

MPHTI 06.51.51

JEL Classification: F02

DOI: <https://doi.org/10.52821/2789-4401-2025-4-8-28>

## ӘЛЕМДІК УРАН НАРЫҒЫНДАҒЫ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ТЕҢГЕРІМСІЗДІКТЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ САЯСИ САЛДАРЫ

Б. Қ. Өмірзақов<sup>1</sup>, Ж. Жұман<sup>1</sup>, А. Т. Макулова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы

<sup>2</sup>Нархоз университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы

### АНДАТПА

*Зерттеудің мақсаты:* Бұл зерттеуде жаһандық уран нарығына жан-жақты талдау жүргізіліп, 2050 жылға дейінгі болашақ жеткізілімдердің өсіп келе жатқан сұранысты қанағаттандыру мүмкіндігі бағаланады. Зерттеу нарықтық және геосаяси факторларды ескере отырып, болжамды уран ұсынысы мен сұранысы арасындағы ықтимал теңгерімсіздікті анықтауды көздейді.

*Әдіснамасы:* Зерттеу эконометриялық талдау мен уран жеткізу қисығын модельдеуді біріктіретін кешенді тәсілге негізделген. Эконометриялық талдау әртүрлі әдістерді қолдану арқылы бағалар мен өндіріс көлемі арасындағы корреляциялық байланысты зерттеп, нәтижелердің сенімділігін қамтамасыз етеді. Жеткізу қисығын модельдеу бағаның өзгеруіне қарай уранның қолжетімділігі қалай түрленетінін көрсетіп, нарықтың түрлі сценарийлердегі тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік береді.

*Зерттеудің құндылығы/бірегейлігі:* Зерттеу Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің болжамдарын талдай отырып, қайталама көздерден алынған үлестерге қарамастан, бастапқы уран өндіру негізгі ресурс болып қала беретінін көрсетеді. Сонымен қатар, зерттеу уранға бай елдердегі өндіріс пен экспорттық саясатты қайта қарастырудың және жеткізілім қауіпсіздігін қамтамасыз етудің маңыздылығын айқындайды.

*Зерттеу нәтижелері:* Басты қорытынды – болжамды уран сұранысы мен ұсынысы арасындағы елеулі теңгерімсіздік, әсіресе орташа және жоғары сұраныс жағдайларында, 2035 жылға қарай әлеуетті тапшылықтың туындауы мүмкін екенін көрсетеді. 2050 жылға қарай Қазақстан уран экспорттық нарығында көшбасшы позицияға ие болады деп күтілуде. Сонымен қатар, саяси және энергетикалық қауіпсіздік мәселелері атом энергетикасына деген сұраныстың артуына ықпал етіп, жаңа жаһандық әріптестіктер мен сауда бағыттарының қалыптасуына себеп болуы мүмкін. Қорытындылар нарықтық динамикаға терең түсінік беріп, ядролық энергетиканың тұрақты дамуына ықпал етеді.

*Түйін сөздер:* Экспорттық әлеует, уран жеткізу тізбегі, уран өнеркәсібі, ядролық энергетика, уран экономикасы, уран нарығы.

### КІРІСПЕ

Уран нарығының әлемдік динамикасы соңғы жылдары айтарлықтай өзгерістерге ұшырап, оның стратегиялық маңызы арта түсті. Энергетикалық көшу үдерісі күшейіп, көптеген елдер көміртегі бейтараптығына қол жеткізу жолында атом энергетикасын сенімді балама ретінде қарастыруда. Бұл үрдіс уранға деген сұранысты ұлғайтып, оның өндірісі мен саудасына әсер ететін факторларды талдаудың өзектілігін арттырды. Осы мақалада уран нарығының қазіргі жағдайы, оның негізгі қозғаушы күштері мен геосаяси өзгерістерге байланысты болашақ салдары жан-жақты қарастырылады. 2024 жылы Әзербайжанда өткен Біріккен Ұлттар Ұйымының Климаттың өзгеруі жөніндегі 29-конференциясы атом энергетикасын 2050 жылға дейінгі көміртегі бейтараптығы мақсаттарына жетудегі негізгі құралдардың бірі ретінде қайта қарастырды. Бұған дейін өткен 28-конференцияда 20-дан астам ел 2050 жылға қарай ядролық қуатты үш есе арттыруға міндеттеме алса, 29-конференция барысында тағы алты мемлекет бұл бастаманы қолдады. Сонымен қатар, шағын модульдік реакторлар икемді және тиімді шешім ретінде ұсынылып, 2050 жылға қарай жаңа ядролық қуаттың 25%-ын қамтамасыз етуі мүмкін [1].

Алайда, осы кезеңде жаһандық уран нарығы елеулі геосаяси өзгерістерге ұшырады. АҚШ Ресейден уран импортына тыйым салу туралы заң қабылдаса, Ресей өз кезегінде АҚШ-қа байытылған уран экспортын шектеу жөнінде шешім шығарды [2]. Сондай-ақ, 2023 жылы Нигердегі төңкеріс Францияның уранмен қамтамасыз етілуіне қатысты тәуекелдерді күшейтті [3]. Осы факторлар уранға сұранысты арттырып, ұсынысты шектеді, нәтижесінде 2023 жылы оның спот бағасы 50 АҚШ долларынан 90 АҚШ долларына асып түсті.

Бұл зерттеу уран нарығының геосаяси тәуекелдерін бағалап, негізгі өндіруші елдер (Қазақстан, Канада) мен ірі тұтынушылар (АҚШ, Қытай, Франция) үшін ықтимал саясат стратегияларын талдайды. Нарық динамикасы, жеткізу тізбегі мен ядролық энергетикалық саясатқа әсер ететін факторлар қарастырылады. Зерттеу нәтижелері негізінде сарапшыларға арналған ұсыныстар ұсынылады. Бұған дейінгі зерттеулер уран нарығын негізінен баға серпіні, ұсыныс-қауіпсіздік мәселелері және ядролық энергетикадағы ұзақ мерзімді сұраныс тұрғысынан талдаған. Алайда, Қазақстанға тән ерекшеліктер -логистикалық бағыттар, экспорттық маршруттардың тиімділігі және ұлттық өндіріс саясатының нарық динамикасына ықпалы – жеткілікті зерттелмеген. Осы мақала осы олқылықты толтыруға бағытталып, жаңа эмпирикалық деректер негізінде Қазақстанның ғаламдық уран жеткізіліміндегі рөлін кешенді бағалауды ұсынады.

### ЗЕРТТЕУДІҢ НЕГІЗГІ БӨЛІМІ

Уранның геосаясаттағы маңызы жаһандық энергетикалық ауысым мен атом энергетикасының төмен көміртекті энергия көзі ретіндегі рөлімен тығыз байланысты. Декарбонизация үрдісі мен қазба отын тұтынуын азайту аясында уран ядролық реакторлардың негізгі құрамдас бөлігі ретінде стратегиялық маңызға ие. Уранмен жұмыс істейтін атом энергетикасы парниктік газдар шығарындыларын азайта отырып, өсіп келе жатқан энергия сұранысын қанағаттандырудың маңызды шешімі бола алады.

Уран нарығы ірі өндірушілер мен әртүрлі тұтынушылар арасындағы динамикамен сипатталады. Қазақстан мол ресурстарын пайдаланып, әлемдік өндірісте көш бастап келеді, ал Канада мен Австралия өндірістік қуаты жоғары елдер қатарында. Нигер де маңызды өндіруші саналғанымен, саяси тұрақсыздыққа тап болды. Ресей уран байыту қызметтері арқылы жаһандық нарықта шешуші рөл атқарады.

Уран – сирек кездесетін, бірақ өндіруге экономикалық тұрғыдан тиімді радиоактивті металл. Австралия әлемдік уран қорының 28%-ына ие болса, Қазақстан (13%) мен Канада (10%) негізгі өндірушілер қатарында. 2021-2022 жылдардағы өндіріс деректері бойынша Қазақстан әлемдік өндірісте көш бастап, одан кейін Канада мен Намибия орналасқан (Кесте 1).

