кендерін өңдеудің теориялық мүмкіндігін көрсетті.  $Ni_k$ -ға никельдің ( $Ni$ ) ауысу дәрежесі 1100-1300К температуралық интервалда 100%-ды құрайды және 1700К-ге дейін жоғарылаған сайын газ фазасына ауыса бастағанда 99.97%-ға дейін төмендейді. Жүйеде темірдің ( $Fe$ ) ауысу дәрежесі  $Fe_3C_k$  қосылысы үшін максималды  $T = 1200K$ -де 64.3%-ға дейін,  $FeSiO_{3k}$  қосылысы үшін 92.5%-ға дейін,  $T=1100K$  және температураның 1700К-ге дейін жоғарылауымен 43.7%-ға дейін азаяды. Кобальттың ( $Co$ ) ауысу дәрежесі никельге ұқсас, 1100-1300К температуралық аралықта  $CO_k$ -да бөлінеді және 100%-ды құрайды және температураның 1700К-ге дейін жоғарылауымен газ фазасына ауыса бастайды да, 99.69%-ға дейін төмендейді.

[22] жұмыс авторларымен кенді көмір брикеттерінен никельдің қатты сұйық фазалы карботермиялық тотықсыздануы зерттелді. Кедей тотыққан никель кені үшін кенді көмірлі брикеттердің қатты сұйық фазалы

карботермиялық тотықсыздану процесінің қолданылуын зерттеу үшін зертханалық тәжірибелерде өнеркәсіпке барынша еліктейтін жағдайлар таңдалды - өнеркәсіптік өлшемдегі брикетті (диаметрі 24 мм, биіктігі 30-35 мм, салмағы 20-30 г) температурасы 1500°C пештің ыстық аймағына тасталды. Тәжірибелерде құрамында 1.1% никель және 32% темір бар Ресей Федерациясының «Бурукталь» кен орнының кедей тотыққан никель кені пайдаланылды. Өртүрлі брикеттердің тоғыз түрі жасалды. Өртүрлі реактивтілігі бар тотықсыздандырғыштардың түрі (ағаш көмір, Шұбаркөл көмірі және жартылай кокс) және 3.5 және 10% аралығында тотықсыздандырғыштың мөлшері қолданылды. Авторлар тотыққан никель кенінің қатты сұйық фазалы карботермиялық тотықсыздану процесін жүргізудің оңтайлы шарттарын белгіледі: тотықсыздандырғыш түрі-жартылай кокс, брикеттегі тотықсыздандырғыштың концентрациясы 5%; компоненттердің фракциялары - 1 мм-ден аз; процесінің температурасы 1500°C; тотықсыздану уақыты - 12 мин. болды. Брикеттегі тотықсыздандырғыш құрамының өзгеруіне байланысты никельдің концентрациясы 5-тен 22%-ға дейін болатын ферроникель алуға болады.

[23, 24] жұмыс авторларымен ферросиликоникельді тотықсыздандырғыш ретінде қолдана отырып,  $Cr_2O_3$ - $FeO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $MgO$ - $CaO$  жүйесінен элементтерді тотықсыздандыру процесін термодинамикалық модельдеуді жүргізді (28%  $Fe$ , 65%  $Si$ , 7%  $Ni$ ). Тотықсыздандырғыштың оңтайлы шығыны 105% және қождың негізділігі  $(CaO)/(SiO_2)=1.86-1.9$  анықталды. Хромның тотықсыздану процесінің термодинамикалық есептеулерін жүргізу үшін тотықты жүйесі ретінде хром кенінің концентрациясына жақын, келесі түрдегі құрамы қолданылды, %:  $40Cr_2O_3$ ,  $21FeO$ ,  $5SiO_2$ ,  $16Al_2O_3$ ,  $16MgO$ ,  $2CaO$ ,  $0.006P_2O_5$  және тотықсыздандырғыш ретінде келесі құрамдағы ферросиликоникель қолданылды, %: 65  $Si$ , 28  $Fe$ , 7  $Ni$ . Қождың негізділігі мен тотықсыздандырғыш шығынының жоғарылауы хромның тотықсыздану дәрежесін жоғарылататыны анықталды. 1973К температурада хромның тотықсыздану дәрежесі 95.1%-ды құрады.

[25, 26] жұмыстарда  $FC45$  және  $FC65$  кремний ферросилициймен  $Cr_2O_3$ -тен хромды тотықсыздандыру процесін термодинамикалық модельдеу нәтижелері келтірілген. Негізділікті  $(CaO)/(SiO_2)$  1-ден 3-ке дейін арттыру хромның тотықсыздану дәрежесін 74.4-тен 86.7%-ға дейін және сәйкесінше  $FC45$  және  $FC65$  кремнийді тотықсыздандырғыш ретінде пайдаланған кезде 77-ден 88%-ға дейін арттыруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттерде  $Cr$ - $Fe$ - $Ni$  балқыманың элементтерінің оның тығыздығы мен тұтқырлығына [27], сондай-ақ  $Fe$ - $Ni$  балқыманың тұтқырлығына әсері туралы мәліметтер бар [28]. Балқымадағы темірдің жоғарылауы оның тұтқырлығын арттыратыны анықталды.

Осылайша, ұсынылған жұмыстарға аналитикалық шолу нәтижелері никельді тотықсыздандыру процесіне термодинамикалық модельдеу жүргізуге, ферроникель алуға арналған мәліметтер базасы бар екенін көрсетті, бірақ ферросилиций кремнийінің концентрациясы никель мен темірді тотықсыздандыру процесіне әсерін зерттеу туралы мәліметтер жоқ.

Металлургия өнеркәсібі үшін никельдің, темірдің және никель кендері мен концентраттарының басқа элементтерінің металлотермиялық тотықсыздану

параметрлерін білу маңызды. Осыған байланысты ферросилиций кремнийінің концентрациясының: FC5 (5% Si), FC20 (20% Si), FC35 (35% Si), FC50 (50% Si), FC65 (65% Si) CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> көп компонентті тотық жүйесінен никель мен темірдің тотықсыздану дәрежесіне әсерін 1500°C температурада зерттеу үшін термодинамикалық модельдеу қажеттілігі анықталды.

## 2. Зерттеу әдістері

Термодинамикалық модельдеуді жүргізу үшін бастапқы тотықтық жүйе ретінде тотыққан никель кені, ал тотықсыздандырғыш ретінде ферросилицийдің кремнийі пайдаланылды: FC5, FC20, FC35, FC50, FC65. Кеннің химиялық құрамы 1-ші кестеде келтірілген.

Кесте 1. Кеннің химиялық құрамы, %

CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	NiO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
1.5	53.6	18.4	4.8	20	1.5	0.005	0.15

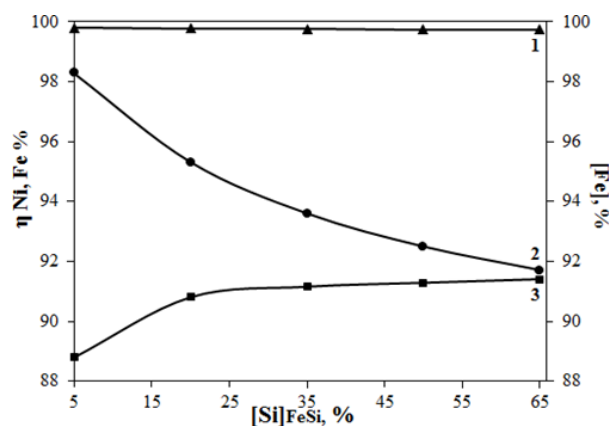
Термодинамикалық модельдеу есептеулері Outokumpu (Финляндия) әзірлеген және Гиббс энергиясын азайтуға және термодинамиканың вариациялық принциптеріне негізделген HSC 6.12 Chemistry БК (бағдарламалық кешені) қолдану арқылы жүзеге асырылады [8]. HSC 6.12 Chemistry БК процестің изобарлық және изотермиялық жағдайларында химиялық реакциялардың термодинамикалық константаларын анықтауға мүмкіндік береді ( $\Delta H_p$ -сы,  $\Delta S_p$ -сы,  $\Delta G_p$ -сы,  $K_p$ ). CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> көп компонентті тотықты жүйесінің тепе-теңдік құрамы «Equilibrium Compositions» (тепелендік құрамдары) кіші бағдарламасын 1500°C температурада және 1 атм-ге тең газ фазасының қысымында қолдану арқылы анықталды. HSC Chemistry 6.12 БК дерекқорына сәйкес термодинамикалық сипаттамалары бар Ni<sub>3</sub>Si және Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub> химиялық қосылыстары енгізілген. Ni<sub>3</sub>Si және Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub> қосылыстарының түзілу энтальпиясының мәні ( $\Delta H_{0298.15}$ ) іргелі анықтамалықтан алынған [29]. Жартылай эмпирикалық есептеу әдістеріне сүйене отырып, жетіспейтін термодинамикалық тұрақтылар анықталды [30]. Есептеу үшін Гиббстің «GIBBS» потенциалын азайту бағдарламасының алгоритмі қолданылды. Жүйенің газ фазасында тепе-теңдік құрамын іздеудің есептеу процедурасын жеделдету үшін бейтарап қоспа ретінде көлемі 2.24 м<sup>3</sup> N<sub>2</sub> газы болды.

