Код МРНТИ 52.31.61

Г. Ю. Абдугалиева[1,2], А. О. Орсаринова[3], *С. О. Хусаинова[4,5], Т. Ж. Саукен[5]
[1] Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан),
[2]Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен істері институты (Алматы қ., Қазақстан),
[3]С. Аманжолав атындағы Шығыс Қазақстан университеті (Өскемен қ., Қазақстан),
[4]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы қ., Қазақстан),
[5]«Жоғары технологиялар институты» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

УРАНДЫ ЖЕРАСТЫ ҰҢҒЫМАЛЫҚ СІЛТІЛЕУ ӘДІСІМЕН ӨНДІРУ КЕЗІНДЕГІ АПАТТЫҚ ЖАҒДАЙЛАРДЫ СЦЕНАРИЙЛІК ТАЛДАУ

Аңдатпа. Жұмыста уранды жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндіру кезіндегі өнеркәсіптік қауіпсіздікке талдау жасалып, апаттық жағдайларды сценарийлік модельдеуге ерекше назар аударылды. Жүйелік талдау негізінде қауіпті өндірістік үдерістер мен инфрақұрылымның сыни факторлары айқындалды. Апаттық жағдайлардың себептерін, даму механизмдерін және олардың салдарын сипаттауға мүмкіндік беретін сценарийлік-бағдарланған әдіс қолданылды. Апаттық жағдайларды ықтималдылығы, салдарының ауырлығы, тәуекел деңгейі бойынша бағалау үшін сараптама негізінде тәуекелдер матрицасы құрастырылды. Ең жоғары қауіп төндіретін үдерістер ретінде ерітінділерді айдау-шығару және тасымалдау операциялары нақтыланды. Тәуекелдерді төмендету және қауіпсіздікті арттыру бойынша ұсыныстар берілді.
Түйінді сөздер: *уран өндіру, жер асты ұңғымалық сілтілеу, өнеркәсіптік қауіпсіздік, апат сценарийлері, тәуекелдерді бағалау, қауіпті үдерістер.*

Scenario analysis of accidents in uranium mining by in-situ leaching method

Abstract. This paper presents an analysis of industrial safety in uranium mining using the in-situ leaching method, with a focus on scenario-based modeling of accident situations. Based on a systems approach, key hazardous production processes and critical infrastructure elements are identified. A scenario-oriented method is applied, enabling the description of the causes, development mechanisms, and consequences of accidents. A risk matrix is developed using expert judgment to classify hazards according to their likelihood and severity of consequences. It is established that the most hazardous processes are solution injection and transportation operations. Measures aimed at risk reduction and safety enhancement are proposed.
Keywords: *uranium mining, in-situ leaching, industrial safety, accident scenarios, risk assessment, hazardous processes.*

Сценарный анализ аварийных ситуаций при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания

Аннотация. В работе представлен анализ промышленной безопасности при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания с акцентом на сценарное моделирование аварийных ситуаций. На основе системного подхода идентифицированы ключевые опасные производственные процессы и критические факторы инфраструктуры. Применен сценарно-ориентированный метод, позволяющий описать причины, механизмы развития аварий и их последствия. Составлена матрица риска с использованием экспертных оценок для классификации опасностей по вероятности и тяжести последствий. Установлено, что наиболее опасными являются процессы закачки-откачки и транспортировки растворов. Предложены меры по снижению рисков и повышению безопасности.
Ключевые слова: *добыча урана, подземное скважинное выщелачивание, промышленная безопасность, сценарии аварий, оценка риска, опасные процессы.*

Кіріспе

Жер асты ұңғымалық сілтілеу (ЖҰС) әдісі қолайлы гидрогеологиялық жағдайлары бар елдерде, соның ішінде Қазақстанда, уран өндірудің басым тәсілі болып табылады. Аталған технология өнімді қабатқа сілтілеуші ерітінділерді енгізу және кейіннен уранқұрамды ерітіндіні жер бетіне шығарып алу қағидатына негізделген [1, 2].