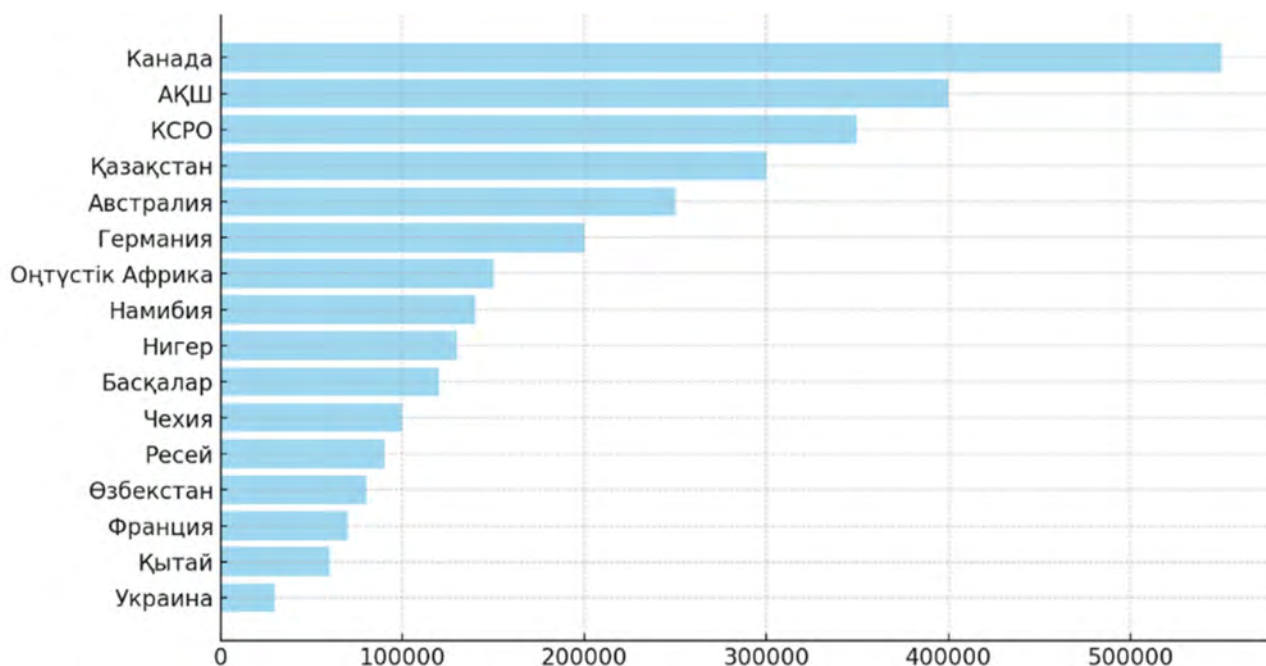
1-кесте – Уран қорларының елдер бойынша таралуы және жылдық өндірісі

|                                                               | Қорлар (Тонна U) | Барлығы% | Өндіріс<br>(2021) | Өндіріс<br>(2022) | Өсім %<br>Өндіріс |
|---------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Мемлекет                                                      | 2021             | Қорлар   |                   |                   |                   |
| Австралия                                                     | 1,684,100        | 28%      | 4,192             | 4,553             | 8.61%             |
| Қазақстан                                                     | 815,200          | 13%      | 21,819            | 21,227            | -2.71%            |
| Канада                                                        | 588,500          | 10%      | 6,938             | 7,351             | 5.94%             |
| Намибия                                                       | 470,100          | 8%       | 5,476             | 5,613             | 2.50%             |
| Ресей                                                         | 480,900          | 8%       | 2,846             | 2,508             | -11.86%           |
| Оңт.Африка                                                    | 320,900          | 5%       | 192               | 200               | 4.17%             |
| Нигер                                                         | 311,100          | 5%       | 2,248             | 2,020             | -10.14%           |
| Бразилия                                                      | 276,800          | 5%       | 29                | 43                | 48.28%            |
| Қытай                                                         | 223,900          | 4%       | 1,600             | 1,700             | 6.25%             |
| Монғолия                                                      | 144,600          | 2%       | 0                 | 0                 | 0%                |
| Өзбекстан                                                     | 131,300          | 2%       | 3,520             | 3,300             | -6.25%            |
| Украина                                                       | 107,200          | 2%       | 455               | 100               | -78.02%           |
| Ботсвана                                                      | 87,200           | 1%       | 0                 | 0                 | 0%                |
| АҚШ                                                           | 59,400           | 1%       | 8                 | 75                | 837.50%           |
| Танзания                                                      | 58,200           | 1%       | 0                 | 0                 | 0%                |
| Иордания                                                      | 52,500           | 1%       | 0                 | 0                 | 0%                |
| Барлығы                                                       | 6,078,500        | 100%     | 47,808            | 49,355            | 3.24%             |
| Ескерту – [4,5] дереккөзі негізінде авторлармен құрастырылған |                  |          |                   |                   |                   |

Бұл табиғи, өндірілген ресурстар атом энергетикасында қолданылатын уранға әлемдік сұраныстың 57%-ын қамтамасыз етеді, ал қалған 43%-ы халықаралық келісімдерді жүзеге асыру нәтижесінде жоғары байытылған қару-жарак деңгейіндегі уранның қоры, сондай-ақ отынды қайта өңдеу сияқты баламалы көздер құрайды [6].

1-кестеде қазіргі өндіріс көрсетілгенімен, тарихи тұрғыдан алғанда, 1945-2022 жылдар аралығындағы жиынтық өндіріс көлеміне (Сурет 1) негізделе отырып, АҚШ бұрын айтарлықтай өндірістік қуатқа ие болған.

Уранға сұраныс алғашында Манхэттен жобасы мен қырғи-қабақ соғыстың ядролық қарулану жарысына байланысты артты. Кейін КСРО-ның Обнинск және АҚШ-тың Shippingport реакторлары атом дәуірінің басталуын белгіледі. 20-шы ғасырда Канада, Оңтүстік Африка және Австралия ядролық энергетиканың дамуына сай уран өндірісін ұлғайтты [7]. 1960-70 жылдары уранға сұраныстың күрт өсуі атом энергетикасының кеңеюімен байланысты болды, әсіресе 1970-жылдардағы мұнай дағдарысы оның рөлін күшейтті. Алайда, 1980-жылдардың соңында қырғи-қабақ соғыстың аяқталуына байланысты әскери сұраныс азайып, өндіріс төмендеді. Соған қарамастан, азаматтық атом энергетикасының дамуымен уранға жаһандық қажеттілік сақталды.



1-сурет – Тарихи уран өндірісі, 1945–2022, уран тоннасымен (tU)

Есерту – [8] дереккөз негізінде авторлармен құрастырылған

Өндіріске келер болсақ, уранның геосаяси алаңдаушылықтары айқынырақ болады. Қазақстан – әлемдегі ең ірі уран өндіруші. Ресейге салынған санкцияларға байланысты олардың Санкт-Петербург порты арқылы уран экспорттау мүмкіндігі қиындай түсті. Түркиядағы Қара теңіз портына барар жолда Армения мен Әзірбайжан арқылы өтетін Каспий теңізі арқылы балама логистикалық бағытты зерттеуге айтарлықтай күш жұмсалды. «Қазатомөнеркәсіп» Ұлттық атом компаниясы нарықты жалпы жеткізудің 40%-дан астамын қамтамасыз етеді, бұл оны әлемдік ірі өндірушіге айналдырады. Қазатомөнеркәсіп 2022 жылы 21,2 мың тонна уран өндірді [9].