1-ші суретте никельдің тотықсыздану дәрежесінің ( $\eta_{Ni}$ ) және темірдің ( $\eta_{Fe}$ ), қорытпадағы темірдің [Fe] ферросилицийдегі кремний концентрациясына тәуелділігі келтірілген. Кремний концентрациясының жоғарылауы 1500°C температурада темірдің оның тотығынан (FeO) тотықсыздану дәрежесінің жоғарылауына (1-ші қисық) және қорытпадағы темірдің азаюына (2-ші қисық) ықпал ететіні анықталды. Сонымен, темірдің тотықсыздану дәрежесі кремний концентрациясының 5-тен 20%-ға дейін жоғарылауымен 2.3%-ға (88.8-ден 90.8%-ға дейін) және 20-дан 65%-ға дейін жоғарылауымен 0.7%-ға өсті. Ферросилицийдегі кремнийдің 5-тен 65%-ға дейін жоғарылауымен темірдің тотықсыздану дәрежесінің жоғарылауы осы қорытпалардағы кремнийдің әртүрлі

химиялық белсенділігімен және «бос» кремний концентрациясының жоғарылауымен түсіндіріледі.

Металдағы темір мөлшері 6.7%-ға төмендеді (98.3-тен 91.7%-ға дейін), бұл кремнийдің жоғарылауы кезінде оның ферросилициядағы концентрациясының төмендеуімен түсіндіріледі.

Кремний концентрациясының 5-тен 65%-ға дейін жоғарылауымен никельдің тотықсыздану дәрежесі іс жүзінде өзгерген жоқ және 1500°C температурада 99.8-99.74%-ды құрады (1-ші сурет, қисық 3) және оның қорытпадағы мөлшері 5.3 есе өсті (1.24-тен 6.55%-ға дейін) (2-ші кесте), мұны FeO-мен ( $\Delta H_{0298.15} = -244.299$  кДж/моль) және кремнийдің химиялық белсенділігімен салыстырғанда NiO-ның ( $\Delta H_{0298.15} = -211.957$  кДж/моль) термодинамикалық беріктігінің төмендігімен түсіндіруге болады [20].



Сурет 1. 1500°C температурада ферросилиций кремнийінің [Si]FeSi концентрациясынан никель мен темірдің тотықсыздану дәрежесінің ( $\eta_{Ni, Fe}$ ) және қорытпадағы темірдің [Fe] құрамының өзгеруі: 1-никельдің тотықсыздану дәрежесі ( $\eta_{Ni}$ ),%; 2-қорытпадағы темір құрамы [Fe],%; 3-темірдің тотықсыздану дәрежесі ( $\eta_{Fe}$ ), %

## 3. Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Термодинамикалық модельдеу есептеулерінің нәтижесінде қорытпадағы кремний концентрациясы 0.35-тен 1.28%-ға дейін артатыны анықталды, егер оның ферросилициядағы мөлшері 5-тен 65%-ға дейін артатын болса. Ферросилиций кремнийінің қолдану дәрежесі есептелді, ол ферросилицийдегі кремнийдің жоғарылауымен 92.1-ден 94.5%-ға дейін артады. Қорытпадағы күкірт пен фосфордың зиянды қоспаларының концентрациясы 0.063-0.334% және сәйкесінше 0.023-0.122%-ды құрайды (кесте 2). 1500°C температурада ферросиликоникель кешенді қорытпасының химиялық құрамы 2-ші кестеде келтірілген.

Кесте 2. Қорытпаның химиялық құрамы, %

Элемент	FC5	FC20	FC35	FC50	FC65
Fe	98.3	95.3	93.6	92.5	91.7
Ni	1.24	3.63	5.0	5.91	6.55
Si	0.35	0.80	1.04	1.19	1.28
S	0.063	0.185	0.256	0.302	0.334
P	0.023	0.067	0.093	0.110	0.122

Ферросилиций кремниймен элементтерді тотықсыздандыру процесінде түзілетін тотықты балқымасында CaO, SiO<sub>2</sub>, FeO, NiO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> және SO<sub>3</sub> бар. Қождың фазалық құрамы темір, кальций, магний силикаттары мен алюминаттарынан және таза оксидтерден тұрады.

Термодинамикалық модельдеу нәтижелерін ферросилиций кремнийін: ФС5, ФС20, ФС35, ФС50, ФС65 тотықсыздандырғыш ретінде пайдалана отырып, никель кенінен кешенді қорытпа - ферросиликоникель алу технологиясын әзірлеу үшін пайдалануға болады. Ферросилицийдің төмен құнындағы темірдің тотықсыздану дәрежесі бойынша ең жақсы нәтижелерді 30-40% кремний бар қорытпаларын пайдалану арқылы алуға болады. Никельдің тотықсыздану дәрежесіне ферросилициядағы кремний концентрациясы әсер етпейді. Қорытпадағы никель концентрациясы ферросилицийдегі кремнийдің жоғарылауымен 1.24-тен 6.55%-ға дейін артады.

Термодинамикалық модельдеу нәтижелеріне сүйене отырып, ферросилиций кремнийінің маркалары: ФС5, ФС20, ФС35, ФС50, ФС65 тотықсыздандырғыш ретінде қолдана отырып, CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> көп компонентті тотықты жүйесінен никель мен темірді 1500°C температурада тотықсыздандыру арқылы кешенді қорытпаны - ферросиликоникельді алу мүмкіндігін көрсетті. Қорытпаның химиялық құрамы келесідей болды, % (мас.): 1.24–6.55 Ni; 98.3-91.7 Fe; 0.35-1.28 Si; 0.063-0.334 S; 0.023-0.122 P.

Ферросилицийдегі кремний концентрациясы [Si]ФС 5-тен 65%-ға дейін жоғарылағанда, темірдің тотықсыздану деңгейі 88.8-ден 91.4%-ға дейін артады. Ферросилиций кремнийінің концентрациясының жоғарылауымен никельдің тотықсыздану дәрежесі іс жүзінде өзгермейді және 99.8-99.74%-ды құрайды. Кремнийді пайдалану деңгейі 92.1-94.5%-ды құрайды. Қорытпадағы күкірт пен фосфордың зиянды қоспаларының концентрациясы 0.063-0.334% және сәйкесінше 0.023-0.122%-ды құрайды

Қорытындылай келе, термодинамикалық модельдеудің нәтижелері никельді тотыққан никель кенінен (1.5% NiO) тотықсыздандыру процесінің негізгі мүмкіндігін көрсетті. Алынған модельдеу нәтижелерін силикотермиялық әдіспен никель кенінен ферросиликоникельді алу технологиясын жасау үшін пайдалануға болады.

## Қаржыландыру

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыратын зерттеу шеңберінде орындалды. (грант № AP19679501).

## Әдебиеттер / References

- [1] Ryss, M.A. (1985). Production of ferroalloys. *M.: Metallurgy*
- [2] News portal. (2023). Retrieved from: <https://ussa.su/news/1898>
- [3] Kelamanov, B., Samuratov, Y., Akuov, A., Abdirashit, A., Burumbayev, A. & Orynbassar, R. (2021). Research possibility of involvement Kazakhstani nickel ore in the metallurgical treatment. *Metallurgija*, 60(3-4), 313-316
- [4] Reznik, I.D., Ermakov, G.P. & Schneerson, Y.M. (2001). Nickel: in 3 tons. *M.: Science and technology*, V.2
- [5] Kantemirov, M.D., Pavlov, A.V. & Kenzhaliev, B.K. (2003). About prospects, technical and technological features of the organization of nickel and cobalt production from oxide ores of Kazakhstan. *Complex use of mineral resources*, (5), 23-28.
- [6] Kelamanov, B., Samuratov, Y., Akuov, A., Abdirashit, A., Burumbayev, A. & Orynbassar, R. (2021). Research possibility of involvement Kazakhstani nickel ore in the metallurgical treatment. *Metallurgija*, 60(3-4), 313-316
- [7] Vatolin, N.A., Moiseev, G.K., Trusov, B.G. (1994). Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems. *Moscow: Metallurgy*
- [8] Roine, A. (2002). Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. *Porij: Outokumpu research OY*
- [9] Kelamanov, B., Zayakin, O., Yessengaliev, D., Kobegen, Y., Adaybayeva, R. & Temirbekov, A. (2023). Study of the Fe-Si-Al-Ba system using the thermodynamic-diagrammatic analyses method. *Engineering Journal of Satbayev University*, 145(2), 20-24. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i2.03>
- [10] Belov, G.V. (2002) Thermodynamic modeling: methods, algorithms, programs. *M.: Scientific World*
- [11] Rybenko, I.A. (2016) Thermodynamic modeling of processes in elementary systems: monograph. *Novokuznetsk: ed. SibGIU Center*
- [12] Kichigina, O.Yu. (2010) Recovery of nickel from its oxide by carbon. *Izvestiya of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, (10), 20-23
- [13] Vusikhis, A.S., Leont'ev, L.I., Selivanov, E.N., Sergeeva, S.V. & Tyushnyakov, S.N. (2021) Thermodynamic simulation of iron and nickel reduction from oxide melts. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 64(3), 205-210
- [14] Prostakova, V., Jiang, C., Jak, E., Decterov, S.A. (2013). Experimental study and thermodynamic modeling of the MgO-NiO-SiO<sub>2</sub> system. *Journal of Chemical Thermodynamics*, (62), 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2013.02.019>
- [15] Yessengaliyev, D., Kelamanov, B., Tazhiev, Ye., Santay, T. & Tastayev, Zh. (2022). Investigation of phase formation during roasting of chromium pellets by the thermodynamic simulation method. *Engineering Journal of Satbayev University*, 144(1), 31-36. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i1.05>
- [16] Shabanov, Ye., Kuvatbay, Ye., Makhambetov, Ye. & Toleukadyr, R. (2022). Thermodynamic and experimental simulation of the selting process of high-carbon ferrochrome with the use of high-ash coal «Saryadyr». *Engineering Journal of Satbayev University*, 144(6), 11-17. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i6.02>
- [17] Li, G., Luo, J., Peng, Z., Zhang, Y., Rao, M. & Jiang, T. (2015). Effect of quaternary basicity on melting behavior and ferronickel particles growth of saprolitic laterite ores in Krupp-Renn process. *ISIJ International*, 55(9), 1828-1833
- [18] Kaskin, K.K. (2012) Continuous remelting of metallized and iron ore pellets in an ore-thermal furnace with the production of intermediates. *Bulletin of SUSU: The Metallurgy series*, (15), 82-84
- [19] Kichigina, O.Yu. (2020) The possibility of using nickel concentrate obtained as a result of hydrometallurgical enrichment of manganese-containing raw materials when alloying steel // *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 76(7), 709-715. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-709-715>
- [20] Kozhakhmetov, S.M., Kvyatkovsky, S.A., Sadykov, S.B., Chekimbayev, A.F. & Sadykov, T.S. (2015) Smelting of cobalt-nickel oxidized ores of the Gornostaevsky deposit on ferronickel. *Complex use of mineral raw materials*, (1), 25-30
- [21] Kolesnikov, A.S. (2014) Thermodynamic modeling of ferronickel production from oxidized nickel ores of Kazakhstan. *Bulletin of SUSU: The Metallurgy series*, (1), 12-18
- [22] Kelamanov, B., Smailov, S., Yerzhanov, A., Apendina, A., Adilhanov, R. & Kabykhanov, S. (2022). The possibility of in-

