



ӨОЖ 504.064:504.5:622.7:005.52:519.876

FTAXP 87.15.00; 87.33.37; 06.81.12; 28.23.15

DOI 10.37238/2960-1371.2960-138X.2026.102(2).53

**Донаев А.Е., Колесников А.С.*, Кенжибаева Г.С.*, Мамитова А.Д.,
Куракбаева С.Д., Колесников О.Г., Гаппаров Ж.У., Колесникова В.А.,
Жумагалиев И.К.**

**М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті,
Шымкент, Қазақстан,**

***Корреспондент-авторы:** kas164@yandex.kz, gulmira3009@mail.ru

E-mail: aigali.1993@mail.ru, kas164@yandex.kz, gulmira3009@mail.ru, a-
mamitova@mail.ru, sevam@mail.ru, ogkolesnikova@yandex.kz,
zhakengapparov.94@mail.ru, vak0602@yandex.ru. issatay80@mail.ru

БАЯЛДЫР ҚАЛДЫҚ ҚОЙМАСЫНА ЖИНАЛҒАН, ТҮСТІ МЕТАЛЛ КЕНДЕРІН БАЙЫТУЫНАН ҚАЛҒАН ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРІНІҢ ТӘУЕКЕЛДЕРІН БАСҚАРУДЫ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа. Мақалада Баялдыр қалдық қоймасында (Кентау қ. және Баялдыр кентіне жақын, Түркістан облысы, Қазақстан) жиналған түсті металдар кендерін байыту қалдықтарының өңірдің қоршаған ортасына әсері кезіндегі тәуекелдерді басқаруды жүйелі талдау және модельдеу нәтижелері келтірілген. Қалдықтардың химиялық және фазалық құрамы (мырыш мөлшері ~3.77%, қорғасын ~4.47%, кремний диоксиді 54.06%) туралы мәліметтер негізінде «оқиғалар ағашының» абстракттілі моделі құрылып, қоршаған орта компоненттерінің тозу қаупіне сапалық және сандық талдау жүргізілді. Бастапқы оқиғалардың минималды өткізу және кесу комбинациясы анықталды, негізгі оқиғаның ықтималдығын екі жолмен сандық бағалау жүргізілді (кезең-кезеңмен есептеу және минималды өткізу комбинация әдісі). Қоршаған ортаның кешенді ластану ықтималдығы 78.15% құрайтыны анықталып, қоршаған ортаға қатысты қауіптің критикалық деңгейін көрсетті. Шаң басудың аралас әдісі (пульсациялық желдетумен ұсақ дисперсті гидро суару) және түсті металдарды ілеспе алу арқылы құрылыс материалдарын өндіруде байыту қалдықтарын кешенді қайта өңдеу технологиясын қамтитын тәуекелдерді азайту бойынша ұсыныстар әзірленді.

Кілт сөздер: байыту қалдықтары; түсті металдар; жүйелік талдау; «оқиға ағашы»; тәуекелдерді басқару; құрылыс материалдары; экологиялық қауіпсіздік, қоршаған ортаны қорғау.

Kіріспе

Түсті металдардың кендерін қайта өңдеу, ұсақ дисперсті қалдықтардың – қалдық қоймаларында жиналатын және қоршаған ортаға кешенді теріс әсер ететін байыту қалдықтарының едәуір көлемінің пайда болуымен қатар жүреді [1-3]. Ауыр металдардың (қорғасын, мырыш, мыс) және сульфидті минералдардың қалдықтық концентрацияларын қамтитын қалдықтар атмосфералық ауа мен сумен жанасқанда қышқылдық дренажды ағындар тудырады, сондықтан олар ерекше экологиялық қауіп төндіреді [4-6].

Қазақстан Республикасының Түркістан облысының аумағында, Кентау қаласының ауданында Баялдыр қалдық қоймасы – Кентау байыту фабрикасының



(бұрын Ашысай полиметалл комбинатының құрамына кірген) қалдықтарын жинақтау нысаны орналасқан. Зауыт 1965 жылы Мирғалымсай, Қарағайлы, Жәйрем кен орындары мен Шалқия кен орындарының полиметалл кендерін байыту үшін пайдалануға берілді [7]. 2008 жылы зауыт жұмысын тоқтатты, бірақ қалдық қоймасы аймақтың техногендік ластану көзі болып қала берді [1, 7].

Ғылыми зерттеулер шеңберінде жүргізілген рентгендік-фазалық және рентгендік-спектрлік талдаулардың деректері бойынша [1], Баялдыр қалдық қоймасының қалдықтары [1], (1, 2-кестелер) келтірілген келесі құраммен сипатталады. Ұсынылған деректерден көрініп тұрғандай, қалдықтар мырыш қосылыстарының (металл бойынша жиынтығы ~3,77%) және қорғасынның (жиынтығы ~4,47%) маңызды концентрацияларының, сондай-ақ кремний диоксидінің (54,06%), алюминий оксиді (11,02 %) және кальций оксиді (7,78 %) көп мөлшерін қамтиды, бұл оларды бағалы металдарды алғаннан кейін құрылыс индустриясы үшін ықтимал екінші реттік шикізат көзіне айналдырады [1, 8].