Уран нарығындағы сауда үш негізгі түрге бөлінеді: спот баға белгілеу (жедел мәмілелер), аралық және ұзақ мерзімді келісімшарттар. Бұл келісімдер баға, көлем және жеткізілім тұрақтылығын реттейді. Нарықтың циклдік сипаты сұраныс пен ұсыныстың ұзақ мерзімді өзгерістеріне тәуелді. Уран

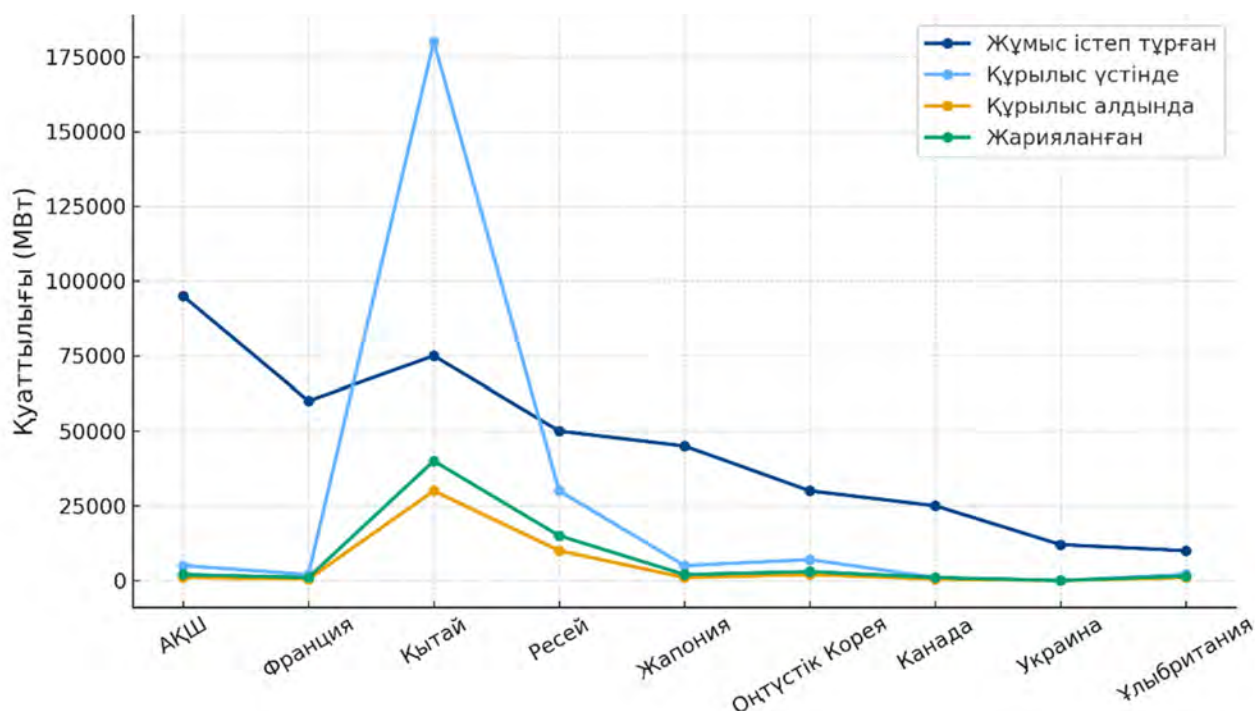
саудасы құпия жағдайда жүзеге асатындықтан, жаһандық нарықта бірыңғай баға белгіленбейді. Бағаларды UxC LLC және TradeTech сияқты тәуелсіз сарапшылар жариялайды, олар нақты мәмілелерді белгілеуден гөрі нарықтың жалпы жағдайына негізделген бағалау жүргізеді. Орта және ұзақ мерзімді келісімшарттар үшін осындай әдіс қолданылады, бірақ олардың мөлшерлемелері нақты нарықтық бағалардан айтарлықтай ауытқуы мүмкін [5].

Қазақстанның Ұлттық атом компаниясы «Қазатомөнеркәсіп» 2019 жылы уран өндірісін 20%-ға қысқарту туралы шешім қабылдады. Бұл шара уран нарығын тұрақтандыру үшін сұраныс пен ұсынысты реттеу мақсатында қабылданды. «Қазатомөнеркәсіп» АҚ бас директоры Ғалымжан Пірматовтың айтуынша, бұл стратегиялық қадам әлемдік атом энергетикасы секторының дамуына және жеткізудің қысқаруына байланысты бағаның өсуін қолдауға бағытталған. Халықаралық энергетикалық агенттік 2030 жылға қарай әлемдік энергия тұтынуының 18%-ға, ал 2050 жылға қарай 39%-ға артатынын болжап отыр, бұл атом энергиясына, соның ішінде уранға сұраныстың өсуін көрсетеді. Осы тұрғыда 2023 жыл уран өндірісін кеңейту және спот бағасының тұрақты өсуі бойынша маңызды кезең болды [10].

Осы динамика бойынша бар зерттеулерге жүгінсек, эконометрикалық модельдеуді қолдану арқылы уран жеткізілімі мен бағалар арасындағы ұзақ мерзімді байланысты зерттейтін зерттеулердің айтарлықтай саны бар. Мысалы, Carol Dahl өзінің зерттеулерінде АҚШ-тағы уран жеткізілімінің ұзақ мерзімді баға икемділігі 0,74 пен 3,08 аралығында болуы мүмкін екенін көрсетті, бұл бағаның өзгеруіне ұсыныстың маңызды реакциясын көрсетеді [11]. Бұл зерттеу, басқалары сияқты, уранның басқа энергетикалық тауарларға ұқсас екенін көрсетеді, өйткені оның ұзақ мерзімді перспективада салыстырмалы түрде серпімді жеткізілімі бар, бұл нарыққа жауап ретінде өндірісті реттеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, Graham зерттеуінде уран өндірісінің қысқа мерзімді және ұзақ мерзімді икемділігін бағалады. Олар ұсыныс қысқа және ұзақ мерзімді икемділікке басқаша жауап береді, ал ұзақ мерзімді икемділік үлкенірек деген қорытындыға келді [12]. Басқа зерттеулер осы қарым-қатынасты талдау үшін неғұрлым жетілдірілген әдістерді қолданды [13-14]. Бұл зерттеулерде ұсыныс пен баға арасындағы күрделі қатынасты бағалау үшін динамикалық модельдер қолданылды. Зерттеулер уран өндірісінің баға сигналдарына жауап беруінің кешігуі бар екенін атап өтті және бұл рұқсат беру, өндіру және геосаяси әсерлерге байланысты ұзақ уақыттармен түсіндірілді. Бұған қоса, олар уран бағасының икемділігі сыртқы қозғаушы күштерге байланысты өзгеруі мүмкін екенін атап өтті, бірақ ұзақ мерзімді перспективада ұсыныс икемділігі нарықтағы түзетулерді түсіну үшін маңызды болып қала береді. Бұл тұжырымдар уран жеткізудің ұзақ мерзімді экономикасы туралы кеңірек әдебиетке және нарықтық динамикасын ұстау құралы ретінде экономикалық модельдеудің маңыздылығына ықпал етеді.

*Атом энергетикасының жаһандық дамуы.* Жақында уран сұранысының негізгі қозғаушы күші ядролық энергетика болып табылады, өйткені климаттың өзгеруі жөніндегі БҰҰ-ның 28-ші және 29-шы конференциясында 28 елде 2050 жылға қарай атом энергиясын өндіруді үш есеге арттыруға ұмтылу шешімі қабылданды. 2 суретте салынып жатқан, салыну алдындағы және жарияланған қуаттармен қатар ағымдағы операциялық ядролық қуаттардың талдауы көрсетілген. Америка Құрама Штаттарының жұмыс істеп тұрған ядролық қуаты ең жоғары, дегенмен Қытайдағы ядролық бағдарламалардың ауқымды ұлғаюы болашақ уран сұранысының сейсмикалық өзгеруін білдіреді [4]. Жаһандық талдау ядролық энергетикаға әртүрлі, бірақ үйлестірілген түрде ауысу үрдісін көрсетеді, оның негізінде уран сұранысының қарқынды өсуі жатыр. Елдер энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз ету, климаттық мақсаттарға қол жеткізу және экономикалық өсуді ынталандыру үшін ядролық энергияны стратегиялық тұрғыда пайдаланады. Бұл ұлттық стратегиялардың айтарлықтай ықпалы барлық уран нарығында сезіледі, бұл өзгерістер тау-кен өндірісінен бастап бағаны тұрақтандыруға дейінгі бүкіл нарыққа ықпал етеді.