- volvement in ferroalloy conversion of nickel ores of Kazakhstan. *Metallurgija*, 61(3-4), 771-773
- [23] Salina, V.A., Zhuchkov, V.I. & Zayakin, O.V. (2017) Study of a silicothermic method for obtaining complex nickel chromium containing ferroalloys by thermodynamic modeling. *Science and technology of Kazakhstan*, 3-4, 85-90
- [24] Salina, V.A., Zhuchkov, V.I. & Zayakin, O.V. (2019) Thermodynamic simulation of the manufacture of Fe-Si-Ni-Cr alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, (2), 162-164. <https://doi.org/10.1134/S003602951902023X>
- [25] Salina, V.A., Sychev, A.V., Zayakin, O.V., Zhuchkov, V.I. (2018). Study of the process of chromium reduction from the CaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-MgO-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system by ferrosilicon silicon by thermodynamic modeling. *Butler's messages*, 56(12), 131-135
- [26] Salina, V.A., Zayakin, O.V. & Zhuchkov, V.I. (2019). Thermodynamic evaluation of the interphase distribution of elements in the chromium and nickel-containing system. Ekaterinburg, KnE Materials Science
- [27] Kobatake, H., Brillo, J. (2013). Density and viscosity of ternary Cr-Fe-Ni liquid alloys. *Journal of materials science*, 48, 6818-6824
- [28] Sato, Y., Sugisawa, K., Aoki, D. & Yamamura, T. (2005). Viscosities of Fe-Ni, Fe-Co and Ni-Co binary melts. *Measurement Science and Technology*, 16(2), 363
- [29] Glushko, V.P. (1972). Thermodynamic constants of substances: handbook. *M.: Nauka*
- [30] Morachevsky, A.G. (1993). Thermodynamic calculations in metallurgy: handbook. *M.: Metallurgy*

## Термодинамикалық модельдеу арқылы никель мен темірді тотықсыздандырудың силикотермиялық процесін зерттеу

Б.С. Келаманов, Д.А. Есенғалиев\*, О.Р. Сариев, А.А. Нуржанов

Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [dauralga@mail.ru](mailto:dauralga@mail.ru)

**Андатпа.** CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> көп компонентті тотықтық жүйесінің никель (ηNi) және темірдің (ηFe) тотықсыздану дәрежесіне ферросилиций кремнийінің концентрациясының ФС5 (5% Si), ФС20 (20% Si), ФС35 (35% Si), ФС50 (50% Si), ФС65 (65% Si) әсерін 1500°C температурада термодинамикалық модельдеу әдісімен зерттеу нәтижелері келтірілген. Модельдеу үшін Outokumpu (Финляндия) әзірлеген HSC Chemistry 6.12 БК (бағдарламалық кешені) пайдаланылды. Деректер базасына сәйкес термодинамикалық сипаттамалары бар Ni<sub>3</sub>Si және Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub> химиялық қосылыстары енгізілді. Есептеулер бейтарап қоспа ретінде көлемі 2.24 м<sup>3</sup> N<sub>2</sub> бар 1 атм газ фазасының қысымында «Тепе-теңдік құрамдары» (Equilibrium Compositions) кіші бағдарламасын қолдана отырып орындалды. Алынған модельдеу нәтижелері ферросилиций кремнийімен CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> тотықты жүйесінен никель мен темірді тотықсыздандырудың термодинамикалық мүмкіндігін көрсетеді. Ферросилиций кремнийінің [Si]ФС концентрациясы 5-тен 65%-ға дейін көбейгенде, темірдің тотықсыздану деңгейі 88.8-ден 91.4%-ға дейін жоғарылайды. Ферросилиций кремнийінің концентрациясының жоғарылауымен никельдің тотықсыздану дәрежесі іс жүзінде өзгермейді және 99.8-99.7% құрайды. Кремнийді пайдалану деңгейі 92.1-94.5% құрайды. Ферросиликоникель - кешенді қорытпаның химиялық құрамы анықталды. Алынған модельдеу нәтижелерін силикотермиялық әдіспен никель кенінен ферросиликоникельді алу технологиясын жасау үшін пайдалануға болады.

**Негізгі сөздер:** тотықты жүйе, термодинамикалық модельдеу, ферросилиций, тотықсыздану дәрежесі, кешенді қорытпа.

## Термодинамическое моделирование процесса восстановления никеля и железа силикотермическим процессом

Б.С. Келаманов, Д.А. Есенғалиев\*, О.Р. Сариев, А.А. Нуржанов

Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, Актөбе, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [dauralga@mail.ru](mailto:dauralga@mail.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты изучения влияния концентрации кремния ферросилиция: ФС5 (5% Si), ФС20 (20% Si), ФС35 (35% Si), ФС50 (50% Si), ФС65 (65% Si) на степень восстановления никеля (ηNi) и железа (ηFe) многокомпонентной оксидной системы CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при температуре 1500°C методом термодинамического моделирования. Для моделирования использован программный комплекс HSC Chemistry 6.12, разработанный Outokumpu (Финляндия). В базу данных введены химические соединения Ni<sub>3</sub>Si и Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub> с соответствующими термодинамическими характеристиками. Расчеты выполнены с применением подпрограммы «Равновесные составы» (Equilibrium Compositions) при давлении газовой фазы 1 атм, содержащей 2.24 м<sup>3</sup> N<sub>2</sub> в качестве нейтральной добавки. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о термодинамической возможности восстановления никеля



и железа из оксидной системы CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-NiO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> кремнием ферросилиция. Степень восстановления железа увеличивается с 88.8 до 91.4% при повышении концентрации кремния ферросилиция [Si]ФС с 5 до 65%. Степень восстановления никеля с увеличением концентрации кремния ферросилиция практически не меняется и составляет 99.8-99.7%. Степень использования кремния составляет 92.1-94.5%. Определен химический состав комплексного сплава - ферросиликоникеля. Полученные результаты моделирования могут быть использованы для разработки технологии получения ферросиликоникеля из никелевой руды силикотермическим методом.

**Ключевые слова:** оксидная система, термодинамическое моделирование, ферросилиций, степень восстановления, комплексный сплав.

Received: 26 May 2023

Accepted: 16 December 2023

Available online: 31 December 2023

## Environmental impact assessment and natural-climatic, geocological characteristics of uranium mining enterprises of Karatau LLP

A.S. Berkinbayeva<sup>1\*</sup>, B. Sabitkyzy<sup>2</sup>, K.M. Sembek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: [aknur.b78@mail.ru](mailto:aknur.b78@mail.ru)

**Abstract.** This article discusses the conduct of geocological research, the need for which depends on the process of uranium mining by underground well leaching, the relevance of environmental problems. As a result of geocological studies, data on soil, vegetation cover, underground water and atmospheric air pollution will be obtained, which characterize the state of the environment. The high concentration of chemical elements and their compounds allows us to identify the causes and sources of contamination. Research methods necessary for conducting research are determined considering specific natural-territorial complexes (NTC), geomorphological, geochemical and other conditions. They may include the results of previously conducted geological, engineering-geological, hydrogeological and geochemical studies.

**Keywords:** ground water, environmental problems, the method of leaching, geocology, soil, the concentration.

### 1. Кіріспе

Қазіргі таңда металлургияның дамуы минералды және энергетикалық шикізатты өндіру мен тұтыну ауқымының қарқынды өсуімен ерекшеленді. Қазақстан өнеркәсібі дамуының басты бағыты – қазба байлықтарды игеру. Соның ішінде уран өндірісінің өзіндік ерекше орны бар. Қазақстанда табиғи радиактивтіліктің жоғары деңгейін беретін уран беруші алты ірі геологиялық өңір, көптеген шағын кен орындары мен уран байқалатын кеніштер, уран өндіруші кәсіпорындар мен ядролық жарылыстар жасалған жерлерде, шоғырланған қалдықтар бар [1].

Негізгі қызмет көрсету секторлары – металлургия өнеркәсібі, энергетика, атом, телекоммуникациялар және ғылыми-зерттеу қызметі. Минералдық және энергетикалық шикізатты және оны қайта өңдеудің маңызды өнімдерін әлемдік тұтыну үнемі өсіп келеді және әрбір 15 жыл сайын екі еселенеді.