Мәселе қалдық қоймасының бетінің шаңдануымен қиындайды – үгілу үрдісі және тасымалдау кезінде дисперсиясы жұқа шаң пайда болады (бөлшектердің дисперсиялық мөлшері 1-40 мкм), ол желмен айтарлықтай қашықтыққа тасымалданады, атмосфералық ауаны, топырақты және су нысандырын ластайды [1, 4, 5].

Зерттеудің өзектілігі мәселені кешенді шешу қажеттілігіне байланысты: бір жағынан - экологиялық тәуекелдерді азайту үшін тиімді шаң басу, екінші жағынан - айналымдық экономика қағидаттары шеңберінде қалдықтарды қайталама шикізат ретінде қайта өңдеу технологияларын әзірлеу [8, 9].

Осы мақаланың мақсаты – Баялдыр қалдық қоймасының түсті металл кеніштерінен шыққан байыту қалдықтардың «оқиға ағашы» әдістемесі арқылы өңірге экологиялық әсерін басқару тәуекелдерін жүйелі талдау және модельдеу, экологиялық қауіп-қатерлердің жүзеге асу ықтималдықтарын анықтап тәуекелдерді азайту жөніндегі ұсыныстарды әзірлеу.

Материалдар мен әдістер

1. Зерттеу тақырыбы мен әдістері

1.1. Зерттеу нысанының сипаттамалары

Зерттеу нысаны - Баялдыр қалдық қоймасында (Кентау қаласы мен Баялдыр кенті маңында, Түркістан облысы, Қазақстан) жинақталған полиметалл кендерін байыту қалдықтары (1 сурет). Қалдық қоймасы 1965 жылдан 2008 жылға дейін жұмыс істеген Кентау байыту фабрикасының техногендік мұрасының бөлігі болып табылады [1, 7]. 2025 жылғы деректерге сәйкес, қалдықтар бассейнінде судың сіңуін болдырмау және шаңды бақылау жөніндегі толыққанды жүйе жоқ, бұл айналадағы аумақтарға тұрақты экологиялық қауіп төндіреді [1, 4].



Сурет 1 – Баялдыр қалдық қоймасының жалпы көрінісі

Деректерге сәйкес қалдықтардың физика-химиялық сипаттамалары [1]:

- бөлшектердің дисперсиялық мөлшері: 1-40 мкм (негізгі масса);
- жалпы мырыш қосылыстарының мөлшері: ~3.77%;
- жалпы қорғасын қосылыстарының мөлшері: ~4.47%;
- кремний диоксидінің мөлшері (SiO_2): 54.06%;
- алюминий оксидінің мөлшері (Al_2O_3): 11.02%;
- кальций оксидінің мөлшері (CaO): 7.78%;
- сульфидтегі күкірт мөлшері: ~5–6%.

1.2. Зерттеу әдістемесі

Тәуекелдерді жүйелік талдауды жүргізу үшін «оқиға ағашы» әдістемесі (Fault Tree Analysis – FTA) қолданылды, ол негізгі жағымсыз оқиғаға әкелетін бастапқы оқиғалардың комбинацияларын анықтауға мүмкіндік беретін жүйелік талдаудың дедуктивті әдісі болып табылады [10, 11]. Әдіс Буль алгебрасы мен ықтималдық теориясына негізделген және қамтиды:

- **сапалық талдау** – минималды өткізу комбинациясын (МӨК) және минималды кесу комбинациясын (МКК) анықтау;
- **сандық талдау** – негізгі оқиғаны (G) іске асыру ықтималдығын екі жолмен бағалау: кезең-кезеңмен есептеу және минималды өткізу комбинациясы әдісінде қосу-алып тастау формуласын қолдану, [12, 13].

Ағаш құруда қолданылатын логикалық шұралар:

- **НЕМЕСЕ** – егер кіріс оқиғаларының кем дегенде біреуі орын алса, оқиға орын алады;
- **ЖӘНЕ** – егер барлық кіріс оқиғалары орын алса, оқиға орын алады [10, 14].

Зерттеу нәтижелері

«Оқиға ағашының» сапалық талдауы. «Оқиға ағашын» құру.

«Оқиға ағашы» Баялдыр қалдық қоймасында түсті металл кендерін байыту қалдықтарының жиналуы өңірдің қоршаған ортасына елеулі теріс әсер ететін оқиғаны талдау үшін құрылған. Назар әртүрлі ықпал арналары арасындағы логикалық байланыстарға аударылды [12, 15].