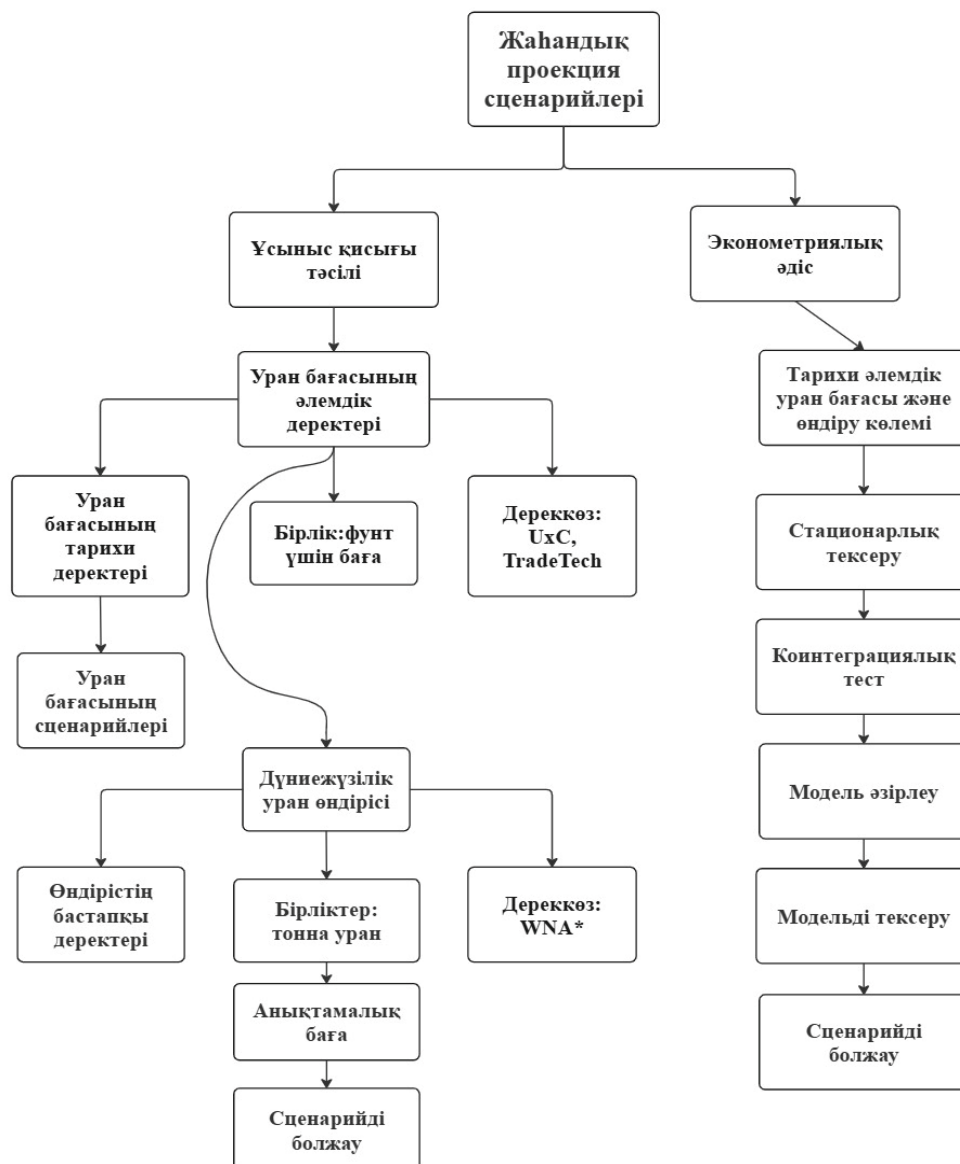




2-сурет – Елдер бойынша ядролық қуаттылық (МВт).  
Жұмыс қуаттылығы 1000 МВт-тан жоғары станциялар үшін іріктеу қолданылды  
Ескерту – [4] дереккөз негізінде авторлармен құрастырылған

2022 жылы уран саудасы айтарлықтай өзгеріске ұшырап, импорты 374 миллион доллардан астамға өсті. 2021 жылы 142 миллион доллар құраған болатын. Саудадағы бұл өсу ядролық энергия мүмкіндіктерін қолдау және кеңейту үшін маңызды жаһандық сұраныстың артып келе жатқанын көрсетеді. Қытайдың әлемдік импорттың 57%-ын құрайтын, 215 миллион доллар шығысымен үстем импорттаушы ретіндегі рөлі елдің ядролық энергетикадағы агрессивті экспансиясын және оның жаһандық энергетикалық матрицадағы стратегиялық орнын көрсетеді. Америка Құрама Штаттары импорттың 41% -ын құрап, 156 миллион долларға жетті, бұл оның ядролық энергетикаға тұрақты тәуелділігін және тұрақты уран жеткізу тізбегін қамтамасыз етудің стратегиялық маңыздылығын көрсетеді. Қазіргі жаһандық энергетикалық реакторлар жыл сайын шамамен 67 500 тонна уранды қажет етеді және қазіргі өлшенген ресурстар қазіргі тұтыну қарқыны мен бағалары бойынша шамамен 90 жылға жетеді [4].

*Уран жеткізілімін бағалау әдістері.* Бұл зерттеуде тау-кен өндірісіндегі уран өндірудің болашақ әлеуетін бағалау үшін екі түрлі әдіс қолданылды: (А) ұсыныс қисығы тәсілі және (В) эконометрикалық модельдеу. Төмендегі 3-суретте болашақ уран жеткізілімін жобалауда осы екі әдістemenің дамуын суреттейтін схемалық ағын берілген.



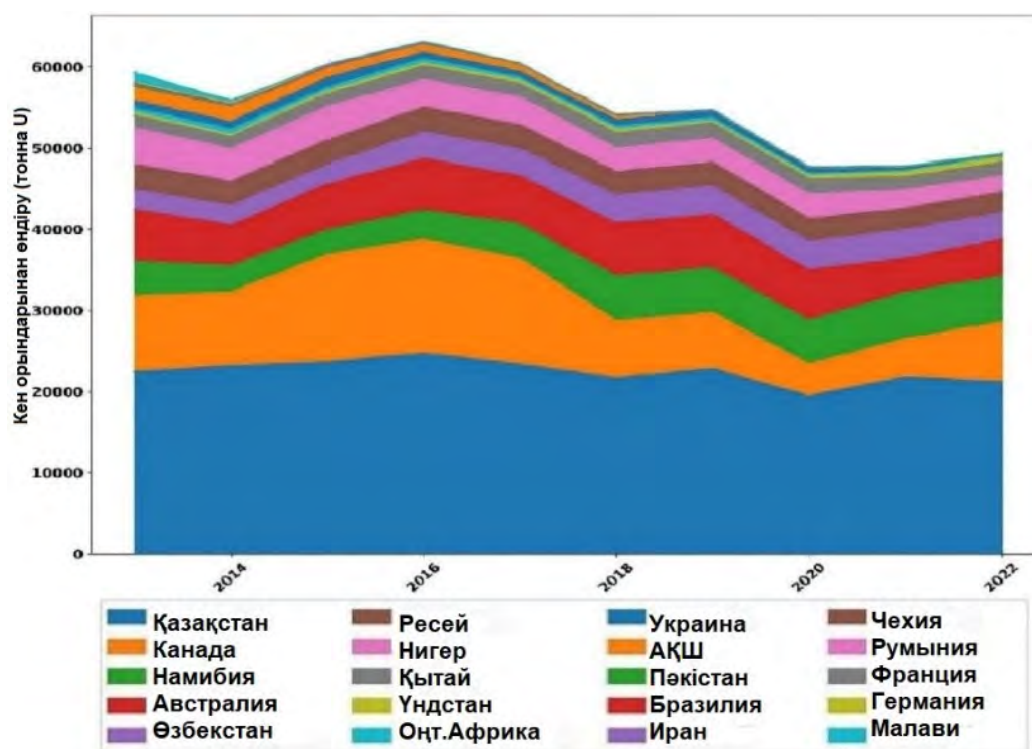
3 Сурет – Болашақ уран жеткізілімін бағалау үшін ұсыныс қисығы тәсілі мен эконометрикалық модельді біріктіретін осы зерттеуде қолданылған екі тәсілдің әдістемесінің схемасы

Ескерту – авторлармен құрастырылған, \*World nuclear association

*а) Ұсыныс қисығы әдісі:*

Бірінші әдіс – ұсыныс қисығы тәсілі. Бұл әдіс бойынша 1990 жылдан 2023 жылға дейінгі уранның әлемдік бағасы жинақталды. Баға деректері [9] дереккөзден алынды.