### 2. Зерттеу әдістері

Мақалада уран өндіретін «Қаратау» ЖШС кәсіпорнының өндірістік қызметі кендерді күкірт қышқылды ұңғымалы шаймалауға негізделген. Түркістан облысы Созақ ауданында орналасқан «Қаратау» ЖШС кәсіпорнының қоршаған ортаға зиянды заттарын шығаруының әсерін бағалау болып табылады. Жерасты шаймалау әдісімен өндірілген кезеңдегі өнімнің жалпы көлемі 2021 жылы қолданыстағы инфрақұрылымдарды жаңғыртуға қаржы салудың ұлғаюына байланысты 4.6 миллион фунтқа U308 өсті [2].

Уранды 1-суретте көрсетілгендей жерасты ұңғымалық шаймалау технологиялық схемасынан тұрады:

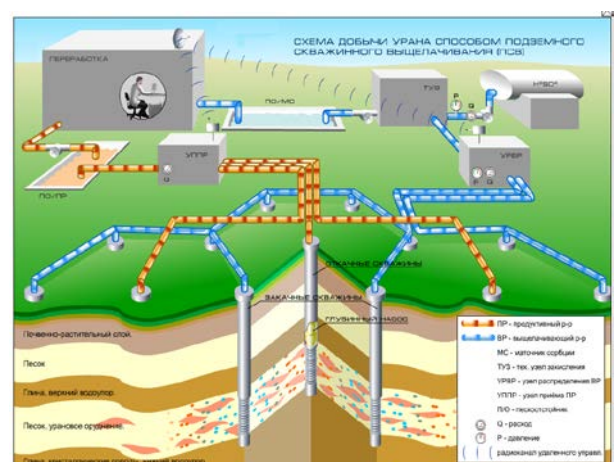
1) өндіру ұңғымалары геотехнологиялық полигонында уранды күкірт қышқылы ерітінділерімен жерасты ұңғымалық шаймалау (ЖҰШ);

2) сору ұңғымаларынан өнімдік ерітінділерді сораптық ерітінді көтеру;

3) технологиялық қабылдау және тарату түйіндерінде (ҚТТ), өнімдік ерітінділерді (ӨЕ) жинау;

4) ӨЕ магистральды құбыр өткізгіші бойынша ураны бар ерітінділерді ЖҰШ руднигі алаңының ӨЕ құм тұндырғышына тасымалдау;

5) технологиялық қабылдау және тарату түйіндерінде (ҚТТ) қайтымды ерітінділерді күкірт қышқылымен қышқылдандыру, олар күкірт қышқылы қоймасының руднигі өндірістік алаңында орналасады [2].



Сурет 1. Жерасты ұңғымалық шаймалау тәсілімен уран өндіру схемасы

Уранды өнімдік көкжиекте көлденең немесе әлсіз көлбеу жататын пласттары бар, борпылдақ тұнбалы суланған шөгінділерде жатқан рудадан уранды жерасты ұңғымалық шаймалау үшін, жер бетінен бұрғыланған айдау және сору ұңғымалары жүйелерін қолданады [2].

Рудалық көкжиектен өткенде, күкірт қышқылы ерітінділері урандық минералдармен әрекеттесіп, оны шаймалайды – ерітін күйге айналдырады.

Сору ұңғымаларынан өнімдік ерітінділер жер бетіне батырылатын ұңғымалық сораптармен көтеріледі де, технологиялық қабылдау және тарату түйіндеріне (ҚТТ) барады, содан жинаушы коллектор бойынша (магистральды құбырөткізгіш) ЖҰШ руднигі өндірістік алаңында орналасқан өнімдік ерітінділер құм тұндырғышына тасымалданады.

«Қаратау» кәсіпорынында уран өндіру 2-суретте көрсетілгендей Қазақстанның барлық басқа кәсіпорындарындағы сияқты жерасты ұңғымалық сілтiсiздендiру тәсiлi арқылы жүзеге асырылады [3].

Бұл тәсіл экологиялық таза болып саналады. Кен орнындағы радиациялық жағдай үлкен қалалардағы радиациялық жағдайдан ешқандай айырмашылығы жоқ.



Сурет 2. «Қаратау» кәсіпорынында уран өндіру

ӨЕ тұндырғыштан ағартылған ерітінділер орталық сораптық станция (ОСС) сораптарымен ерітінділерді өңдеу цехының сорбциялық бөліміне келеді.

Уранды шаймалау берілген концентрацияға дейін күкірт қышқылымен нығайтылатын сорбция аналығымен жасалады. Қышқылдандыру және белсенді шаймалау сатысында гидродинамикалық жеке блоктар бойынша және жалпы аймақтарда тепе-теңдікті (айдалатын және сорылатын ерітінділер көлемінің тепе-теңдігін) сақтау керек. Берілген шарт сақталса, блоктар (аймақтар) ұңғымалар жүйесі сүзудің стационарлы режимінде жұмыс істейді, солай ерітінділердің руда сыятын көкжиек қимасында айналым аймағының бөлінуі, өнімдік ерітінділердің минималды сұйылуы және жалпы жақсы басқару қамтамасыз етіледі [4].

Ұңғымаларды реагенттік өңдеу – ұңғымалар өнімділігін қалпын келтірудің химиялық жолы, арнайы химиялық ерітінділер сүзу колоннасына және сүзу алдындағы аймаққа кольматирлеуші түзілулерді еріту үшін беріледі. Ұңғымаларды механикалық қоспалар мен шөгінділерден тазалау. Ұңғымаларды тазалау қажеттілік бойынша өткізіледі, жұмыс көлемі ағымдық жылға техникалық тапсырмамен анықталады.

Технологиялық ұңғымаларды реагенттік өңдеу құмды тығындарды жою, сүзу колоннасын және тұндырғыштарды жуу, ұңғыманы эрлифтті айдау сияқты жөндеу-қалпына келтіру жұмыстарынан кейін жасалады.

ЖҚЖ реагенттік әдістері келесі жолмен жүзеге асырылады [5]:

а) сүзгіштер және сүзу жанындағы аймақты 10-20% тұз қышқылымен өңдеу;

б) сүзгіштер және сүзу жанындағы аймақты 50-98% күкірт қышқылымен өңдеу;

Қышқылды сүзгіштерді орнату аймағына беру жүзеге асырылады:

а) ұңғымаға еркін құю және ары қарай оны буферлі сұйықтықпен (шаймалаушы ерітіндімен, техникалық сумен) сұйықтықтың жер бетінен төмен статикалық деңгейі кезінде сүзу аймағына қысу;

б) сораппен шланг арқылы еріксіз беру, сұйықтықтың жер бетінен жоғары статикалық деңгейі кезінде ұңғыма шеттерін герметизациялау (өздігінен ағу).

Бұрғылау агрегатының қондырғысы мен механизмдері келесі жұмыстарды орындауға рұқсат береді:

1) қосымша қондырғы мен технологиялық аспаптар тіркелген бұрғылау агрегатының жолмен және жолсыз жермен автономды қозғалуы;

2) бұрғылау снарядын ұңғымаға белгілі технологиясы бар операцияларға технологиялық аспаптармен (жыныстарды бұзатын ұштар, пакералер, свабтар және т.б.) түсіру;

3) технологиялық аспаптармен бұзу және жуу сұйықтығымен жер бетіне сүзу колоннасы мен бұтадағы кольматациялық жиналымдарды шығару;

4) ұңғыманы сумен және оны кольматанттардан тазалауды жақсартатын арнайы жуу сұйықтықтарымен жуу;

5) сүзгіш пен сүзу аймағына белгі ауысымды, гидродинамикалық әсер, бұрғылау снарядымен отырғызылу колоннасын жүргізу;

б) ұңғыманы реагенттік өңдеуде химреагенттерді сүзу аймағына жіберу;

Өндіру блогын (аймақ) қолданудан соңғы шығару жер қойнауы шаймаланатын аймақты «жуу» болып табылады. Жұмыс істелген жойылатын аймақтарда жер беті ережелер бойынша рекультивация өтеді.

Блоктың жұмысын аяқтау көрсеткіштері - жер қойнауынан уранды шығару жобалық деңгейге жетуі -  $30 \text{ мг/дм}^3$  төмен минималды-рентабельді деңгейден төмендеуі.

Қолдану блоктарын (аймақтарды) өшіру алдында бақылау ұңғымалары бұрғыланады, олар жеке блоктар бойынша таңдалатын аймақтарды тексеру нәтижелерін талдау негізінде белгіленеді, бір уақытта геофизикалық, гидрогеологиялық және зертханалық зерттеулер кешенін өткізеді, оның мақсаты келесі [6-7]:

1) Қолдану аймағының уран қорын өңдеу толықтығын бекіту;

2) Жер қойнауында өнімдік ерітінділері сақталған алаңдарды ерекшелеу;

3) Аралық су тасушы көкжиектерге қышқыл ерітінділер мен уранның ену дәрежесін анықтау.

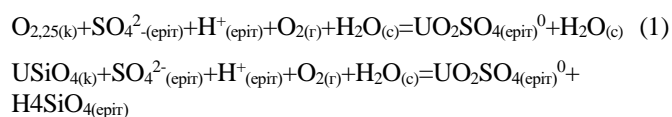
4) Технологиялық ерітінділердің жұмыстық өнімдік су тасушы көкжиекте ағу дәрежесін жерасты суларының табиғи ағыны әсерінен өшірілетін аймақ шектерінен тыс анықтау. Қарастырылған шаралар оларды орындау мерзімі және физикалық көлеміне сәйкес кәсіпорынның негізгі жұмысының жылдық жобаларына кіреді.