Өнеркәсіптік қауіпсіздік тұрғысынан ЖҰС пайдалы қазбаларды шахталық өндіру әдісімен салыстырғанда неғұрлым қауіпсіз болып саналады, себебі:

- *тау-кен қазбалары және оларға байланысты опырылулар болмайды;*
- *шаң түзілуі мен аэрозольдердің пайда болуы төмендейді;*
- *жұмысшылардың кенмен тікелей жанасуы барынша азаяды [3, 4].*

Алайда қазіргі зерттеулер қауіпті өндірістік факторлардың сақталатынын және олардың химиялық, радиациялық және гидрогеологиялық үдерістермен байланысты өзіндік ерекшеліктері бар екенін көрсетеді [5, 6, 7].

Осыған байланысты, зерттеудің мақсаты уранды жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндіру кезіндегі өнеркәсіптік қауіпсіздікті талдауда сценарийлік-бағдарланған әдістемені қолдану арқылы ықтимал апаттық жағдайлардың дамуының себеп-салдарлық байланыстарын анықтау болып табылады. Бұл әдістің тәуекелдерді бағалаудың дәстүрлі әдістерінен айырмашылығы — апаттардың даму динамикасын және олардың технологиялық үдерістерде каскадты түрде таралу мүмкіндігін ескереді.

Зерттеу әдістері

ЖҰС әдісімен уран өндіретін кәсіпорындардағы басым тәуекелдерді анықтауда қауіпті өндірістік факторларды бағалаудың жүйелік талдауы тиімді болып табылады [8, 9]. Жүйелік талдау уран өндіруші кәсіпорынды геологиялық орта, технологиялық үдерістер, жабдықтар, персонал және қоршаған орта компоненттерін қамтитын интеграцияланған өндірістік-технологиялық жүйе ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісін қолданатын уран кеніштерінің қауіпті өндірістік объектілерге жататынын ескере отырып [10, 11, 12], уран өндірудегі қауіпті үдерістерді сәйкестендіру үшін ЖҰС технологиялық циклінің келесі негізгі үдерістері қарастырылды [7]:

- *ұңғымаларды бұрғылау және жабдықтау;*
- *сілтілеуші ерітінділерді айдау және тасымалдау;*
- *өнімді ерітінділерді шығару және тасымалдау;*
- *сорбция-десорбция үдерістері;*
- *күкірт қышқылын сақтау және онымен жұмыс істеу;*
- *жанар-жағармай материалдарымен жұмыс істеу.*

МемСТ 12.0.003-74 бойынша қауіпті және зиянды өндірістік факторларды жіктеу негізінде уран кеніштерінде келесі қауіпті өндірістік факторлар сәйкестендірілді (1-кесте) [12].

1-кестеде келтірілген уран өндірудегі сәйкестірілген қауіпті өндірістік үдерістерді орындау барысында орын алатын апаттардың туындау ықтималдығын сипаттау үшін сценарийлік-бағдарланған әдістемені қолдану негізінде