Сонымен қатар, 2013–2022 жылдар аралығындағы кеніштерден уран өндіру деректері (уран тоннасында) жинақталып, [4] дереккөзден алынды. Бұл деректер жыл сайынғы жалпы әлемдік өнім шығару үшін синтезделді (Сурет 4).



4-сурет– Кен орындарынан уран өндіру (тонна)

Ескерту – [4] дереккөз негізінде авторлармен құрастырылған

Зерттеуде консервативті тәсіл қолданылды, оған сәйкес уран өндіру шығындары кенді байытумен кері байланыста болады. Осы мақсатта қолданылған модельді Schneider, E. A., & Sailor, W. C. әзірлеген және оны келесі түрде көрсетуге болады [15]:

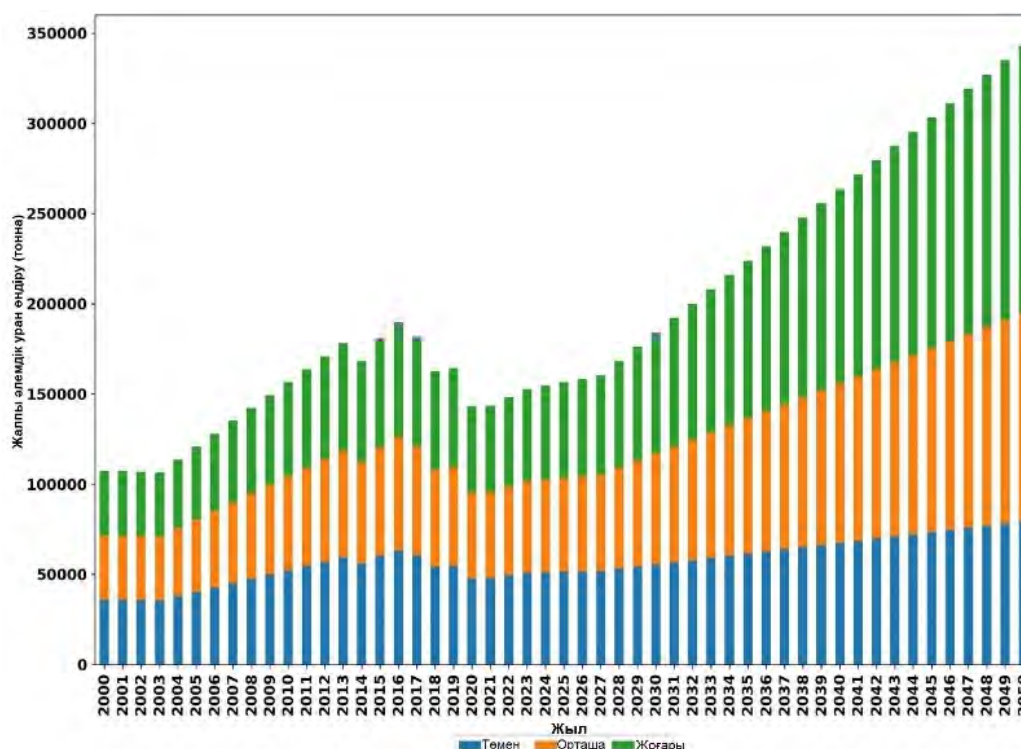
$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\alpha\beta} \quad (1)$$

мұндағы  $Q$  – уранның мөлшері,  $P$  – уранның бағасы.

$Q_0$  – негізгі шама.  $P_0$  – анықтамалық баға.

Аталған модельдің параметрлері  $\alpha=2,48$  және  $\beta=1$  мәндері ретінде таңдалған [16]. Экономикалық тұрғыдан,  $\alpha$  коэффициенті бағаның өзгерісіне ұсыныстың икемділігін сипаттайды:  $\alpha$  неғұрлым жоғары болса, баға өскен кезде уран өндіру көлемінің артуы соғұрлым айқын болады. Ал  $\beta$  шамасы – масштабтау параметрі, ол модельді оңайлату үшін теңге (baseline) деңгейінде 1-ге тең деп алынады. Бұл жағдайда  $\alpha=2,48$  мәні ұсыныстың бағаға сезімталдығы жоғары екенін, яғни бағаның көтерілуі жаңа кен орындарын игеруге және өндіріс көлемін арттыруға тікелей ықпал ететінін көрсетеді.

Калибрлеу көзі ретінде 2013 жылғы жаһандық өндіріс пен баға деректері алынды, өйткені ол кезең уран нарығы үшін салыстырмалы түрде теңгерімді жыл болып саналады. Параметрлерді нақтылау кезінде Schneider & Sailor зерттеуіндегі [15] консервативті бағалаулар негізге алынды. Сонымен бірге, сезімталдық талдау барысында  $\alpha$  параметрі 2,0–3,0 аралығында, ал  $\beta$  0,8–1,2 аралығында өзгергенде де негізгі үрдістер сақталатыны байқалды. Бұл модельдің тұрақтылығын және уран жеткізілімін бағалауда қолдануға болатындығын көрсетеді.



5-сурет – Ұсыныс қисығын пайдалану арқылы 2050 жылға дейін уран өндірудің болжамды үрдістері  
Ескерту – авторлармен құрастырылған

Модель анықтамалық нүкте ретінде 2013 деректері арқылы түзетілген. Түзетілген модель 2013–2022 жылдар аралығындағы деректермен салыстырылып, кейіннен уран жеткізілімін болжау үшін пайдаланылды. 2050 жылға дейін уран жеткізуді жобалау үшін болашақ баға үрдістері бағаланды. Осы мақсатта үш сценарий құрылды: төмен, орташа және жоғары.

Әрбір сценарий белгілі бір бағаға сәйкес келеді. Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттік (ары қарай - IAEA) болжамдарына сәйкес, уран бағасы төмен сценарий бойынша шамамен 50 доллар тұрақталады деп күтілуде. Орташа сценарий 2050 жылға қарай кг үшін 100 долларға жетеді деп күтілуде, ал жоғары сценарий кг үшін 200 долларға жетеді деп болжануда. Сонымен қатар, мәндерді 2013 жылдан 2050 жылға дейін ұзарту үшін өсу қарқыны қолданылды. Жоғарыда аталған «Ұсыныс қисығы» үлгісін қолдану арқылы әртүрлі сценарийлер бойынша әлеуетті ұсыныс нәтижелері талданды. Талдау нәтижелері 5 суретте көрсетілген.

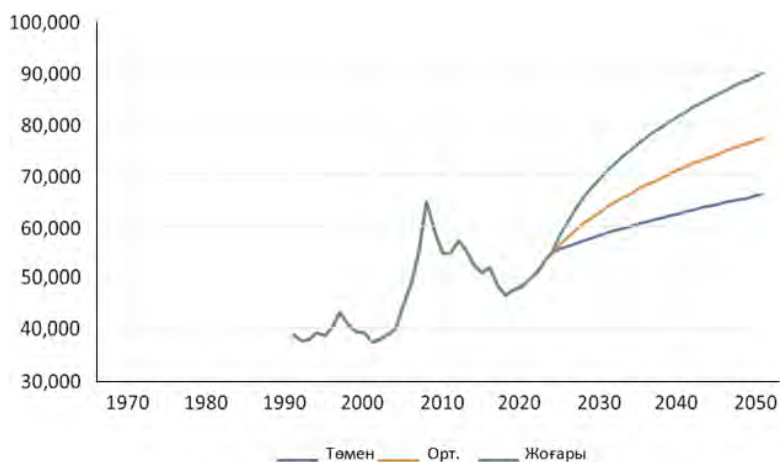
#### б) Эконометриялық модельдеу

Екінші әдіс – эконометриялық модельдеу. Бұл тәсіл өндіріс көлемі мен баға деректерін пайдалану арқылы эконометриялық үлгілерді құрастырады. Модельдердің беріктігін қамтамасыз ету үшін бірнеше эконометриялық әдістер қолданылды. Модельді (у) түрінде көрсетуге болады, ол өндірілген уранның жаһандық санын және (р) уранның басым бағасын білдіреді. Бұл модель келесідей тұжырымдалған:

$$y - f(p) \quad (2)$$

(f) функциясы уран нарығының күрделі динамикасын бейнелейтін өндіріс көлемі (у) мен баға (р) арасындағы күрделі қатынасты білдіреді. Біздің бастапқы талдауымыздағы болжамды уран бағасының деректерін пайдалана отырып, 2050 жылға дейінгі уран өндірісінің әлемдік тенденциясы болжанған. Бұған қол жеткізу үшін бұрын талқыланған үш сценарийді қолдану керек болды: төмен, орташа және жоғары (Сурет 6).