1 деңгей: Негізгі оқиға (ағаштың жоғарғы жағы) G: Аймақтың қоршаған ортасын ауыр металдармен (қорғасын, мырыш) және қышқыл дренажды ағындармен кешенді ластау. Логикалық шұра: НЕМЕСЕ

2 деңгей: Аралық алғышарттар. Қалдықтардың қоршаған ортаға әсер етуінің негізгі жолдары [4, 5]:



I1: Гидросфераның (жер асты және жер үсті суларының) ластануы. Логикалық шұра: НЕМЕСЕ

I2: Жер жамылғысының ластануы және жерлердің деградациясы. Логикалық шұра: НЕМЕСЕ

I3: Атмосфералық ауаның настануы. Логикалық шұра: НЕМЕСЕ

I4: Биоаккумуляция және адам денсаулығына әсері. Логикалық шұра: НЕМЕСЕ

3 деңгей: Бастапқы оқиғалар-алғышарттар. Әрбір әрекет бағытын жүзеге асыруға әкелетін негізгі, бөлінбейтін себепші-оқиғалар [1, 4, 6].

Аралық алғышарт үшін I1 (Гидросфераның ластануы):

A: Қышқыл дренажды сулардың ($pH < 4$, құрамында Pb^{2+} , Zn^{2+}) жер асты суларына фильтрациялануы;

B: Атмосфералық жауын-шашын әсерінен сульфидті минералдардан (FeS_2 , PbS , ZnS) ауыр металдардың сілтісізденуі;

C: Қалдық қоймасындағы фильтрацияға қарсы экранның болмауы немесе бұзылуы.

Аралық алғышарт үшін I2 (Топырақтардың ластануы):

D: Ұсақ дисперсті қалдықтардың ($d = 1-40$ мкм) іргелес аумақтарға желмен тасымалдануы;

E: Топырақта ауыр металдардың жиналуы (құнарлылықтың төмендеуі, қышқылдану, уыттану);

F: Қалдықтардың механикалық қозғалысы (көлік, жануарлар, адамдар) [1, 4].

Аралық алғышарт үшін I3 (Атмосфераның ластануы):

H: Қалдық қоймасының бекітілмеген бетінен шаңдануы (негізгі фактор);

K: Техногендік әсерлер кезінде қайталама шаң түзілуі (жел, көлік);

L: Сульфидті минералдардан газ тәрізді күкірт қосылыстарының (SO_2 , H_2S) бөлінуі [1, 5].

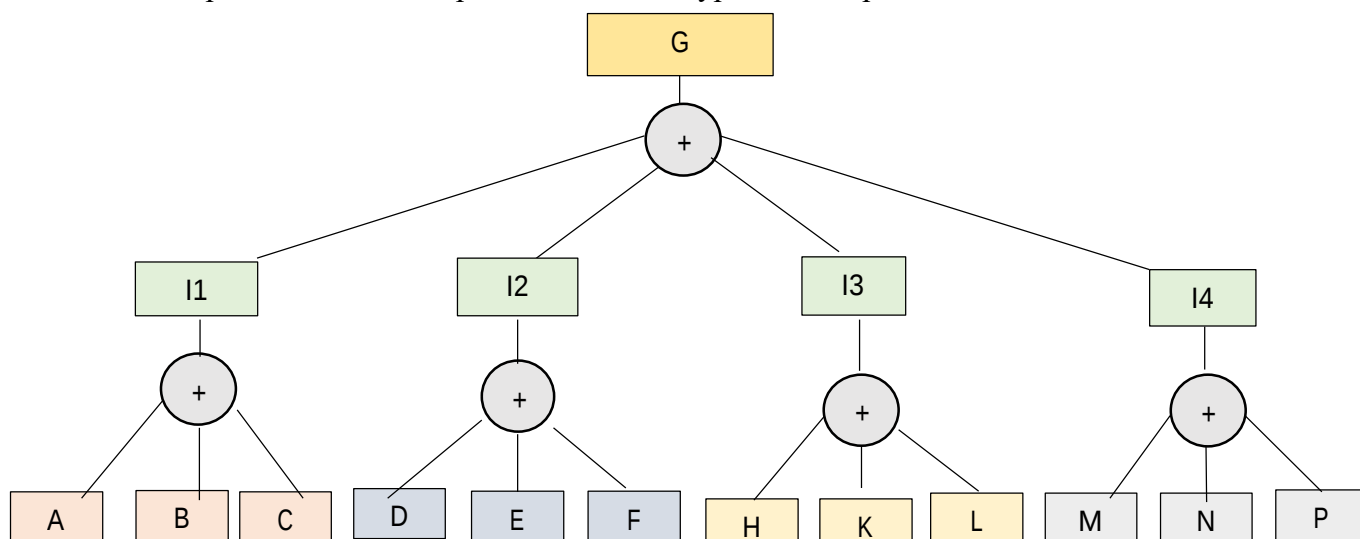
Аралық алғышарт үшін I4 (Биоаккумуляция және адам денсаулығы):

M: Өсімдіктердің тамыр жүйесі арқылы ауыр металдарды (Pb , Zn , Cd) сіңіруі;

N: Адам организміне (құрамында PbS , ZnS , SiO_2 бар) шаңның ингаляциялық жолмен (тыныс алу арқылы) түсуі;

P: Токсиканттардың ластанған су және қоректік тізбектер арқылы түсуі. [4, 6].