Кесте 1

Уран кеніштеріндегі қауіпті үдерістер мен нысандарды сәйкестендіру

Table 1

Identification of hazardous processes and facilities at uranium mines

Таблица 1

Идентификация опасных процессов и объектов на урановых рудниках

№	Айқындалған қауіпті өндірістік үдерістер мен нысандар тізбесі	Қауіпті заттар мен факторлардың атауы	Үдерісті және нысанды қауіптілік тізбесіне енгізу туралы мәліметтер
1	Ұңғымаларды бұрғылау	Қауіпті жабдық: машиналар мен механизмдердің айналмалы және қозғалмалы бөліктері, жабдықтың құлау қаупі	Қауіпті технологиялық үдеріс
2	Қышқылды ерітінділерді қысыммен айдау және тасымалдау	0,07 МПа-дан жоғары қысымда жұмыс істейтін жабдықты пайдалану; күкірт қышқылы (жоғары белсенді сорбент)	Қауіпті технологиялық үдеріс, химиялық қауіпті зат
3	Өнімді ерітіндіні шығару және тасымалдау	Радиоактивті-химиялық қауіпті ерітінді (құрамында уран, радий, торий, мышьяк, ванадий және т.б.)	Қауіпті технологиялық үдеріс, химиялық қауіпті зат
4	Сорбциялық-экстракциялық үдерістер	Жоғары белсенді сорбенттер; қыздырылған ерітінділер; концентраттардың шығу қаупі	Радиациялық белсенділік; қауіпті технологиялық үдеріс, қауіпті зат
5	Күкірт қышқылын сақтау, тасымалдау және пайдалану	Күкірт қышқылы, улы аэрозольдер	Қауіпті технологиялық үдеріс, қауіпті зат
6	Жанар-жағармай (ЖЖМ) қоймасы	Жанғыш заттар мен жанар-жағармайды жеткізу, сақтау және пайдалану; жанармай құю колонкасы	Қауіпті технологиялық үдеріс, қауіпті жабдық

апаттардың себептерін, даму механизмдерін және олардың салдарын айқындау қажет. Әрбір апаттың сценарийі келесі элементтерді қамтиды:

- *себепші фактор;*
- *технологиялық параметрлердің ауытқуы;*
- *бақылау жүйелерінің істен шығуы;*
- *эскалация кезеңі;*
- *салдарлар.*

Айқындалған қауіпті өндірістік үдерістердегі ықтимал апаттарды (1-кесте) пайда болу ықтималдығы мен олардың салдарының ауырлығы бойынша бағалау сараптамалық әдіс арқылы тәуекелдер матрицасын жасау негізінде жүргізілді. Бұл матрицада қауіпті үдерістердегі ықтимал апаттық жағдайлар келесі критерийлермен бағаланды:

- *ықтималдылық (төмен, орташа, жоғары);*
- *салдардың ауырлығы (1–3);*
- *тәуекел деңгейі.*

Нәтижелер және талқылау

Айқындалған қауіпті өндірістік үдерістер мен нысандарға (1-кесте) сәйкес туындайтын ықтимал апаттық жағдайлар және олардың дамуының сценарийлерін қарастырылды:

1) Ұңғымаларды бұрғылау кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: қысым теңгерімінің бұзылуы, газдың (CO_2, радон) келуі, жабдықтың істен шығуы.

Сценарийдің дамуы: қысымның артуы немесе шығынның өзгеруі → автоматты қорғаныс жүйесінің істен шығуы → қабаттық флюидтердің келуі → ұңғыма сағасынан шығарындылардың орын алуы → жабдықтың зақымдануы және ықтимал тұтану.

Салдарлары: газдар мен сұйықтықтардың шығарындылары, персоналға әсері (жарақаттану), өрт қаупі.

2) Ерітінділерді қысыммен айдау кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: реттегіштің бітелуі немесе істен шығуы; коррозия, механикалық зақымдану және тозу салдарынан құбыр учаскесінің жарылуы; арматураның бұзылуы (жапқыштардың, қамыттардың ажырауы).

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: қысымның артуы → автоматтың істен шығуы → құбырдың жарылуы → қышқылдың төгілуі → топыраққа және жер асты суларына енуі.

Салдарлары: химиялық күйіктер, топырақтың деградациясы, жер асты суларының ластануы.

3) Өнімді ерітіндіні сорып шығару және тасымалдау кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: коррозия, механикалық зақымданулар.

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: сыртқа ағып кетудің пайда болуы → қысымның төмендеуі → ұзақ уақыт байқалмайтын ағып кету → радионуклидтердің жинақталуы → ластанған шлейфтің қалыптасуы.

Салдарлары:

- *сыртқы төгілу кезінде — аумақтың жергілікті ластануы;*
- *жерасты ағып кету кезінде — жерасты суларының ластануы;*

- үлкен көлемді шығарындылар кезінде — радионуклидтердің жинақталуы және дезактивация жүргізу қажеттілігі.

4) Сорбциялық-экстракциялық үдерістер кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар (радиациялық белсенділік)

Себепші фактор — колонналардың бітелуі.