6-сурет – Эконометриялық үлгіні пайдалану арқылы  
2050 жылға дейінгі уран өндірудің болжамды үрдістері

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Төмен сценарий бойынша уран бағасының тұрақтылығы бар сақтық нарығы болжанып, нәтижесінде өндіріс тенденциялары минималды өзгерді. Орташа сценарийде бағаның қалыпты өсуі күтілуде, бұл күтілген және тау-кен өндіру жұмыстары өзгертін нарыққа бейімделгендіктен өндіріс көлемінің ұлғаюына әкелді. Ақырында, жоғары сценарий оптимистік болып табылады, ол өндірістің айтарлықтай өсуіне сәйкес келетін бағаның айтарлықтай өсуін күтеді, өйткені тау-кен өндірісі өсіп келе жатқан сұранысты қанағаттандыру үшін күшейеді.

Зерттелетін сценарийлердің негізі уран өндіру үшін әлеуетті фьючерстердің ауқымын қамтамасыз ету және уран өндіру жөніндегі қызметтің бағаның өзгеруіне қаншалықты сезімтал екенін көрсету болып табылады. Бұл түсінік саясаткерлер үшін өте маңызды, өйткені олар алдағы онжылдықтарда уран нарығындағы әртүрлі ықтимал оқиғаларға дайындалуға тырысады. Бұл талдаудың нәтижелері келесі тарауларда толығырақ қарастырылады.

2 кестеде стандартты қателік, t-статистика және ықтималдық сияқты негізгі статистикалық өлшемдермен бірге қолданылған эконометриялық модельдердің негізгі сипаттамаларын көрсетеді. Біздің зерттеу бағаның ауытқуына жауап ретінде ұсыныстың икемділігін көрсетеді. Сонымен қатар, біздің зерттеулеріміз уран бағасының әрбір бір пайыздық өзгеруіне сәйкес ұсыныстың 0,21%-ға өсетінін көрсетеді. Бұл оң өсу қатынасы уран жеткізудің нарықтық баға динамикасына сезімталдығын көрсетеді. Бұл модельдердің айнымалылары олардың икемділігі ретінде түсіндірілуін жеңілдету үшін натурал логарифмнің көмегімен ұсынылғанын атап өткен жөн.

Талдаудың сенімділігін қамтамасыз ету үшін бағалар мен ұсыныс арасындағы байланысты бағалау үшін үш статистикалық әдіс қолданылды: толық модификацияланған қарапайым ең кіші квадраттар (бұдан әрі - FMOLS), динамикалық қарапайым ең кіші квадраттар (бұдан әрі - DOLS), канондық коинтеграциялық регрессия (бұдан әрі - CCR). Үш бағалау әдісі (CCR (0,201), FMOLS (0,202) және DOLS (0,219)) бойынша баға коэффициенті өте жақын, бұл нәтижелердің сенімділігін көрсетеді.

## 2-кесте – Эконометриялық модель спецификациялары

| Әдіс  | Айнымалы  | Коэффициент | Стандарттық қате | t-Статистика | Ықтималдық |
|-------|-----------|-------------|------------------|--------------|------------|
| CCR   | LOG(Баға) | 0.201       | 0.058            | 3.479        | 0.002      |
|       | C         | 10.286      | 0.150            | 68.242       | 0          |
| FMOLS | LOG(Баға) | 0.2025      | 0.065            | 3.082        | 0.005      |
|       | C         | 10.283      | 0.173            | 59.171       | 0          |
| DOLS  | LOG(Баға) | 0.2190      | 0.072            | 3.009        | 0.006      |
|       | C         | 10.242      | 0.193            | 52.825       | 0          |

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Уақыт қатарларын тексеру: Алдымен уран бағасы мен өндіріс көлемінің уақыт қатарларының стационарлығы тексерілді. ADF және PP тесттері деңгейлік қатарлардың стационарлы еместігін, ал бірінші айырмалардың стационарлыққа жеткенін көрсетті (Кесте 3).

3-кесте – Коинтеграциялық тест нәтижелері

| Тест                                 | Нәтиже             | Түсіндірме                 |
|--------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| ADF (баға)                           | -1.84 ( $p>0.05$ ) | стационарлы емес           |
| ADF (өндіріс)                        | -2.10 ( $p>0.05$ ) | стационарлы емес           |
| ADF ( $\Delta$ баға)                 | -4.92***           | стационарлы                |
| ADF ( $\Delta$ өндіріс)              | -5.13***           | стационарлы                |
| Johansen Trace Test                  | $r=1$              | ұзақ мерзімді байланыс бар |
| Johansen Max-Eigen                   | $r=1$              | ұзақ мерзімді байланыс бар |
| Ескерту – авторлармен құрастырылған. |                    |                            |

Коинтеграция: Engle–Granger және Johansen тесттері ұзақ мерзімді тепе-теңдік байланысының бар екенін растады. Johansen Trace және Max-Eigen тесттері бір коинтеграциялық векторды ( $r=1$ ) анықтады. Лаг ұзындығы AIC және BIC критерийлерінің негізінде 2 ретінде таңдалды (Кесте 4).

4-кесте– Лаг ұзындығын таңдау критерийлері

| Лаг саны                             | AIC    | BIC    | HQ     | Таңдау |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 0                                    | -3.912 | -3.455 | -3.711 |        |
| 1                                    | -5.184 | -4.612 | -5.012 |        |
| 2                                    | -5.743 | -5.022 | -5.428 | ✓      |
| 3                                    | -5.601 | -4.719 | -5.313 |        |
| Ескерту – авторлармен құрастырылған. |        |        |        |        |

Эндогенділік тәуекелі. Баға мен өндіріс арасындағы ықтимал кері байланыс байқалады: өндірістің артуы ұсынысты көбейтіп, бағаға қысым түсіреді, ал бағаның өсуі жаңа кен орындарын игеруді ынталандырады. Эндогенділікті азайту үшін құралдық айнымалылар (бағалы металдар индексі, энергия бағасы индикаторы) пайдаланылды. Нәтижелер негізгі модельдермен сәйкес келді, бұл бағалардың эндогенділігінің айтарлықтай шектеулі екенін көрсетті.

Хансен параметрінің тұрақсыздығы сынағы нәтижесі талданатын уақыттық қатар деректерінде стохастикалық үрдістің дәлелі бар екенін көрсетеді. Эконометриялық модельдеу контекстінде бұл коинтеграциялық тестілеу сияқты әрі қарай талдауды жалғастыруға болатындығын көрсетуі мүмкін, өйткені ол айнымалылар арасында ұзақ мерзімді байланыстың болуын қолдайды. Осы ұзақ мерзімді қатынастарды дәлірек бағалау үшін бірнеше сенімді бағалау әдістері қолданылды. Осы эконометрикалық әдістерді біріктіре отырып, зерттеу бағаның ауытқуына қатысты уран өндіру үрдістерінің жан-жақты және сенімді болжамын ұсынуға бағытталған. Бұл түсініктер саясаткерлер, инвесторлар және сала мамандары үшін маңызды минералдар мен металл ресурстарының дамып келе жатқан динамикасында шарлау кезінде өте маңызды болады.

*Болашақ сұранысты талдау.* Уран сұранысын жобалау үшін IAEA әзірлеген сценарийлер қолданылды. Бұл сценарийлердің негіздемесі экономикалық өсудің әртүрлі деңгейлерін және уранға болашақта ықтимал сұраныстың ауқымын қамтамасыз ететін энергетикалық саясатты жүргізу болып табылады.