Төменде геотехнологиялық полигондағы технологиялық үрдістердің есептік көрсеткіштері келтірілген (1-кесте) [8-9].

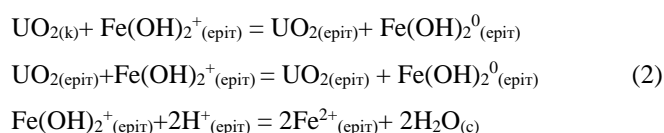
**Кесте 1. ГТП технологиялық үрдістерінің есептік көрсеткіштері**

№ п/с	Сипаттама	2013	2014	2015	2016	2017	Барлығы
1	Өндірістік бағдарлама, т	2030	2030	2030	2030	2030	10150
2	Жұмыс істейтін блоктар саны, дн	39	48	49	52	41	
3	Жыл басындағы қор күйі, соның ішінде						
4	Ашылған, т	4167	4542	4562	4869	5486	
5	Дайындалған, т	3347	3775	3700	4478	4011	
6	Өндіруге дайын, т	2933	2792	3008	3684	2353	
7	Қор өсуі, т	-	-	-	-	-	-
7.1	Ашылған, т	2634	2276	2563	2873	509	10855
7.2	Дайындалған, т	2687	2181	3034	1789	1746	11437
7.3	Өндіруге дайын, т	2118	2472	2932	925	2881	11328
8	Қорлардың жыл соңындағы күйі						
9	Ашылған, т	4542	4562	4869	5486	3739	
10	Дайындалған, т	3775	3700	4478	4011	3501	
11	Өндіруге дайын, т	2792	3008	3684	2353	2978	
12	Қышқылдандыру						
13	Қышқылдандыру орташа ұзақтығы, күн	45-55	45-55	45-55	45-55	45-55	45-55
14	Қышқылдандыру кезіндегі қышқылдың орташа концентрациясы, г/дм <sup>3</sup>	18-20	18-20	18-20	18-20	18-20	18-20
15	Қышқылдандыруға берілген ерітінділер, м <sup>3</sup>	1177	1240,1	2283	1217	532	6449
16	92.5% күкірт қышқылы шығыны, т	21193	24129	41100	21906	9578	117906
16.1	92.5% күкірт қышқылының 1кг уранға меншікті шығыны, кг/кг	10.0	9.8	14.0	23.7	3.3	10.4
16.2	92.5% күкірт қышқылының 1т ГРМ меншікті шығыны, кг/кг	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
17	Белсенді шаймалау мен шаймалау						
18	Өнімдік ерітінділер көлемі, мың м <sup>3</sup>	12528.7	13161.4	13601.7	13601.7	13601.7	66495
19	ӨЕ уран мөлшері, т	2059.6	2059.3	2059.3	2059.3	2059.3	10296.8
20	ӨЕ уран орташа концентрациясы, г/л	164	156	151	151	151	155

Уранды ЖҰШ химиялық үрдісін сипаттау. жерасты шаймалау үрдістерінің химиясы күкірт қышқылды жұмыстық ерітінділердің U (IV) оксид және силикаттармен әрекеттесуі реакция (3) теңдеулерімен сипатталады:



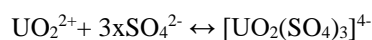
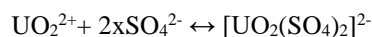
Қышқыл ортада бас тотықтырғыштан U (IV) уранмен сингенетикалық үш валентті темірдің гидролизденген түрлері шығады: FeOH<sup>+2</sup>, Fe(OH)<sup>+</sup>, Fe2(OH)<sup>+4</sup> және аз мөлшерде Fe<sup>+3</sup>. Қышқыл ортада уран оксидтерінің тотығу үрдісі сатылы сипатта болып, реакция теңдеулерімен сипатталады (2):



Қышқыл ортада уранды қосымша тотықтырғыш болат материалдар мен жабдықтарды пассивациялау үшін күкірт қышқылымен берілетін азот қышқылы болып табылады. Алты валентті уран қосылыстары рудадан тотықтырғышсыз бөлінеді, карбонатты ортада да солай.

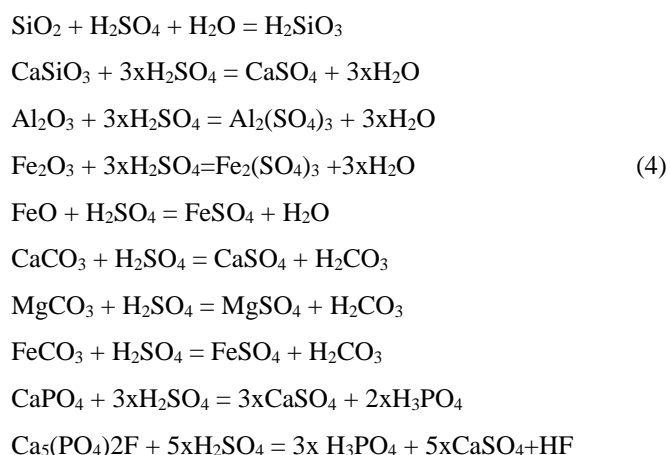
Уранды шаймалау температурасын 50°C жоғарлату 25°C байқалатын қатты және сұйық фазалар облыстарын өзгертпейді, ол тек ЖҰШ үрдісінің кинтеикасына ғана оң әсер етеді.

Күкірт қышқылы ерітінділерінде уранил ионы сульфат және биосульфат иондарымен қайтымды реакциямен анионды уранил-сульфатты кешендер түзеді: UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> + HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> ↔ [UO<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]<sup>+</sup>



Қышқыл ортада уранның басты формасы уранилдың үшсульфатты кешені [UO<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]<sup>4-</sup> болып табылады. Сол түрде уран анионалмасу шайырларымен жұтылады. Уранилдың үшсульфатты кешені үш түрі де ерітіндіде тепе-теңдікте орналасады.

Руда мен жыныстарда күкірт қышқылымен шаймалау кезінде қоспалардың әрекеттесу реакциялары келесі реакция теңдеулерімен сипатталады.



**3. Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау**

Шаймалаудың қышқылдық әдісінде реагент шығыны негізінен руданың урандық емес минералдарымен анықталады. Қышқылдың негізгі бөлігі кальций, магний, темір карбонаттарын ерітуге шығындалады, олар

сұйылтылған қышқылдармен оңай әрекеттеседі. Карбонаттар мөлшері жоғары болса (2% аса), шаймалаудың қышқылдық әдісі экономикалық тиімсіз болады.

Зерттеулер жүргізу үшін қажетті зерттеу әдістері, нақты табиғи-аумақтық кешендерді (КБП), геоморфологиялық, геохимиялық және басқа да жағдайларды ескере отырып айқындалады. Олар бұрын жүргізілген геологиялық, инженерлік-геологиялық, гидрогеологиялық және геохимиялық зерттеулердің нәтижелерін қамтуы мүмкін.

Геохимиялық зерттеулердің нәтижелері кәсіпорынның әсер ету аймағын анықтауға және осы өндіріске тән химиялық элементтердің тізбесін белгілеуге мүмкіндік береді.

Ұңғымалы шаймалау әдісімен пайдалы қазбалардың кен орындарын игеру қоршаған ортаға аз әсер ететіндігі көрсетілген, және де жерасты шаймалау процесінде жыныстар мен қалдық қоймалары пайда болмайды, геологиялық құрылымдардың тұтастығы бұзылмайды. Ауа бассейнінің және жер бетінің ластануы, дәстүрлі тау-кен әдістеріне қарағанда әлдеқайда аз.

Зерттеуде ластаудың негізгі көздері анықталды. Кәсіпорынның барлық өндірістік аймақтардағы шығарылатын шығындыларында атмосфераға күкірт қышқылы, азот диоксиді, азот және көміртегі оксидтері, көміртектің бөлінетіні анықталды.

Бүгінде уран тек тапсырыспен ғана өндіріледі. Жаңа кен орындарын игеру өтінімдер пакетін қалыптастыру шартымен басталады. Екі кен басқармасы «Қазатомөнеркәсіп» ҰАК АҚ-на тиесілі Степное және Орталық, жыл сайын жылына екі мың тоннаға дейін уран

өндіреді. Енді Созақ ауданында уран өндірумен айналысатын екі шетелдік компания да айналысады. «КАТКО» уран өндіру жөніндегі қазақстан-француз бірлескен кәсіпорны шикізат өндіруге кірісті.