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: қысымның артуы → жабдықтың бұзылуы → концентрацияланған ерітіндінің шығарындылары → жергілікті ластану.

Салдарлары: радиациялық әсердің артуы, жұмыс аймағының ластануы.

5) Күкірт қышқылын сақтау және пайдалану кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: коррозия, оператор қателігі.

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: резервуардың герметикалығының бұзылуы немесе артық толуы→ қышқылдың төгілуі → аэрозольдердің түзілуі → ластанудың таралуы.

Салдарлары: химиялық күйіктер, ауаның ластануы, инфрақұрылымның зақымдануы.

6) Жанар-жағармай қоймаларында және жанармай құю станцияларындағы ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: жанар-жағармай материалдарын сақтау ережелерінің бұзылуы, жанармай құю кезінде ЖЖМ-нің жер бетіне төгілуі.

Апаттық жағдайдың даму сценарийі: қауіпсіздік ережелерін бұзу → жанармайдың төгілуі → тұтану → өрт.

Салдарлары: қайталама жарылыстар, термиялық күйіктер, материалдық шығын.

Жоғарыда қарастырылған ықтимал апаттардың туындауы мен дамуын ескере отырып, уранды ЖҰС әдісімен өндіру кезіндегі апаттық жағдайларды сценарийлік блок-схема түрінде көрсетуге болады (1-сурет).

Ұсынылған блок-схема (1-сурет) ЖҰС жүйелеріндегі апаттық жағдайлардың дамуының механизмін бейнелейді және болжаудың цифрлық модельдерін, сондай-ақ ерте ескерту жүйелерін әзірлеу үшін негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

1-суретте көрсетілген ЖҰС әдісімен уран өндіру кезіндегі негізгі ықтимал апаттық жағдайлардың сценарийлік талдауы олардың пайда болуының ең негізгі алғышарттарының туындауының келесідей басты себептерін анықтауға мүмкіндік береді:

- жабдықтар мен техникалық құрылғылардың істен шығуы және ақаулары;

- персоналдың қате әрекеттері.

Технологиялық жабдықтардың істен шығуы мен ақаулары келесі факторларға байланысты орын алады:

- жабдықты дұрыс пайдаланбау немесе оның ақаулы күйі;

- жабдықтың апаттық жұмыс режимі;

- техникалық қызмет көрсету (ТҚ) және жоспарлы-алдын алу жөндеу (ЖАЖ) кестелерінің сақталмауы;

- жабдықтың зауыттық ақаулары;

- коррозия, физикалық тозу немесе температуралық деформация;

- бақылау-өлшеу аспаптары мен автомат жүйелерінің ақаулары;



Сурет 1. Уранды жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндіру кезіндегі апаттардың даму сценарийінің блок-схемасы.
Figure 1. Flowchart of accident scenario development in uranium extraction by in-situ leaching.
Рис. 1. Блок-схема сценария развития аварий при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания.

- күкірт қышқылымен және жанар-жағармай материалдарымен жұмыс істеу кезінде жабдықтардың, құбырлардың және бекітпе арматураның герметикалығының бұзылуы.

Персоналдың қате әрекеттері келесі себептерге байланысты орын алады:

- операторлардың қателіктері (айдау параметрлерін дұрыс орнатпау (қысым, pH), желілерді шатастыру (айдау/шығару));

- қоршаған ортаны жеткіліксіз мониторингтік бақылау (әлсіз бақылау, кеш әрекет ету, жерасты сулары сапасын уақтылы бақыламау);

- радиациялық қауіпсіздік талаптарын бұзу (дозиметриялық бақылаудың толық жүргізілмеуі, экрандау немесе герметизацияның болмауы);

- қолданыстағы қауіпсіздік ережелерінің, технологиялық регламенттердің, нұсқаулықтар мен еңбекті қорғау, қауіпсіздік техникасы, техникалық пайдалану, өрт қауіпсіздігі бойынша нормативтік құжаттардың талаптарын сақтамау, олар жабдықтардың, қондырғылар мен механизмдердің қауіпсіз және апатсыз жұмысын реттейді;