«Оқиғалар ағашының» абстрактілі моделі 1-суретте келтірілген



1 Сурет – Баялдық қалдық қоймасында жиналған байытудан қалған қалдықтардың аймақтың қоршаған ортасына жағымсыз әсерінің «оқиғалар ағашы» арқылы абстрактілі модельдеу

Минималды өткізу комбинациясын (МӨК) анықтау. МӨК – бұл бір уақытта болған кезде негізгі оқиғаға әкелуге кепілдік беретін бастапқы оқиғалардың минималды жиынтығы. Құрылған ағашта барлық шұралар – НЕМЕСЕ, сондықтан әрбір кіріс оқиғасы МӨК болып табылады. [10, 13]:

$$\text{МӨК: } \{A\}, \{B\}, \{C\}, \{D\}, \{E\}, \{F\}, \{H\}, \{K\}, \{L\}, \{M\}, \{N\}, \{P\} \quad (1)$$

Бұдан шығатыны, жүйенің жоғары осалдығы анықталды. Экологиялық зиянның туындауы үшін қарастырылған он екі сценарийдің кез келген біреуінің жүзеге асуы жеткілікті. Жүйенің сенімділігі (қоршаған ортаны сақтау) осы элементтердің әрқайсысының сенімділігімен анықталады [12, 14].

Минималды кесу комбинациясын (МКК) анықтау. МКК – бұл негізгі оқиғаның алдын алуға кепілдік беретін бастапқы оқиғалардың минималды жиынтығы. НЕМЕСЕ – шұралары бар ағаш үшін немесе барлық деңгейлерде МКК бір оқиғадан тұрады – барлық бастапқы оқиғалардың бір уақытта алдын алу [11, 15]:

$$\text{МКК: } \{A, B, C, D, E, F, H, K, L, M, N, P\} \quad (2)$$

Бұл қоршаған ортаның деградациясының алдын алу үшін барлық ықтимал теріс әсер ету жолдарын толығымен алып тастау керек дегенді білдіреді. Бұл жүйені барлық қауіп факторларын жан жақты және қымбат бақылау жағдайында ғана экологиялық қауіпсіз етеді. Іс жүзінде бұл табиғатты қорғаудың көп деңгейлі жүйесін құру қажеттілігін көрсетеді: фильтрацияға қарсы экрандар, шаңды басу жүйелері, дренажды суларды жинау және тазарту, қалпына келтіру [4, 5, 8].

«Оқиғалар ағашының» сандық талдауы. Сапалық талдау негізінде Баялдыр қалдық қоймасының қалдықтары әсер еткен кезде өңірдің қоршаған ортасының құрамдас бөліктерінің тозуының «оқиғалар ағашына» сандық талдауды қолданып 2 әдіспен жүргізіледі: кезең-кезеңмен есептеу және минималды өткізу комбинациясы әдісінде қосу-алып тастау формуласын қолданып, минималды өткізу комбинациясын (МӨК) пайдалана отырып есептеу [10, 12].

Бастапқы оқиғалардың ықтималдығы экологиялық мониторинг деректерін ескере отырып, сараптамалық бағалау негізінде беріледі [1, 4, 5] және ұқсас нысандарды талдау 1-кестеде келтірілген.

1 кесте – Бастапқы оқиғалардың ықтималдығы экологиялық мониторинг деректерін ескере отырып, сараптамалық бағалау негізінде беріледі [1, 4, 5] және ұқсас нысандарды талдау [6].

Оқиға	Сипаттама	Ықтималдығы
A	Қышқыл дренажды сулардың жер асты суларына фильтрациялануы	0.16
B	Сульфидті минералдардан ауыр металдардың сілтісізденуі	0.20
C	Фiltrацияға қарсы экранның болмауы/бұзылуы	0.12
D	Ұсақ дисперсті қалдықтардың желмен тасымалдануы	0.24
E	Ауыр металдардың топырақта жиналуы	0.14
F	Қалдықтардың механикалық қозғалуы	0.07
H	Бекітілмеген бетінен шаңдануы	0.26
K	Екіншілік шаң түзілуі	0.09
L	Сульфидті минералдардан газ тәрізді күкірт қосылыстарының бөлінуі	0.06
M	Өсімдіктердің ауыр металдарды сіңіріуі	0.12
N	Шаңның ингаляциялық жолмен (тыныс алу арқылы) енуі	0.15
P	Қоректік тізбектер арқылы түсуі	0.10



1 Әдіс. Негізгі оқиғаның ықтималдығын кезең-кезеңімен есептеу. НЕМЕСЕ шұрасына арналған формула:

$$P = 1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times \dots \times (1 - P) \quad [10, 13] \quad (3)$$

Аралық оқиғалардың ықтималдығын есептеу:

$$P(I_1) = 1 - (1 - 0.16) \times (1 - 0.20) \times (1 - 0.12) = 1 - (0.84 \times 0.80 \times 0.88) = 1 - 0.5914 = 0.4086 \quad (40.86\%);$$

$$P(I_2) = 1 - (1 - 0.24) \times (1 - 0.14) \times (1 - 0.07) = 1 - (0.76 \times 0.86 \times 0.93) = 1 - 0.6078 = 0.3922 \quad (39.22\%);$$

$$P(I_3) = 1 - (1 - 0.26) \times (1 - 0.09) \times (1 - 0.06) = 1 - (0.74 \times 0.91 \times 0.94) = 1 - 0.6325 = 0.3675 \quad (36.75\%);$$

$$P(I_4) = 1 - (1 - 0.12) \times (1 - 0.15) \times (1 - 0.10) = 1 - (0.88 \times 0.85 \times 0.90) = 1 - 0.6732 = 0.3268 \quad (32.68\%).$$