## Әдебиеттер / References

- [1] Alekseenko, V.A. (2010). *Jekologicheskaja geohimija. M.: Logos*
- [2] Gromov, B.V. (2018). *Vvedenie v himicheskuyu tehnologiju urana. Moskva: Atomizdat*
- [3] Order of the Minister of Environmental Protection of the Republic of Kazakhstan dated April 24, 2007 No. 123-p. *Ob utverzhenii Pravil soglasovaniya programm proizvodstvennogo jekologicheskogo kontrolja i trebovanij k otchetnosti po rezul'tatam proizvodstvennogo jekologicheskogo kontrolja*
- [4] Trofimov, V.T., Korolev, V.A., Gerasimova, A.S. (2008). *Klassifikacija tehnogennyh vozdeystvij na geologicheskuyu sredu. Geojekologija, Inzhenernaya geologija, Gidrogeologija i geokriologija, (5), 20-23*
- [5] Mamilov, V.A. (2010). *Dобыча urana metodom podzemnogo vshhe-lachivaniya. Moskva: Atomizdat*
- [6] Lucenko, I.K., Beleckij, V.I., Davydova, L.G. (2001). *Bes-shahtnaja razrabotka rudnyh mestorozhdenij. Moskva: Nedra*
- [7] Kajukov, P.G. (2010). *Kazakstan Respublikasyndagy radiacijalyk zhagdajdy zertteu turaly eseptер: 011 Bardarlama. Almaty: Volkovgeologija*
- [8] Mazalov, I.F. (2012). *Onerkasiptin radioaktivti jekologijasy. Almaty*
- [9] Grenthe, I., Fuger, J., Konings, R., Lemire, R.J., Muller, A.B., Nguyen-Trung, C. & Wanner, J. (2010). *The Chemical Thermodynamics of Uranium. New York: Elsevier*

## Уран өндіруші «Қаратау» ЖШС кәсіпорынының қоршаған ортаға әсерін бағалау және табиғи-климаттық, геоэкологиялық сипаттамасы

А.С. Беркинбаева<sup>1</sup>, Б. Сәбитқызы<sup>2</sup>, К.М. Сембек<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [aknur.b78@mail.ru](mailto:aknur.b78@mail.ru)

**Андатпа.** Бұл мақалада геоэкологиялық зерттеулерді жүргізуді қарастырады, олардың қажеттілігі жер асты ұңғылап шаймалау әдісімен уран өндіру процесіне, экологиялық проблемалардың өзектілігіне байланысты. Зерттеу объектісі құрамында геоэкологиялық зерттеу нәтижесінде қоршаған ортаның жай-күйін сипаттайтын топырақ, өсімдік жамылғысының, жер асты сулары мен атмосфералық ауаның ластануы туралы мәліметтер алынатын болады. Химиялық элементтер мен олардың қосылыстарының жоғары концентрациясы ластану себептері мен көздерін анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеулер жүргізу үшін қажетті зерттеу әдістері, нақты табиғи-аумақтық кешендерді (КБП), геоморфологиялық, геохимиялық және басқа да жағдайларды ескере отырып айқындалады. Олар бұрын жүргізілген геологиялық, инженерлік-геологиялық, гидрогеологиялық және геохимиялық зерттеулердің нәтижелерін қамтуы мүмкін.

**Негізгі сөздер:** жер асты сулары, экологиялық проблемалар, шаймалау әдісі, концентрация.

## Оценка воздействия на окружающую среду и природно-климатические, геоэкологические характеристики уранодобывающих предприятий ТОО «Каратау»

А.С. Беркинбаева<sup>1</sup>, Б. Сәбитқызы<sup>2</sup>, К.М. Сембек<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Алматынський технологический университет, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [aknur.b78@mail.ru](mailto:aknur.b78@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассматривается проведение геоэкологических исследований, необходимость которых зависит от процесса добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания, актуальности экологических проблем. Объектом исследования является в результате выполнения геоэкологических исследований будут получены сведения об загрязнении почвенного, растительного покрова, подземных вод и атмосферного воздуха, характеризующие состояние окружающей среды. Высокая концентрация химических элементов и их соединений позволяет выявить причины и источники загрязнения. Методы исследования, необходимые для проведения исследований, определяются с учетом конкретных природно-территориальных комплексов (КБП), геоморфологических, геохимических и других условий. Они могут включать результаты ранее проведенных геологических, инженерно-геологических, гидрогеологических и геохимических исследований.

**Ключевые слова:** подземные воды, экологические проблемы, метод выщелачивания, концентрация.

Received: 14 September 2023

Accepted: 16 December 2023

Available online: 31 December 2023

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i6.05>

## Assessment of the water quality state in the downstream portion of Syr-Darya using the water quality index arithmetic method

F. Salehi<sup>1,2\*</sup>, M. Kussainova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Herat University, Herat, Afghanistan

\*Corresponding author: [fahimehsalehi1219@gmail.com](mailto:fahimehsalehi1219@gmail.com)

**Abstract.** This research study's overarching goal is to assess the effects of industrial (chemical components) and agricultural (Pesticide residues) activities on the Syr-Darya. This study has the following specific goals: 1. Assess the current state of Syr-Darya's water quality; 2. Examining the agricultural and industrial activities in the Syr-Darya (Kazakhstan) downstream portion. In this study we aimed to assess the current state of water quality in the downstream portion of Syr-Darya using the Water Quality Index (WQI) arithmetic method. The study specifically focuses on the effects of industrial and agricultural activities on water pollution, including metallic and non-metallic chemical components, PH, TDS, other minerals, and pesticide residues. The importance of this research lies in the lack of up-to-date evaluations of water quality classification and the potential impact of pollutants (industrial and agricultural activities) over the Syr-Darya. The literature review highlights the high levels of pollution in the river due to industries and agricultural activities. Both upstream and downstream countries contribute to the pollution, with upstream countries adding pesticides and downstream countries polluting the water through industrial activities. The research will involve collecting secondary data from existing studies on water pollution and indicators of water quality in the region. The methodology involves calculating the WQI using the Weighted Arithmetic Index Method, which provides an overall index number representing the water quality. This research is important for understanding and managing water pollution in the Syr-Darya river basin.

**Keywords:** water quality assessment, WQI, Water Quality Index, arithmetic method, chemical compounds, water pollution, the concentration of minerals, water quality index.

### 1. Introduction

Despite the Syr-Darya River's significance and its long history of agricultural production, few researches have examined the effects of agricultural and industrial pollutants in the present day [5]. Although, water contamination in the Syr-Darya is a major cause for concern, there are few research papers on the subject, which emphasizes the significance of this work.

Water pollution in Kazakhstan is more important than water scarcity. Water contamination closely linked to agriculture in the irrigated regions along the Syr-Darya. Soviet initiatives to boost agricultural output in the Syr-Darya basin led to a dramatic increase in water diversion, which had a substantial negative impact on the water's suitability for irrigation, fisheries, and other uses [8]. There are various older research studies that rated the Syr-Darya's water quality, for example according to [1]: the Syr-Darya River is classified over its whole course as a moderately contaminated water body (III class water quality) by the water pollution index. Though, in this study, we tend to provide an update.

According to a comprehensive report produced as a result of joint work between the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), and the International Water Assessment Centre (IWAC), during 2021 - 2023, the major source of pollution in the basin is agricultural activities accounts for 90% pollution of water volume. Although indus-

trial pollutants have a significantly smaller volume it is more poisonous, making them more harmful [9].

When the polluted water is released into the rivers untreated or poorly treated, it is difficult to restore its previous status. The issue of water quality is more important than climate change, water availability, and other issues because water quality can have major impacts on urban but also agricultural water use. There should be stricter rules for companies to take water treatment precautions. If other countries are capable of good regulations on industrial water use, then Kazakhstan can also do so. Then we can conclude that one important source of pollution in Kazakhstan is industrial use.

In general, water volume in Kazakhstan is not such a critical problem, there is not so little water overall in the country, but, it is unequally distributed. Kazakhstan is an economically powerful country, and it has a huge potential for improving water management by also showing a good paradigm for the neighboring countries. This management is also applicable to water quality issues in the same way [3]

Both upstream (Tajikistan and Kyrkzstan) and downstream countries (Uzbekistan and Kazakhstan) are responsible for the river's pollution. Upstream countries mainly pollute the water by adding pesticides, which residues return to the water because flooding irrigation is usually common in Central Asian countries and downstream countries by mining and quarrying that pollute the water and use water to dilute by everyday activities.

Industrial accidents at hazardous chemical facilities, including at tailings management facilities, as well as other industrial activities can cause water pollution and can have a significant transboundary impact when they occur in a transboundary river basin. The integration of industrial risks, notably tailings risks, in river basin management plans, as well as the enhancement of cooperation between industrial safety and water experts are key for effectively preventing water pollution and its negative impact in the Syr-Darya river basin [4].

## 2. Materials and methods

In this study, we adopted a secondary data collection approach to gather and analyze data. This approach allowed us to leverage previously collected information and focus on analyzing, interpreting, and drawing meaningful conclusions from the available data. For analyzing purpose, it is important to understand the extent of water pollution in the basin. Some (few) researches has already stated the amount of water pollution in the river. For example, in all the sampling events for Syr-Darya, residues of lindane ( $\gamma$ -HCH) which is ranged from 0.014 to 0.24  $\mu\text{g/L}$  detected in water samples, are among the highest concentrations reported for rivers globally. Lindane is a chemical compound that is used both as an agricultural insecticide and as a pharmaceutical treatment for lice and scabies [5]. Hence, literature review was an effective tool for data collection procedure.

According to [1], as presented in table 1, water quality indicators for Syr-Darya is indicated. MAC 1 and 2 is for fisheries and agriculture, and MAC 3 is for drinking uses in open water bodies. These indications served as the basis for each parameter's standard values in our analysis. The parameters' indicators and mean concentration values described in the following tables and paragraphs.

**Table 1. Priority indicators of water quality in Syr-Darya River Basin Ref [1]**

No.	Indicator	Unit	MAC1	MAC2	MAC3
1	Oxygen	mg/l	6	-	0.005
2	BOD	mgO <sub>2</sub> /l	3	-	6
3	COD	mgO <sub>2</sub> /l	15	-	-
4	Nitrite Nitrogen	mg/l	0.02	-	3
5	Salinity	mg/l	1000	-	up to 1000
6	Chlorides	mg/l	300	350	350
7	Sulphates	mg/l	100	-	500
8	Magnesium	mg/l	40	-	< 40
9	Sodium	mg/l	120	-	120
10	Total hardness	ml/l	7	7	7
11	Copper	$\mu\text{g/l}$	1	1	1
12	Zinc	$\mu\text{g/l}$	10	5	1
13	Chrome VI	$\mu\text{g/l}$	1	-	0.5
14	Phenol	mg/l	0.001	-	No more than 0.01
15	Oil products	mg/l	0.05	-	No more than 0.05
16	Fluoride	mg/l	0.75	1.5	1.5

Furthermore, the most recent study, which was published in 2023 by [6], also examined the amount of metallic, non-metallic chemical compounds, other minerals, and total dissolved solids on three different bases: minimum, average, and maximum as shown in Table 2. In this study we used the mean values. In this research the approach is calculation of WQI (Water Quality Index) using Weighted Arithmetic Index Method [11], which indicates the extent of water pollution or quality of water.