- қауіпті өндірістерге, жабдықтар мен механизмдерге қызмет көрсетуге оқытылмаған, аттестатциядан өтпеген персоналды жіберу;

Кесте 2

Тәуекелдер матрицасы

Table 2

Risk Matrix

Таблица 2

Матрица риска

Үдеріс	Ықтималдылық*	Ауырлық*	Тәуекел деңгейі
Сілтілеу ерітінділерді айдау және тасымалдау (төгілу, ағып кету)	С	3	Жоғары
Өнімді ерітінділерді шығару және тасымалдау (төгілу, ағып кету)	С	3	Жоғары
Сорбциялық-экстракциялық үдерістер	Н/С	3	Орташа-жоғары
Күкірт қышқылын сақтау	С	2	Орташа
Ерітінділердің миграциясы	Н	3	Орташа-жоғары
Шкала: *Ықтималдылық: Н — төмен, С — орташа, В — жоғары *Ауырлық: 1 — төмен, 2 — орташа, 3 — жоғары			

- жабдықтарды жөндеу және демонтаждау бойынша регламенттердің бұзылуы (механикалық зақымданулар, дәнекерлеу-құрастыру жұмыстарының ақаулары);

- орындалатын функцияларға біліктіліктің сәйкес келмеуі, инженерлік-техникалық қызметкерлердің жеткіліксіз құзыреттілігі.

2-кестеде айқындалған қауіпті өндірістік үдерістердің сараптамалық бағалау әдісі негізінде құрастырылған тәуекелдер матрицасы келтірілген.

Тәуекелдер матрицасы (2-кесте) қауіпті технологиялық үдерістердің ең сыни санаттарына келесі үдерістердің жататынын көрсетеді:

- сілтілеуші ерітінділерді айдау және тасымалдау;

- өнімді ерітінділерді шығару және тасымалдау.

Аталған үдерістер жоғары ықтималдылықпен, ауыр салдарлармен және апаттардың каскадты түрде даму мүмкіндігімен сипатталады.

Қорытынды

Жүргізілген сараптамалық зерттеу нәтижесінде уран кенорындарын жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндірудің қауіпсіздігі химиялық, радиациялық және гидрогеологиялық факторлардың әсерімен шартталған күрделі, көпқұрамды тәуекелдермен сипатталатыны нақтыланды. Ұсынылған сценарийлік тәсіл апаттық жағдайлардың дамуының себеп-салдарлық байланыстарын анықтауға, олардың каскадты сипатын бағалауға және өнеркәсіптік қауіпсіздікті басқарудың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Әзірленген типтік апат сценарийлерінің құрылымданған схемасы қауіпсіздікті мониторингтеуде және тәуекелдерді басқару тиімділігін арттыру үшін негіз болады.

Уран өндірісіндегі ең қауіпті үдеріске жататын технологиялық ерітінділерді айдау-шығару және тасымалдаудың негізгі операциялары сарапталып, оларды орындау кезінде өнеркәсіптік және экологиялық қауіпсіздікті арттырудың келесі шаралары ұсынылады:

- нақты уақыт режиміндегі мониторинг жүйелерін енгізу;

- ұңғымалардың герметикалығын арттыру;

- құбырлардың коррозияға және тозуға төзімділігін күшейту үшін коррозияға қарсы материалдарды қолдану;

- ұңғымаларды мониторингтеуді автоматтандыру;

- гидрогеологиялық модельдеуді енгізу;

- барлық деңгейлерде персоналды жүйелі оқыту және аттестатциялау.

Тәуекелдерді төмендету мақсатында ұсынылған бұл шаралар уран өндірісіндегі ауытқуларды алдын-ала анықтауға, апаттардың эскалациясын болдырмауға және заманауи мониторинг пен басқару жүйелерін енгізуге бағытталған.