Негізгі оқиғаның ықтималдығын есептеу G:

$$P(G) = 1 - (1 - 0.4086) \times (1 - 0.3922) \times (1 - 0.3675) \times (1 - 0.3268)$$

$$P(G) = 1 - (0.5914 \times 0.6078 \times 0.6325 \times 0.6732) = 1 - 0.1531 = 0.8469 \quad (84.69\%)$$

2 Әдіс. Минималды өткізукомбинациясын (МӨК) қолданып есептеу.

МКК анықтау: {A}, {B}, {C}, {D}, {E}, {F}, {H}, {K}, {L}, {M}, {N}, {P}

Қосу-алып тастау формуласын қолдану [12, 14]:

$$P(G) = \sum P(i) - \sum \sum P(i)P(j) + \sum \sum \sum P(i)P(j)P(k) - \dots \quad (4)$$

Жеке МӨК ықтималдықтарының қосындысы:

$$S_1 = 0.16 + 0.20 + 0.12 + 0.24 + 0.14 + 0.07 + 0.26 + 0.09 + 0.06 + 0.12 + 0.15 + 0.10 = 1.71$$

Жұптық туындылардың сомасы (шамамен бағалау):

$$\text{Оқиғаның орташа ықтималдығы} = 1.71/12 \approx 0.1425$$

$$\text{Жұптар саны} = C(12, 2) = 66$$

$$S_2 \approx 66 \times (0.1425)^2 \approx 66 \times 0.02031 \approx 1.340$$

Үш есе көбейтулердің қосындысы:

$$\text{Үштік саны} = C(12, 3) = 220$$

$$S_3 \approx 220 \times (0.1425)^3 \approx 220 \times 0.002894 \approx 0.637$$

Төрт есе көбейтулердің қосындысы:

$$S_4 \approx 495 \times (0.1425)^4 \approx 495 \times 0.000412 \approx 0.204$$

Нақты есеп:

$$P(G) \approx S_1 - S_2 + S_3 - S_4 \approx 1.71 - 1.340 + 0.637 - 0.204 \approx 0.803 \quad (80.3\%)$$

Орын алмаған барлық оқиғалардың ықтималдықтарының көбейтіндісіне негізделген дәл есептеу:

$$P(G) = 1 - \prod (1 - P_i) = 1 - 0.1531 = 0.8469 \quad (84.69\%)$$

Нәтижелер мен есептеу әдісін салыстыру 2-кестеде келтірілген.

2 Кесте – Нәтижелер мен есептеу әдісін салыстыру

Есептеу әдісі	Нәтижесі
Кезеңдік есептеу (1 әдіс)	84.69%
Минималды өткізу комбинациясын (2 әдіс)	80.3–84.7%
Нақты есептеу	84.69%

2-кестеден көріп отырғанымыздай, әдістер арасындағы алшақтық шамамен 4.4% құрайды, бұл инженерлік есептеулер үшін қолайлы және жүргізілген талдаудың дұрыстығын растайды [11, 13].

Жүргізілген есептеулер негізінде нәтижелерге сыни талдау жүргіземіз [1, 4, 5]. Қоршаған ортаның тозу ықтималдығы 84.69% құрайды – бұл Баялдыр қалдық қоймасының қалдықтарының экологиялық қауіпті екендігін айғақтайтын өте жоғары көрсеткіш. Ашық аспан астындағы қалдықтарды сақтаудың қазіргі тәжірибесін ескере отырып, экологиялық апаттың ықтималдығы қабылдауға келмейтіндей жоғары.

Тәуекелге ең үлкен үлес қосатындар:

- Н: Бекітілмеген бетінен шаңдануы (26%);
- D: Ұсақ дисперсті қалдықтардың желмен тасымалдануы (24%);



- В: Сульфидті минералдардан ауыр металдардың сілтісізденуі (20%);
- А: Қышқыл дренажды сулардың жер асты суларына фильтрациялануы (16%);
- N: Шаңның ингаляциялық жолмен (тыныс алу арқылы) енуі (15%);
- I1: Гидросфераның ластануы (40.86%);
- I2: Топырақтың ластануы (39.22%).

Әсер етудің маңызды бағыттары:

- Гидросфераның ластануы ең қауіпті бағыт болып табылады (40,86%), бұл су ортасындағы Pb^{2+} және Zn^{2+} иондарының жоғары қозғалғыштығымен және сульфидтердің (FeS_2 , PbS , ZnS) тотығуы кезінде қышқылды дренажды сулардың түзілуімен негізделеді [1, 4].
- Топырақтың ластануы (39,22%) мен атмосфераның ластануы (36,75%) де жалпы тәуекелге айтарлықтай үлес қосады.