**Table 2. Major ions and TDS (in mg L<sup>-1</sup>) collected for Syr Darya waters in August 2021 [6]**

Mineral	TDS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	CL <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
Metal/ Non-metal ions	NA	NA	N	N	N	M	M	M	M
Average	1359	140	-	125	737	130	95	175	4.1
Maximum	1502	247	9	147	804	170	109	213	4.8
Minimum	1257	98	ND	113	661	116	89	158	2.4

This unique parameter will help us better understand the current water quality of Syr-Darya in terms of an index number, which represents overall quality of water for any intended use. It defined as a rating that reflects the composite influence of different water quality parameters taken into consideration for the calculation of water Quality index (WQI). The indices are among the most effective ways to communicate the information on water quality trends to the public or to the policy makers and in water quality management. In formulation of water quality index, the relative importance of various parameters depends on intended use of water. Arithmetic index method [11] used to calculate WQI (Table 3):

Step 1: In the present study, the unit weight ( $W_n$ ) values for each parameter calculated by using the following formula taken from [12].

$$W_n = \frac{k}{S_n}$$

$$\text{where, } K = \frac{1}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n}} = \frac{1}{\sum \frac{1}{S_n}}$$

$S_n$  – standard permissible value for the nth parameters;

$W_n$  – unit weight for nth parameter;

$k$  – proportionality constant.

Step 2: Calculation of Sub index ( $Q_n$ ) value by using the formula:

$$Q_n = \frac{(V_n - V_o)}{(S_n - V_o)} \times 100,$$

$Q_n$  – quality rating;

$n$  – water quality parameter;

$V_n$  – mean concentration of observed value;

$V_s$  – standard value;

$V_o$  – ideal value, in most cases  $V_o = 0$  except in certain parameters like PH, dissolved oxygen, etc.

$$Q_{PH} = \frac{(V_{PH} - 7)}{(8.5 - 7)} \times 100;$$

Therefore,

$$Q_{PH} = \frac{(8.21 - 7)}{(8.5 - 7)} \times 100;$$

$$Q_{PH} = \frac{(1.21)}{(1.5)} \times 100 = 0.8.$$

Step 3: Calculation of WQI, by combining step 1 and step 2:

$$WQI = \frac{\sum W_n Q_n}{\sum W_n};$$

$$WQI = \frac{89.25}{1} = 89.25.$$



Table 3. Calculation of WQI

Parameters	Standard (Sn)	1/Sn	$\Sigma 1/Sn$	$K = 1/(\Sigma 1/Sn)$	$W_i = K/Sn$	IDEAL Value (V0)	Mean Con Value (Vn)	Vn/Sn	$Q_n = V_n/S_n * 100$	WnQn
PH	8.5	0.118	0.259	3.861	0.454	7	8.21	0.8	80.000	36.342
EC	300	0.003	0.259	3.861	0.013	0	318.4	1.0613	106.133	1.366
TDS	500	0.002	0.259	3.861	0.008	0	1359	2.718	271.800	2.099
Ca2+	75	0.013	0.259	3.861	0.051	0	130	1.7333	173.333	8.924
Mg2+	<40	0.025	0.259	3.861	0.097	0	95	2.375	237.500	22.926
CL-	250	0.004	0.259	3.861	0.015	0	125	0.5	50.000	0.772
Na+	120	0.008	0.259	3.861	0.032	0	175	1.4583	145.833	4.693
K+	12	0.083	0.259	3.861	0.322	0	4.1	0.3417	34.167	10.994
SO(4) 2-	500	0.002	0.259	3.861	0.008	0	737	1.474	147.400	1.138
Sum		0.259			1.000002					89.254

### 3. Results and discussion

In 2011, a UNECE report conducted by Gapparov B.Kh. and Beglov I.F. provided a numerical analysis of the priority indicators of water quality in Syr-Darya for fisheries, agriculture, and drinking water. These indicators were evaluated based on the maximum acceptable concentration, as shown in Table 1.

Our study determined that the median value for pH in Syr-Darya was 8.21, the median value for electrical conductivity (EC) was 318.4  $\mu S cm^{-1}$ , and the median value for total organic carbon (TOC) was 2.75 mg/l.

Table 1 and Table 2, which are included in our study, serve as the foundation for calculating the Water Quality Index (WQI) and provide a description of the current water quality status in Syr-Darya. To estimate the WQI, we took the average values from nine different sites, focusing on the concentrations of minerals in the river, as presented in Table 2.

Furthermore, we evaluated the suitability of the WQI values for human consumption according to Mishra and Patel's (2001) study [7]. The ratings for the WQI values are as follows:

Table 4. Classification of Surface Water quality according to Mishra and Patel

Category	Water Quality	WQI Yadav et al.	WOI Rama-krichnaiah et al.
I	Excellent	0-25	<50
II	Good	26-50	50-100
III	Poor	51-75	100-200
IV	Very Poor	76-100	200-300
V	Unsuitable	Above 100	>300

Our calculations and literature analysis revealed that the water quality of the Syr-Darya falls under Mishra & Patel's (2001) IV category, as indicated in Table 4, which is «Very Poor» and unfit for drinking purposes.

### 4. Conclusions

In conclusion, this research study aimed to assess the water quality in the downstream portion of the Syr-Darya River using the Water Quality Index (WQI) arithmetic method. The study focused on the effects of industrial and agricultural activities on water pollution, specifically metallic, and non-metallic chemical components, and pesticide residues. The findings from the literature review emphasized the high levels of pollution in the river due to agricultural and industrial activities. Both upstream and downstream countries contribute to the pollution, with upstream countries adding pesti-

cides and downstream countries polluting the water through industrial activities.

The research utilized the Weighted Arithmetic Index Method to calculate the WQI, which provides an overall index number representing the water quality. The results showed that the water quality of the Syr-Darya falls under the «IV» Mishra and Patel rating, of the «Very Poor» category, rendering it unfit for drinking purposes, but suitable for agriculture and fisheries.

This research is significant as it provides a modern evaluation of water quality and highlights the potential impact of agricultural and industrial pollutants in the Syr-Darya. It also sheds light on the lack of research studies in this area, emphasizing the importance of further research and the need for stricter regulations to address water pollution in the region. By understanding, monitoring, and managing water pollution in the Syr-Darya River basin, steps should be taken to protect the ecosystem, ensure safe drinking water, and support sustainable agricultural practices.

### Acknowledgements

This study was supported in part by the National Academies of Sciences, Engineering, And Medicine, PEER Cycle 9 project (Award No.9-38) entitled «The effects of excessive water use and agricultural intensification on Aral Sea shrinkage: SES dynamics within the Syr-Darya River Basin».

### References

- [1] UNECE. Portal of Knowledge for Water and Environmental Issues in Central Asia. (2011). Water Quality in the Amu-Darya and Syr Darya River Basins. CA Water INFO. Retrieved from: [http://www.cawater-info.net/water\\_quality\\_in\\_ca/files/analytic\\_report\\_en.pdf](http://www.cawater-info.net/water_quality_in_ca/files/analytic_report_en.pdf)
- [2] Joanna Lillis. (2015). Kazakhstan: Scientists Alarmed at Pollution of Central Asia's Longest River. Retrieved from: <https://eurasianet.org/kazakhstan-scientists-alarmed-at-pollution-of-central-asias-longest-river>
- [3] Stefanos Xenarios. (2021). What's wrong with water. discussion on water security in Kazakhstan and Central Asia. Retrieved from: <https://gspp.nu.edu.kz/en/what-s-wrong-with-water-discussion-on-water-security-in-kazakhstan-and-central-asia/>
- [4] UNECE. (2022). Development of joint measures to prevent and respond to pollution of the Syr Darya river in emergency situations (Syr Darya Project (Phase I)). Retrieved from: <https://unece.org/pollution-syr-darya-river-emergency-situations>
- [5] Snow, D.D., et. al. (2020). Legacy and current pesticide residues in Syr Darya, Kazakhstan: Contamination status, seasonal variation and preliminary ecological risk assessment. *Water Research*, 184(1), 116141. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116141>

- [6] Satybaldiyev, B., et. al. (2023). Downstream hydrochemistry and irrigation water quality of the Syr-Darya, Aral Sea Basin, South Kazakhstan. *Journal of Water Supply*, 23(5), 2119–2134. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.114>
- [7] Mishra, P., Patel, R. (2001). Study of the pollution in the drinking water of Rairangpur, a small tribal dominated town of North Orissa. *Indian Journal of Environmental Ecoplanning*, (5), 293–298
- [8] Satybaldiyev, B., et. al. (2022). Evaluation of dissolved and acid-leachable trace element concentrations in relation to practical water quality standards in the Syr-Darya, Aral Sea Basin, South Kazakhstan. *Chemosphere*, (313), 137465. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137465>
- [9] UNECE. (2023). Study on pollution sources and identification of accident risks in the Syr-Darya basin. Retrieved from: <https://unece.org/pollution-syr-darya-river-emergency-situations>, <https://unece.org/sites/default/files/2023-07/Executive%20summary%20ENG.pdf>
- [10] Brown, R.M., McClelland, N.J., Deining, R.A. & O'Connor, M.F. (1972). A Water Quality Index—Crossing the Psychological Barrier. *Proceedings of the International Conference on Water Pollution Research, Jerusalem*
- [11] Krishnan, J.S., Rambabu R.K. & C. Rambabu. (1995). Studies on water quality parameters of bore waters of Reddigudum Mandal. *Indian Journal of Environmental Ecoplanning*, 16 (2), 91-98