Уран кенорындарын ЖҰС әдісімен игеруде өндірістік үдерістердің апаттық қауіптілігін бағалауда қолданылған сценарлық талдау тәсілі уран өндіруші кәсіпорындарда өнеркәсіптік қауіпсіздік жүйелерін жетілдіру үшін әдіснамалық негіз болады және еңбекті қорғау мен қауіпсіздікті басқарудың халықаралық стандарттарының (ISO 45001) талаптарын сақтауға бағытталған.

Зерттеу нәтижелері өндірістік үдерістердің қауіпсіздігін арттыру және экологиялық тәуекелдерді төмендету арқылы БҰҰ-ның ТДМ 3 («Жақсы денсаулық және әл-ауқат») және ТДМ 12 («Жауапты тұтыну және өндіріс») қол жеткізуге ықпал етеді.

ПАЙДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Li G., Yao J. Уран өндіруде жер асты шаймалау (ISL) әдісіне шолу // Mining. – 2024. – Т. 4. № 1. – Б. 120–148 (ағылшын тілінде)*
2. *Төмен өткізгішті уран кенінен уранды электркинетикалық жер асты сілтілеу әдісімен алу / С. Li [және т. б.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2025. – Т. 57. – №. 2. – 103212 (ағылшын тілінде)*

3. *Abriol J. P. Сілтілеу теориясы және практикасы // Вайнхайм: Wiley-VCH, 2017. – Б. 329–345 (ағылшын тілінде)*
4. *Уранды жер асты әдісімен өндіру әсеріне ұшыраған сулы қабаттарды қалпына келтіру стратегияларын салыстыруға арналған реактивті тасымалдауды модельдеу құралы / N. Seigneur [және т. б.] // Journal of Contaminant Hydrology. – 2024. – Т. 265. – 104392 (ағылшын тілінде)*
5. *Mussayeva E., Bakhtin M., Kurbanova A. Уранды жер асты сілтілеу әдісімен өндірудің қоршаған ортаға әсері: шолу // Environments. – 2026. – Т. 13. – № 7. – 366 (ағылшын тілінде)*
6. *Barnes R. I. Пайдалы қазбаларды ұңғымалық шаймалау әдісімен жерасты өндіру // Шам: Springer, 2019. – Б. 233–249 (ағылшын тілінде)*
7. *Ковалева О. С. Уран өндіру әдістерінің қауіпсіздігін бағалау: монография. – Томск: ТПУ баспасы, 2020. – 164 б. (орыс тілінде)*
8. *Manaa E. S. A., Mahmoud S. A. E., Awny E. Египет. Орталық Шығыс шөлі. Қызыл теңіз жағалауындағы Ochre-Umm Greifat кенінен уранды селективті сілтілеу және бөлу // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Т. 41. – P. 2579–2588 (ағылшын тілінде)*
9. *Mwetulundila A.-L., Atangana A. Кеңістіктік біртекті емес тегеурінді сулы қабаттағы уранды жер асты сілтілеу кезіндегі ластаушы заттардың тасымалдануын сандық модельдеу // Modeling Earth Systems and Environment. – 2025. – Т. 11. – 316 (ағылшын тілінде)*
10. *Абдугалиева Г. Ю., Имангазин М. К., Утянова У. С. Қазақстан Республикасының тау-кен өндіру саласындағы өнеркәсіптік қауіпсіздік мәселелері жөніндегі нормативтік дереккөздерге шолу // ҚР ҰҒА жаңалықтары, Геология және техникалық ғылымдар сериясы. – 2016. – № 4. – Б. 103–109 (орыс тілінде)*
11. *Қазақстан Республикасының «Азаматтық қорғау туралы» кодексі (өзгерістер мен толықтырулармен). – Астана: Юрист, 2023. – 312 б. (қазақ тілінде)*
12. *МемСТ 12.0.003–74. Еңбекті қорғау стандарттарының жүйесі. Қауіпті және зиянды өндірістік факторлар. Жіктелуі. – М.: Стандарттар баспасы, 1976 (орыс тілінде)*