Тәуекелді азайту бойынша ұсыныстар:

- Ұсақ тұманды су шашуды (бүріккіш $d = 10$ мкм, қысымы $P = 5,4$ МПа) импульсті желдетумен (импульстеу жиілігі 13 Гц) үйлестіре отырып біріктірілген шаңды басу әдісін енгізу. Эксперименттік зерттеулерге сәйкес [1], бұл әдіс шаңды тұндыру уақытын дәстүрлі суарумен салыстырғанда ~30% - ға және табиғи тұндырумен салыстырғанда екі еседен астам қысқартады.
- Фильтрацияға қарсы экрандарды және дренаж суын жинау мен өңдеу жүйесін орнату [4, 5].
- Шаң басқан учаскелерді бекіте отырып, қалдық қоймасының бетін рекультивациялау.
- Жер асты және жер үсті суларын, топырақты және атмосфералық ауаны бақылау жүйесін құру.
- Қайталама шикізат ретінде байыту қалдықтарын қайта өңдеу әдісімен кешенді кәдеге жаратуды әзірлеу және енгізу.

Баялдыр қалдық қоймасының қалдықтарын кешенді кәдеге жарату перспективалары. Қалдықтардың химиялық және фазалық құрамы туралы мәліметтер негізінде (1, 2-кестелер) оларды қайта өңдеу әдісімен кешенді кәдеге жаратудың экономикалық орындылығы негізделген [1, 8].

1 Әдіс –бағалы металдарды алдын ала алу: мырыш (жиынтық құрамы ~3.77%) және қорғасын (жиынтық құрамы ~4.47%) алудың гидрометаллургиялық немесе пирометаллургиялық әдістері [1, 8]. Потенциалды әдістер: шаймалау, флотация, күйдіру. Бұл қосымша экономикалық әсер алуға және қалдық материалдың ұйыттылығын төмендетуге мүмкіндік береді.

2 Әдіс – түсті металдарды ілеспе алу арқылы құрылыс материалдарын өндіруде металл емес қалдықтарды пайдалану. Қалдықтардан металдарды шығарғаннан кейін негізінен кремний (SiO_2 – 54.06%), алюминий (Al_2O_3 – 11.02%) және кальций (CaO – 7.78%) оксидтерінен ұсынылған қайталама шикізат ретінде пайдаланылуы мүмкін [1, 8, 9]:

- клинкер өндіру кезінде цемент шикізатына қосылатын қоспалар. SiO_2 және Al_2O_3 жоғары мөлшері шикіқұрамның дәстүрлі сазды-құмды компоненттерін ішінара алмастыруға мүмкіндік береді;
- құрылыс керамикасын өндіруге арналған негізгі компонент (кірпіш, плитка);
- жол құрылысына және құрғақ құрылыс қоспаларын өндіруге арналған толтырғыштар.

Осылайша, шаңды басудың тиімді әдісі қалдықтарды қауіпсіз басқарудың алғашқы қажетті қадамы болып табылады. Оны іске асыру экологиялық мәселені (Баялдыр қалдық қоймасы) түсті металдарды алу және цемент клинкерін алу арқылы



біріккен күйдіру әдісімен кәдеге жаратылатын қайталама шикізат көзіне айналдыра отырып, қайта өңдеу әдісімен кәдеге жаратудың кейінгі үрдістерін ұйымдастыру үшін белгілі бір ғылыми-зерттеу негізін жасайды [1, 8, 9].

Қорытынды

Аймақтағы Баялдыр қалдық қоймасындағы түсті металл кенін өңдеуден қалған қалдықтардың экологиялық әсеріне қатысты тәуекелдерді басқаруды жүйелі талдау мен модельдеу нәтижесінде келесі қорытындылар жасауға болады:

- Баялдыр қалдық қоймасында (Кентау қ. және Баялдыр кентіне жақын, Түркістан облысы) жинақталған полиметалл кендерін байыту қалдықтары қорғасынның (~4.47%) және мырыштың (~3.77%) елеулі концентрациясы, сондай-ақ өңір үшін жоғары экологиялық қауіп тудыратын басқа да минералдар бар техногендік қалдықтар болып табылады [1, 4, 7];

- «оқиғалар ағашы» арқылы жүргізілген сапалы талдау жүйенің өте жоғары осалдығы бар екенін көрсетті – қарастырылған 12 сценарийдің кез келгенін іске асыру экологиялық залалдың туындауы үшін жеткілікті. Қоршаған ортаның деградациясының кепілді алдын алу теріс әсердің барлық жолдарын толығымен алып тастағанда ғана мүмкін болады [10, 12];

- екі тәсілмен орындалған сандық талдау (кезең-кезеңмен есептеу және минималды өткізу комбинациясы әдісі) қоршаған ортаның кешенді ластану ықтималдығы 84.69% - құрайтынын көрсетті, бұл экологиялық қауіптіліктің маңызды деңгейі болып табылады және шұғыл табиғатты қорғау шараларын қабылдауды талап етеді;