1. Төмен сұраныс сценарийі: Бұл сценарий орташа экономикалық өсуге негізделген. Ол экологиялық бағдарланған энергетикалық саясаттың негізі әзірленеді және бекітіледі деп болжайды. Сонымен қатар, бұл құрылым энергияға сұраныстың төмен өсуімен және 2100 жылға қарай атомдық энергиядан біртіндеп бас тартумен сипатталады.

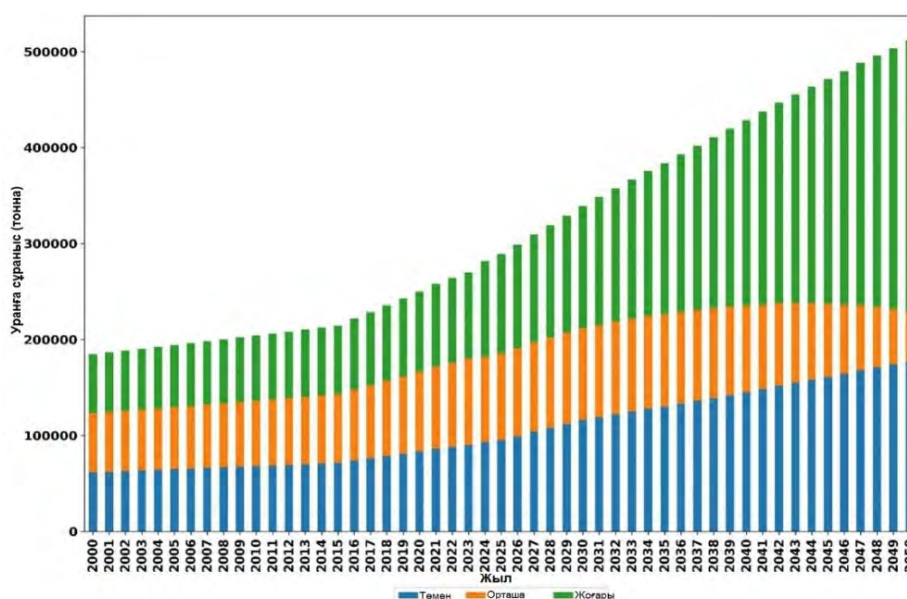
2. Сұраныстың орташа сценарийі: экономиканың дамуы осы сценарий бойынша жоғары және төмен сценарийлер арасында орташа диапазондар шамасында болады. IAEA мәліметтері бойынша, бұл

сценарий бүкіл әлемде, соның ішінде дамушы елдерде ядролық энергетиканың тұрақты дамуымен үйлесетін экология және энергетикалық саясатқа негізделген.

3. Жоғары сұраныс сценарийі: бұл сценарий жаһандық энергия қоспасы негізінен таза энергия көздерімен сипатталады және қатаң экологиялық саясат жоқ деп болжайды. Ол сондай-ақ атом энергетикасының айтарлықтай өсуін болжады. Бұл сценарий жоғары экономикалық өсумен және атом энергиясын кеңінен пайдаланумен сипатталады.

2000–2023 жылдар аралығындағы IAEA сұраныс деректері осы сценарийлер негізінде нақты сұраныс болжамдарын жасау үшін пайдаланылды, сонымен қатар әрбір сценарий үшін регрессия үлгілері жасалды, біздің болжамдарымызды қазіргі және болашақ арасындағы алшақтықты жою үшін 2050 жылға дейін ұзартады. Бұл регрессиялық модельдер әрбір нақты сценарий бойынша 2024 жылдан 2050 жылға дейін уранға сұранысты болжау үшін мұқият әзірленген (Сурет 7).

Зерттелетін сценарийлер бойынша уран өндіру деректерін жобалау үшін Холт-Винтерс экспоненциалды тегістеу моделі [17] қолданылды, бұл белгілі уақыттық қатарларды болжау әдісі. Модельдің бұл түрі, әсіресе, тарихи деректер уранға қатысты нақты үрдісті көрсететін сценарийлер үшін тиімді. Аддитивті тренд моделі қолданылды, бұл болжам уақыт бойынша тұрақты өзгеру жылдамдығын болжайды. Тарихи түрде байқалған уран өндірісінің тұрақты өсімін ескере отырып, бұл тәсіл қолайлы. Бастапқыда уран өндірісінің негізгі үрдісі мен өсу үлгісін дәл анықтау үшін 2000-2023 жылдар аралығындағы бар тарихи деректерді қамтитын модель орнатылды. Одан кейін 2024 жылдан бастап 2050 жылға дейінгі өндірістік мәндер зерттелген трендке сүйене отырып болжалды. Аддитивті модель ретінде ол бұрын байқалған сызықтық тренд жалғасады деп болжайды. Бұл тәсіл болжамдардың сенімділігін арттырып қана қоймай, уран өндірудің болашақ тенденцияларын түсіну үшін нақты негіз береді. Төменде әзірленген модельдер берілген:



7-сурет– IAEA сценарийлері арқылы уранға сұранысты болжау

Ескерту – авторлармен құрастырылған

1. Төмен сұраныс сценарийінің үлгісі:

$$y = -52,046 \times 2 + 3064,4x + 46170 \quad (3)$$

Бұл модель зерттелетіндердің арасындағы байланысты көрсететін екінші ретті терминді қамтиды, айналымылар сызықты емес. Басқаша айтқанда, экономикалық өсу немесе энергия тиімділігінің

жақсаруы, бұл уранға сұраныстың күтілгеннен көп төмендеуіне әкелуі мүмкін. Бұл осы сценарийде болжанған тенденцияларға жақсы сәйкес келетін ядролық энергетикадан бірте-бірте бас тартумен бірге энергияға сұраныстың баяу өсуін көрсетеді.

2. Орташа сұраныс сценарийінің үлгісі:

$$y = 1092x + 57770 \quad (4)$$

Бұл модельде зерттелетін айнаымалылар арасында сызықтық байланыс бар. Орташа сценарий уран сұранысы негізінен тұрақты экономикалық өсумен және атомдық энергетиканың тұрақты кеңеюімен, әсіресе экономикасы дамып келе жатқан елдерде туындайтынын болжайды. Басқаша айтқанда, сұраныс пен уранды тұтынуға әсер ететін экономикалық қозғаушы күштер арасындағы байланыс салыстырмалы түрде қарапайым. Демек, бұл уран сұранысының орташа тенденцияларын болжауда модельдің сенімділігін қамтамасыз етеді.

3. Жоғары сұраныс сценарийінің үлгісі:

$$y = 4276,9x + 16750 \quad (5)$$

Жоғары сұраныс сценарийінің үлгісі экономикалық өсу мен атомдық энергетиканың өршіл кеңеюі нәтижесінде, әсіресе қоршаған ортаны қорғау ережелері азырақ болуы мүмкін аймақтарда уранға сұраныстың арта түсетінін көрсететін сызықтық қатынасты ұсынады. 4276,9 оң коэффициенті экономикалық өсу артқан сайын уранға деген сұраныстың да өсетінін көрсетеді, бұл екеуінің арасындағы тікелей және елеулі корреляцияны көрсетеді. Сонымен қатар, талдау уранға сұранысты өндіруге, импортқа және экспортқа негізделген анықтайды, бұл болашақ сұраныс үрдістерін түсінудің күрделілігін қамтамасыз етеді.