REFERENCES

1. *Li G., Yao J. A Review of In Situ Leaching (ISL) for Uranium Mining // Mining. – 2024. – Vol. 4. – No. 1. – P. 120–148 (in English)*
2. *Electrokinetic in situ leaching of U from low-permeability uranium ore / C. Li et al. // Nuclear Engineering and Technology. – 2025. – Vol. 57. – No. 2. – Article 103212 (in English)*
3. *Abriol J. P. Leaching: Theory and Practice // Weinheim: Wiley-VCH, 2017. – P. 329–345 (in English)*
4. *Reactive transport modelling as a toolbox to compare remediation strategies for aquifers impacted by uranium in situ recovery / N. Seigneur et al. // Journal of Contaminant Hydrology. – 2024. –Vol. 265. – Article 104392 (in English)*
5. *Mussayeva E., Bakhtin M., Kurbanova A. Environmental Impacts of In Situ Leaching Uranium Mining: A Review // Environments. – 2026. – Vol. 13. – No. 7. – Article 366 (in English)*
6. *Barnes R. I. In Situ Recovery of Minerals // Cham: Springer, 2019. – P. 233–249 (in English)*
7. *Kovaleva O. S. Ocenka bezopasnosti sposobov dobychi urana: monografiya [Safety Assessment of Uranium Mining Methods: Monograph]. – Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2020. – 164 p. (in Russian)*
8. *Manaa E. S. A., Mahmoud S. A. E., Awny E. Selective Leaching and Separation of Uranium from Ochre-Umm Greifat, Red Sea Coast, Central Eastern Desert, Egypt // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Vol. 41. – P. 2579–2588 (in English)*
9. *Mwetulundila A.-L., Atangana A. Numerical simulation of uranium in-situ leaching contaminant transport in a spatially heterogeneous confined aquifer // Modeling Earth Systems and Environment. – 2025. – Vol. 11. – Article 316 (in English)*
10. *Abdugaliyeva G. Yu., Imangazin M. K., Utyanova U. S. Obzor normativnyh istochnikov po voprosam promyshlennoj bezopasnosti v gornodobyvayushchej otrasli Respubliki Kazahstan [Survey of reference resources on HSE issues in mining industry of the Kazakhstan] Izvestiya NAN RK, Seriya geologii i tekhnicheskih nauk [News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences]. – 2016. – No. 4. – P. 103–109 (in Russian)*
11. *Code of the Republic of Kazakhstan «On Civil Protection» (as amended and supplemented). – Astana: Yurist, 2023. – 312 p. (in Kazakh)*
12. *GOST 12.0.003–74. SSBT. Opasnye i vrednye proizvodstvennye faktory. Klassifikatsiya [Occupational Safety Standards System. Hazardous and Harmful Production Factors. Classification]. – Moscow: Izdatelstvo standartov, 1976 (in Russian)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Li G., Yao J. Обзор метода подземного выщелачивания (ISL) при добыче урана // Mining. – 2024. – Т. 4. – № 1. – С. 120–148 (на английском языке)*