- тәуекелге ең үлкен үлес қосатыны анықталды: бекітілмеген бетінен шаңдануы (26%), ұсақ дисперсті қалдықтардың желмен тасымалдануы (24%), сульфидті минералдардан ауыр металдардың сілтісізденуі (20%) және қышқыл дренажды сулардың жер асты суларына фильтрациялануы (16%). Гидросфераның ластануы әсер етудің ең қауіпті бағыты болып табылады (40.86%) [1, 4, 5];

- тәуекелдерді азайту бойынша ұсынымдар әзірленді, соның ішінде: шаң басудың аралас әдісін енгізу (пульсациялық желдетумен ұсақ дисперсті гидро суару), фильтрацияға қарсы экрандарды орнату, қалдық қоймасының бетін қалпына келтіру, мониторинг жүйесін ұйымдастыру [1, 4];

- біріктірілген шаңды басу әдісінің жоғары тиімділігі эксперименталды түрде дәлелденді, шаңды тұндыру уақыты дәстүрлі суарумен салыстырғанда ~30% - ға және табиғи тұндырумен салыстырғанда екі еседен астам қысқарады [1];

- қайталама шикізат ретінде байыту қалдықтарын қайта өңдеу әдісімен кәдеге жарату тәсілінің перспективасы негізделген, құрылыс материалдарын (цемент клинкері, керамика, жол толтырғыштары) өндіруде кремний, алюминий және темір оксидтеріне бай металл емес қалдықтарды бір мезгілде пайдалана отырып, түсті металдарды (мырыш пен қорғасын) ілеспе алу. Бұл айналымдық экономика қағидаларын іске асыруға және өңірге экологиялық жүктемені айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді [1, 8, 9].

- Баялдыр қалдық қоймасы мәселесін шешу шаң басудың және/немесе қайта өңдеу әдісімен кәдеге жаратудың жаңа технологияларын енгізуді, Қазақстан Республикасының Экологиялық кодексіне [16, 17] сәйкес экологиялық бақылауды қатаңдатуды және мемлекет, бизнес және ғылыми қоғамдастық арасындағы белсенді өзара іс-қимылды қамтитын кешенді тәсілді талап етеді. Бұл мәселені уақтылы шешу экологиялық тәуекелдерді азайтуға және Түркістан облысының тұрақты дамуын



қамтамасыз етуге және өңір халқының тыныс-тіршілігінің сапасын арттыруға мүмкіндік береді.

Ризашылық

Авторлар «БҚУ хабаршысы» журналы арқылы ғылыми диалогқа жәрдемдескені үшін М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан университетіне ризашылық білдіреді

Қаржыландыру

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылым комитеті қаржыландырған (Грант № AP26198817).

REFERENCES

- [1] Donayev A.E., Filin A.E., Kolesnikov A.S., Kurnosov I.Yu., Tertychnaya S.V., Nazmi M.N., Mamitova A.D., Kolesnikova O.G. Research on air purification from pulverized large-tonnage tailings of non-ferrous metal ores and the possibility of their use as secondary raw materials. *Construction Materials and Products*. 2025. Vol. 8. No. 6. P. 1. DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-6-1.
- [2] Uter W., Werfel T., Lepoittevin J.-P., White I.R. Contact Allergy - Emerging Allergens and Public Health Impact. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. P. 2404. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072404>.
- [3] Kulikova A.A., Ovchinnikova T.I. A regional criterion for classifying mining regions as territories with the greatest exposure to geological changes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 1. P. 27-34.
- [4] Donayev A., Shapalov S., Sapargaliyeva B., Ivakhniyuk G. Studies of waste from the mining and metallurgical industry, with the determination of its impact on the life of the population. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2022. No. 4. P. 55-68.
- [5] Filin A.E., Kurnosov I.Yu., Tertychnaya S.V., Kolesnikova L.A. Assessment of the effect of pulsed ventilation on irrigation dust deposition in mining and processing production. *Ugol*. 2023. No. 11. P. 120-124. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-120-124.
- [6] Абильдаев Е.Б., Исаков Б.М. Оценка экологических рисков хвостохранилищ цветной металлургии в Казахстане. – Алматы: КазНУ им. аль-Фараби, 2020. – 312 с. ISBN 978-601-04-4590-0.
- [7] Кентауская обогатительная фабрика. Википедия (Украинская). URL: https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Кентауська_збагачувальна_фабрика (дата обращения: 21.01.2026).
- [8] Gapparov J., Syrlybekkyzy S., Filin A., Kolesnikov A., Zhatkanbayev Y. Overview of techniques and methods of processing the waste of stale clinkers of zinc production. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 4. P. 44-55. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_44.
- [9] Heidelberg Materials. Driving circularity and low-carbon solutions: Heidelberg Materials invests in clean-tech start-up EnviCore. October 9, 2024. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2024-10-09>.
- [10] IEC 61025:2006. Fault Tree Analysis (FTA). – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006. – 89 p.
- [11] Kim S.Y., Endharto A.J., Kim J.W. A Quantitative Risk Assessment for Public Commercial Unmanned Aerial Systems. *Journal of the Korean Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2021. Vol. 22. No. 9. P. 35-43. DOI: 10.5762/KAIS.2021.22.9.35.