## Су сапасының индексінің арифметикалық әдісі арқылы Сырдарияның төменгі ағыс бөлігіндегі су сапасының жай-күйін бағалау

Ф.Салехи<sup>1,2\*</sup>, М.Д. Кусаинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Herat University, Герат, Ауғанстан

\*Корреспонденция үшін автор: [fahimehsalehi1219@gmail.com](mailto:fahimehsalehi1219@gmail.com)

**Андатпа.** Бұл зерттеу жұмысының негізгі мақсаты өнеркәсіптік (химиялық құрамдас бөліктер) және ауылшаруашылық (пестицидтер қалдықтары) әрекеттерінің Сырдарияға әсерін бағалау болып табылады. Бұл зерттеудің келесі нақты мақсаттары бар: 1. Сырдария суының қазіргі жағдайына баға беріңіз; 2. Сырдарияның (Қазақстан) төменгі ағыс бөлігіндегі ауылшаруашылық және өнеркәсіп қызметін зерттеу. Бұл зерттеуде біз Сырдарияның төменгі ағыс бөлігіндегі су сапасының ағымдағы жағдайын Су сапасының индексі (WQI) арифметикалық әдісі арқылы бағалауды мақсат еттік. Зерттеу металл және металл емес химиялық құрамдастарды, PH, TDS, басқа минералдар және пестицидтердің қалдықтарын қоса алғанда, судың ластануына өнеркәсіптік және ауылшаруашылық қызметінің әсеріне ерекше назар аударады. Бұл зерттеудің маңыздылығы су сапасының классификациясы мен ластаушы заттардың (өнеркәсіптік және ауылшаруашылық қызметі) Сырдарияға ықтимал әсерінің қазіргі заманғы бағалауларының болмауында. Әдебиеттерге шолу өнеркәсіптер мен ауылшаруашылық қызметіне байланысты өзеннің ластануының жоғары деңгейін көрсетеді. Ағыстың жоғарғы жағындағы елдер де, төменгі ағыстағы елдер де ластануға үлес қосады, жоғарыдағы елдер пестицидтерді қосады, ал төменгі ағындағы елдер өнеркәсіптік әрекеттер арқылы суды ластайды. Зерттеу аймақтағы судың ластануы мен су сапасының көрсеткіштері бойынша бар зерттеулерден қайталама деректерді жинауды қамтиды. Әдістеме судың сапасын көрсететін жалпы индекс нөмірін беретін Салмаланған арифметикалық индекс әдісін пайдаланып WQI есептеуді қамтиды. Бұл зерттеу Сырдария өзені бассейніндегі судың ластануын түсіну және басқару үшін маңызды.

**Негізгі сөздер:** су сапасын бағалау, WQI, су сапасының индексі, арифметикалық әдіс, металдық және металл емес химиялық қосылыстар, судың ластануы, пайдалы қазбалардың концентрациясы, су сапасы индексінің басым көрсеткіші.

## Оценка состояния качества воды в потоке Сырдарьи с использованием арифметического метода индекса качества воды

Ф.Салехи<sup>1,2\*</sup>, М.Д. Кусаинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Herat University, Герат, Афганистан

\*Автор для корреспонденции: [fahimehsalehi1219@gmail.com](mailto:fahimehsalehi1219@gmail.com)

**Аннотация.** Основной целью данного исследования является оценка воздействия промышленной (химические компоненты) и сельскохозяйственной (остатки пестицидов) деятельности на Сырдарью. Данное исследование преследует следующие конкретные цели: 1. Оценить текущее состояние качества воды Сырдарьи; 2. Изучение сельскохозяйственной и промышленной деятельности в нижнем течении Сырдарьи (Казахстан). В данном исследовании мы стремились оценить текущее состояние качества воды в нижнем течении Сырдарьи, используя арифметический метод

индекса качества воды (ИКВ). В исследовании особое внимание уделяется влиянию промышленной и сельскохозяйственной деятельности на загрязнение воды, включая металлические и неметаллические химические компоненты, pH, TDS, другие минералы и остатки пестицидов. Важность этого исследования заключается в отсутствии современных оценок классификации качества воды и потенциального воздействия загрязняющих веществ (промышленная и сельскохозяйственная деятельность) на Сырдарью. В обзоре литературы подчеркивается высокий уровень загрязнения реки в результате промышленной и сельскохозяйственной деятельности. Страны верхнего и нижнего течения вносят свой вклад в загрязнение: страны верхнего течения добавляют пестициды, а страны нижнего течения загрязняют воду в результате промышленной деятельности. Исследование будет включать сбор вторичных данных из существующих исследований по загрязнению воды и показателям качества воды в регионе. Методика включает расчет WQI с использованием метода взвешенного арифметического индекса, который дает общее число индексов, отражающее качество воды. Это исследование важно для понимания и управления загрязнением воды в бассейне реки Сырдарья.

**Ключевые слова:** оценка качества воды, *WQI*, индекс качества воды, арифметический метод, химические соединения, загрязнение воды, концентрация минералов, индекса качества воды.

Received: 10 October 2023

Accepted: 16 December 2023

Available online: 31 December 2023

## CONTENTS

<i>Askarova G.E., Begalinov A.B., Shautenov M.R., Amantaiuly K.</i> STUDY OF GOLD-BEARING ORES USING GRAVITY ENRICHMENT METHODS.....	5
<i>Uteyeva R., Shevko V., Aitkulov D., Badikova A., Tleuova S.</i> ELECTRIC SMELTING OF PHOSPHORITES WITH PRODUCTION OF A FERROALLOY, CALCIUM CARBIDE AND SUBLIMATION OF PHOSPHORUS.....	11
<i>Kelamanov B., Yessengaliyev D., Sariyev O., Nurzhanov A.</i> THERMODYNAMIC MODELING OF THE PROCESS OF REDUCTION OF NICKEL AND IRON BY A SILICOTHERMAL PROCESS.....	18
<i>Berkinbayeva A.S., Sabitkyzy B., Sembek K.M.</i> ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AND NATURAL-CLIMATIC, GEOECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF URANIUM MINING ENTERPRISES OF KARATAU LLP .....	25
<i>Salehi F., Kussainova M.</i> ASSESSMENT OF THE WATER QUALITY STATE IN THE DOWNSTREAM PORTION OF SYR-DARYA USING THE WATER QUALITY INDEX ARITHMETIC METHOD.....	30

## МАЗМҰНЫ

<i>Аскарова Г.Е., Бегалинов А.Б., Шауменов М.Р., Амантайұлы К.</i> АЛТЫН ҚҰРАМДЫ КЕНДЕРДІ ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ БАЙЫТУ ӘДІСТЕРІМЕН ЗЕРТТЕУ	5
<i>Утеуова Р., Шевко В., Айтқұлов Д., Бадикова А., Тлеуова С.</i> ФЕРРОҚОРЫТПАЛАР, КАЛЬЦИЙ КАРБИДІ ЖӘНЕ ФОСФОРДЫҢ СУБЛИМАЦИЯСЫ ӨНДІРІСІМЕН ФОСФОРИТТЕРДІҢ ЭЛЕКТРЛІК БАЛҚУЫ.....	11
<i>Келаманов Б.С., Есенғалиев Д.А., Сариев О.Р., Нуржанов А.А.</i> ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ АРҚЫЛЫ НИКЕЛЬ МЕН ТЕМІРДІ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРУДЫҢ СИЛИКОТЕРМИЯЛЫҚ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ.....	18
<i>Беркинбаева А.С., Сәбитқызы Б., Сембек К.М.</i> УРАН ӨНДІРУШІ «КАРТАУ» ЖШС КӘСІПОРЫНЫНЫҢ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ТАБИҒИ-КЛИМАТТЫҚ, ГЕОЭКОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ.....	25
<i>Салехи Ф., Кусаинова М.Д.</i> СУ САПАСЫНЫҢ ИНДЕКСІНІҢ АРИФМЕТИКАЛЫҚ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ СЫРДАРІЯНЫҢ ТӨМЕНГІ АҒЫС БӨЛІГІНДЕГІ СУ САПАСЫНЫҢ ЖАЙ-КҮЙІН БАҒАЛАУ.....	30

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Аскарова Г.Е., Бегалинов А.Б., Шауменов М.Р., Амантайұлы К.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД МЕТОДАМИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ.....	5
<i>Утеуова Р., Шевко В., Айтқұлов Д., Бадикова А., Тлеуова С.</i> ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПЛАВЛЕНИЕ ФОСФОРИТОВ С ПРОИЗВОДСТВОМ ФЕРРОСПЛАВА, КАРБИДА КАЛЬЦИЯ И СУБЛИМАЦИЕЙ ФОСФОРА.....	11
<i>Келаманов Б.С., Есенғалиев Д.А., Сариев О.Р., Нуржанов А.А.</i> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА СИЛИКОТЕРМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ.....	18
<i>Беркинбаева А.С., Сәбитқызы Б., Сембек К.М.</i> ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ПРИРОДНО- КЛИМАТИЧЕСКИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТОО «КАРТАУ».....	25
<i>Салехи Ф., Кусаинова М.Д.</i> ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ПОТОКЕ СЫРДАРЬИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АРИФМЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОДЫ....	30

***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

© КазНИТУ имени К.И. Сатпаева, 2023