2. *Электрокинетическое подземное выщелачивание урана из низкопроницаемой урановой руды / C. Li [и др.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2025. – Т. 57. – № 2. – Ст. 103212 (на английском языке)*
3. *Abriol J. P. Выщелачивание: теория и практика // Вайнхайм: Wiley-VCH. – 2017. – С. 329–345 (на английском языке)*
4. *Моделирование реактивного переноса как инструмент сравнения стратегий восстановления водоносных горизонтов, подвергшихся воздействию подземного выщелачивания урана / N. Seigneur [и др.] // Journal of Contaminant Hydrology. – 2024. – Т. 265. – Ст. 104392 (на английском языке)*
5. *Mussayeva E., Bakhtin M., Kurbanova A. Воздействие добычи урана методом подземного выщелачивания на окружающую среду: обзор // Environments. – 2026. – Т. 13. – №. 7. – Ст. 366 (на английском языке)*
6. *Barnes R. I. Подземная добыча полезных ископаемых методом скважинного выщелачивания // Шам: Springer. – 2019. – С. 233–249 (на английском языке)*
7. *Ковалева О. С. Оценка безопасности способов добычи урана: монография. – Томск: изд-во ТПУ, 2020. – 164 с. (на русском языке)*
8. *Manaa E. S. A., Mahmoud S. A. E., Awny E. Селективное выщелачивание и разделение урана из руды Ochre-Umm Greifat, побережье Красного моря, Центральная Восточная пустыня, Египет // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Т. 41. С. 2579–2588 (на английском языке)*
9. *Mwetulundila A.-L., Atangana A. Численное моделирование переноса загрязняющих веществ при подземном выщелачивании урана в пространственно неоднородном напорном водоносном горизонте // Modeling Earth Systems and Environment. – 2025. – Т. 11. – Ст. 316 (на английском языке)*
10. *Абдугалиева Г. Ю., Имангазин М. К., Утянова У. С. Обзор нормативных источников по вопросам промышленной безопасности в горнодобывающей отрасли Республики Казахстан // Известия НАН РК, Серия геологии и технических наук. – 2016. – № 4. – С. 103–109 (на русском языке)*
11. *Кодекс Республики Казахстан «О гражданской защите» (с изм. и доп.). – Астана: Юрист, 2023. – 312 с. (на казахском языке)*
12. *ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Издательство стандартов, 1976 (на русском языке)*

Авторлар туралы мәліметтер:
Абдугалиева Г. Ю., техника ғылымдарының докторы, профессор, Ө. А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Д. А. Қонаев атындағы Кен істері институтының бас ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан), *g_1102@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-2349-9396
Орсаринова А. О., сеньор-лектор, IT және жаратылыстану ғылымдары жоғары мектебі, С. Аманжолав атындағы Шығыс Қазақстан университеті (Өскемен қ., Қазақстан), *asem.oraldinova@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0006-6314-9816
Хусаинова С. О., «Табиғи-техногендік қауіп-қатерлер» ББ магистранты, «География және табиғатты пайдалану» факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Өнеркәсіптік қауіпсіздік бойынша аға оқытушы, «Жоғары технологиялар институты» ЖШС «Қазақстан ядролық университеті» филиалы (Алматы қ., Қазақстан), *khussainovasamal@gmail.com;* https://orcid.org/0009-0002-8339-6233
Саукен Т. Ж., техника ғылымдарының магистрі, инженер-зерттеуші, Жаңа бағытты дамыту зертханасы, ЖШС «Жоғары технологиялар институты» (Алматы қ., Қазақстан), *talshynsauken@gmail.com;* https://orcid.org/0009-0007-4773-0659

Information about the authors:
Abdugaliyeva G. Yu., Doctor of Technical Sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Chief Researcher at the D. A. Kunaev Institute of Mining (Almaty, Kazakhstan)
Orsarinova A. O., Senior Lecturer, Higher School of IT and Natural Sciences, S. Amanzholov East Kazakhstan State University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)
Khussainova S. O., Master's student of the Educational Program «Natural and technogenic risks», Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Senior Lecturer on Industrial Safety, Branch of Kazakhstan Nuclear University, «Institute of High Technologies» LLP (Almaty, Kazakhstan)
Sauken T. Zh., Master of Technical Sciences, Research Engineer, Laboratory for the Development of New Directions, «Institute of High Technologies» LLP (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:
Абдугалиева Г. Ю., доктор техн. наук, профессор, Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, гл. научный сотрудник Института горного дела имени Д. А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан)
Орсаринова А. О., сеньор-лектор, Высшая школа IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)
Хусаинова С. О., магистрант ОП «Природно-техногенные риски», факультет «География и природопользование», Казахский национальный университет им. аль-Фараби, ст. преподаватель по Промышленной безопасности, Филиал «Казахстанский ядерный университет» ТОО «Институт высоких технологий» (г. Алматы, Казахстан)
Саукен Т. Ж., магистр техн. наук, инженер-исследователь, лаборатория развития новых направлений, ТОО «Институт высоких технологий» (г. Алматы, Казахстан)