- [12] ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. – Geneva: *International Organization for Standardization*, 2018. – 24 p.
- [13] Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. – Москва: Машиностроение, 1984. – 528 с.
- [14] Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. – Санкт-Петербург: Политехника, 2007. – 248 с.
- [15] Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования. – Новосибирск: Наука, 2015. – 432 с. ISBN 978-5-02-019161-7.
- [16] Экологический кодекс Республики Казахстан № 400-VI ЗРК от 2 января 2021 года (с изменениями и дополнениями по состоянию на 12.06.2025 г.). – Нур-Султан: Министерство юстиции РК, 2021. – 418 с.
- [17] Экологический кодекс Республики Казахстан (старая редакция). URL: https://prg.kz/references/document/?doc_id=38376826.
- [18] Filin A.E., Kurnosov I.Y., Kolesnikova L.A., Ovchinnikova T.I. Description of The Methodology for Conducting an Experiment on Dust Deposition of Mining and Metallurgical Production. *Ugol'*. 2022. No. 9. P. 67-72.
- [19] Kurnosov I.Y. Effect of operational parameters of spraying on dust suppression rate in roadways. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023. No. 3. P. 150-162. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_150.
- [20] Filin A.E., Tertychnaya S.V., Kurnosov I.Yu., Kolesnikova L.A. Mathematical modeling of mass transfer in colloidal systems. *Ugol*. 2023. No. 5. P. 72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76.

**Донаев А.Е., Колесников А.С., Кенжибаева Г.С., Мамитова А.Д., Куракбаева С.Д.,
Колесников О.Г., Гаппаров Ж.У., Колесникова В.А., Жумагалиев И.К.
МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЕМ РИСКАМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ТЕХНОГЕННОГО ОТХОДА – ХВОСТОВ ОТ ОБОГАЩЕНИЯ РУД ЦВЕТНЫХ
МЕТАЛЛОВ, СКЛАДИРОВАННЫХ НА БАЯЛДЫРСКОМ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ,
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ РЕГИОНА**

Аннотация. В статье представлены результаты системного анализа и моделирования управления рисками при воздействии хвостов обогащения руд цветных металлов, складированных на Баялдырском хвостохранилище (близ г. Кентау и пос. Баялдыр, Туркестанская область, Казахстан), на окружающую среду региона. На основе данных о химическом и фазовом составе хвостов (содержание цинка ~3.77%, свинца ~4.47%, диоксида кремния 54.06%) построена абстрактная модель «дерева происшествий», проведены качественный и количественный анализы риска деградации компонентов окружающей среды. Определены минимальные пропускные и отсечные сочетания исходных событий, выполнена количественная оценка вероятности главного события двумя способами (поэтапный расчет и метод минимальных пропускных сочетаний). Установлено, что вероятность комплексного загрязнения окружающей среды составляет 78.15%, что свидетельствует о критическом уровне экологической опасности. Разработаны рекомендации по снижению рисков, включающие комбинированный метод пылеподавления (мелкодисперсное гидроорошение с пульсирующей вентиляцией) и технологию комплексной переработки хвостов обогащения в производстве строительных материалов с попутным извлечением цветных металлов.

Ключевые слова: хвосты обогащения; цветные металлы; системный анализ; «дерево происшествий»; управление рисками; строительные материалы; экологическая безопасность, защита окружающей среды.



**Donayev A.E., Kolesnikov A.S., Kenzhibayeva G.S., Mamitova A.D., Kurakbaeva S.D.,
Kolesnikova O.G., Gapparov Zh.U., Kolesnikova V.A., Zhumagaliyev I.K.**
**RISK MANAGEMENT MODELING OF THE IMPACT OF MAN-MADE TAILINGS
FROM THE ENRICHMENT OF NON-FERROUS METAL ORES STORED AT THE
BAYALDYR TAILINGS STORAGE FACILITY ON THE ENVIRONMENT OF THE
REGION**

Annotation. The article presents the results of a systematic analysis and modeling of risk management regarding the impact of non-ferrous metal ore enrichment tailings, stored at the Bayaldyr tailings storage facility (near the city of Kentau and the village of Bayaldyr, Turkestan region, Kazakhstan), on the regional environment. Based on data regarding the chemical and phase composition of the tailings (zinc content ~3.77%, lead ~4.47%, silicon dioxide 54.06%), an abstract "fault tree" (incident tree) model was constructed, and qualitative and quantitative analyses of the risk of environmental component degradation were conducted. The minimum path sets and cut sets of initial events were determined, and a quantitative assessment of the probability of the top event was performed using two methods (step-by-step calculation and the minimum path sets method). It was established that the probability of complex environmental pollution is 78.15%, indicating a critical level of environmental hazard. Recommendations have been developed to mitigate risks, including a combined dust suppression method (fine-dispersed hydro-sprinkling with pulsating ventilation) and a technology for the integrated processing of enrichment tailings for the production of building materials with the associated extraction of non-ferrous metals.

Keywords: enrichment tailings; non-ferrous metals; systems analysis; fault tree; risk management; building materials; environmental safety; environmental protection.