*Уран сұранысын талдау.* Жеткізу сияқты, белгісіздіктің жоғары деңгейіне байланысты болашақ сценарийлерді жасау өте қиын. Мысалы, атом электр станцияларының құрылысын қарастыратын болсақ, Қытай тағы 17 реакторды іске қосу арқылы 55 реакторды кеңейтуді жоспарлап отыр және 2050 жылға қарай оның санын 220-ға дейін ұлғайту көзделуде. Белгісіздікті ескере отырып, уран импорттайтын елдер кең теңдеу арқылы есептелді:

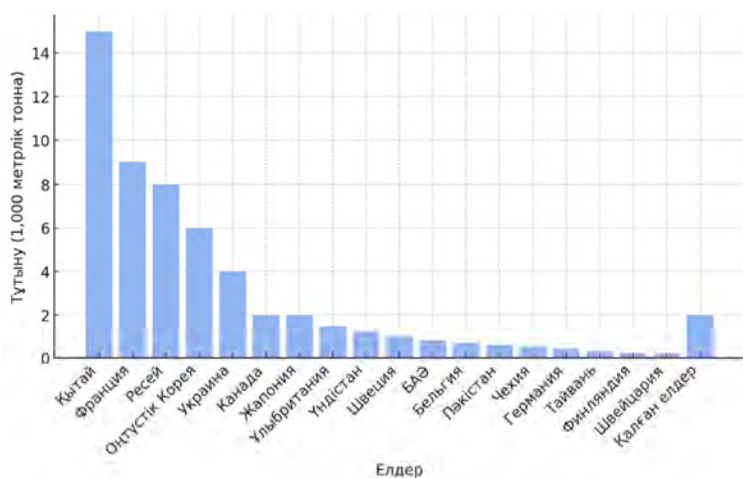
$$\text{Таза импорт} = \text{тұтыну} - (\text{өндіріс} - \text{экспорт}) \quad (6)$$

2024-тен 1000 метрикалық тоннадағы тұтыну және экспорт жайлы ақпарат [18] дереккөзінен алынды, ал өндіріс туралы ақпарат [1] дереккөзінен алынды. Бұл тәсіл ел деңгейінде уранға сұранысты анықтауға мүмкіндік береді (Сурет 8), келесі қатынасты қолдана отырып:

$$\text{Уранға сұраныс} = \text{Өндіріс} + \text{Импорт} - \text{Экспорт} \quad (7)$$

Өртүрлі сценарийлер негізінде елдер бойынша көлемді бөлуді анықтау үшін әлемдік сұраныс болжамдары қолданылды (Сурет 9-11):

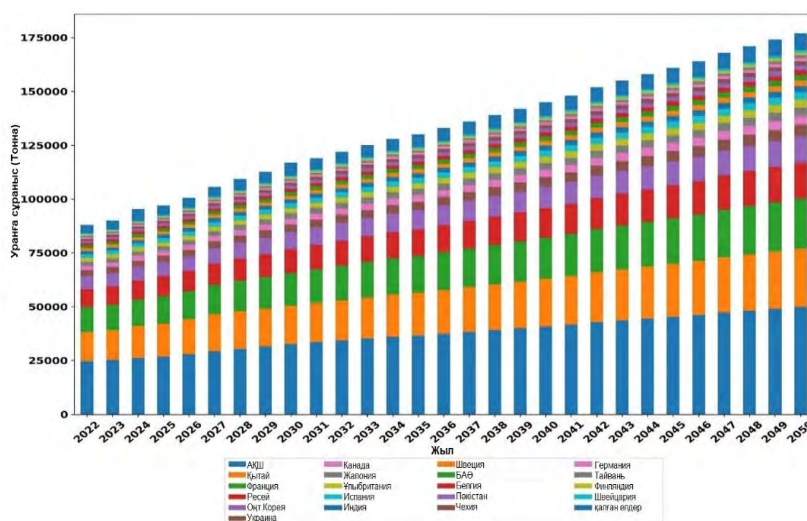
- Базалық сценарий: Мұндағы негізгі болжам ағымдағы шарттар сақталады. Жалпы сұраныс болжамдары бұрын талқыланған орта сценарий бойынша қолданылды. Маңыздысы, талдау қазіргі уақытта салынып жатқан болашақ атом станцияларында пайдаланылатын уранды анықтады. 2024-2030 жылдар аралығында салынуы жоспарланған атом стансаларының жоспарлары қаралып, олардың жарияланған қуаттары негізінде уранға деген қажеттілік есептеліп, әрбір тиісті жылдағы жалпы сұранысқа қосылды.
- Оптимистік сценарий: бұл сценарий 22 елдің 2050 жылға қарай ядролық қуат қуатын үш есе ұлғайту туралы уәдесімен қатар ағымдағы жағдайларды қарастырады.
- Пессимистік сценарий: Бұл сценарийде қазіргі уақытта уранды пайдаланатын елдердің сұранысының 25%-ға төмендеуі қарастырылды. Бұл ауысуды көрсету үшін тәсіл пайдаланудың болжамды төмендеуіне сәйкес келетін төмен сұраныс үлгісін қолданды.



8-сурет – 2021 жылғы жағдай бойынша бір елдегі уранның жалпы тұтынуы  
Ескерту - [18] дереккөз негізінде авторлармен құрастырылған

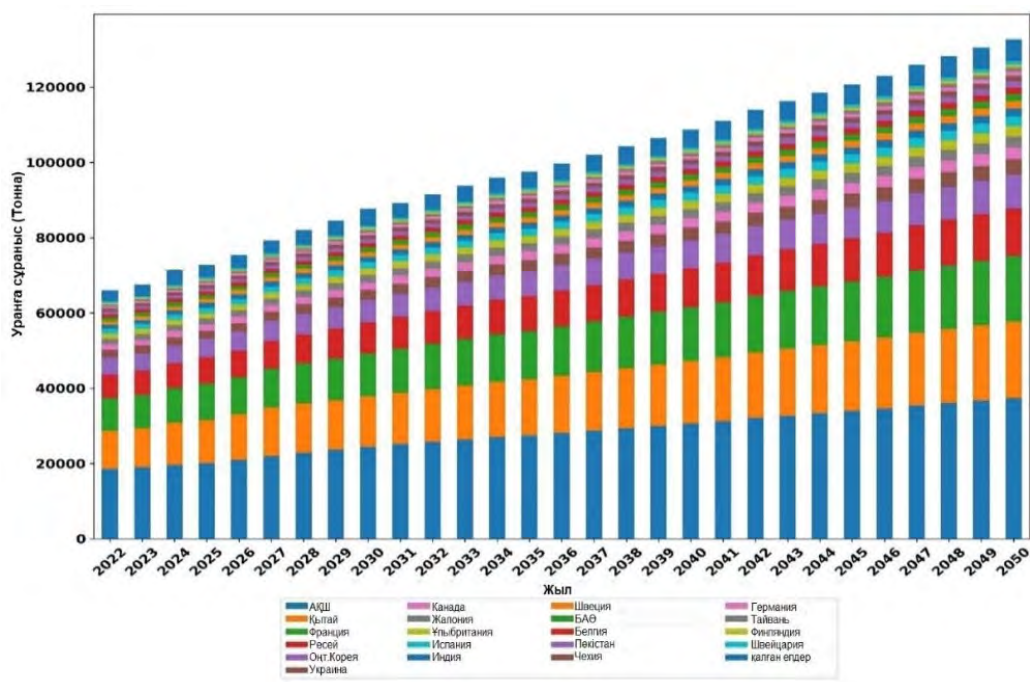
9–11 суреттер осы нарықтағы әлеуетті үрдістерді көрсету үшін әртүрлі елдердегі уран сұранысының үш түрлі сценарийін көрсетеді. Әдеттегідей іскерлік сценарий АҚШ, Қытай, Франция негізгі тұтынушылар болып табылатынын және уақыт өте келе сұраныстың артып келе жатқанын көрсетеді, бұл атом энергиясына тұрақты тәуелділікті болжайды. БАӘ, Бельгия және Тайвань сияқты басқа елдерде тұрақты сұраныс бар, бірақ бірінші топқа қарағанда айтарлықтай аз. Қомақты сома «Әлемнің қалған бөлігі» санатынан келеді.

Екінші жағынан, пессимистік сценарий уранға сұраныстың, әсіресе негізгі тұтынушылар тарапынан айтарлықтай төмендеуін көрсетеді, бұл осы елдердегі энергетикалық саясаттың өзгеруін немесе реакторлардың тиімділігін арттыруды немесе басқа энергияның баламалы көздеріне ауысуды білдіруі мүмкін. Біріктірілген бұл зерттелген сценарийлер геосаяси шешімдермен, саясаттағы өзгерістермен және технологиялық прогреспен қалыптасатын сұраныспен ядролық энергетиканың жаһандық энергетикалық қоспада тұрақты болуын көрсетеді. Оптимистік болжам өсіп келе жатқан энергия қажеттіліктерін қанағаттандырудың және климаттың өзгеруімен күресудің сенімді, таза нұсқасы ретінде ядролық энергетикаға жаһандық ұмтылысты көрсетеді.

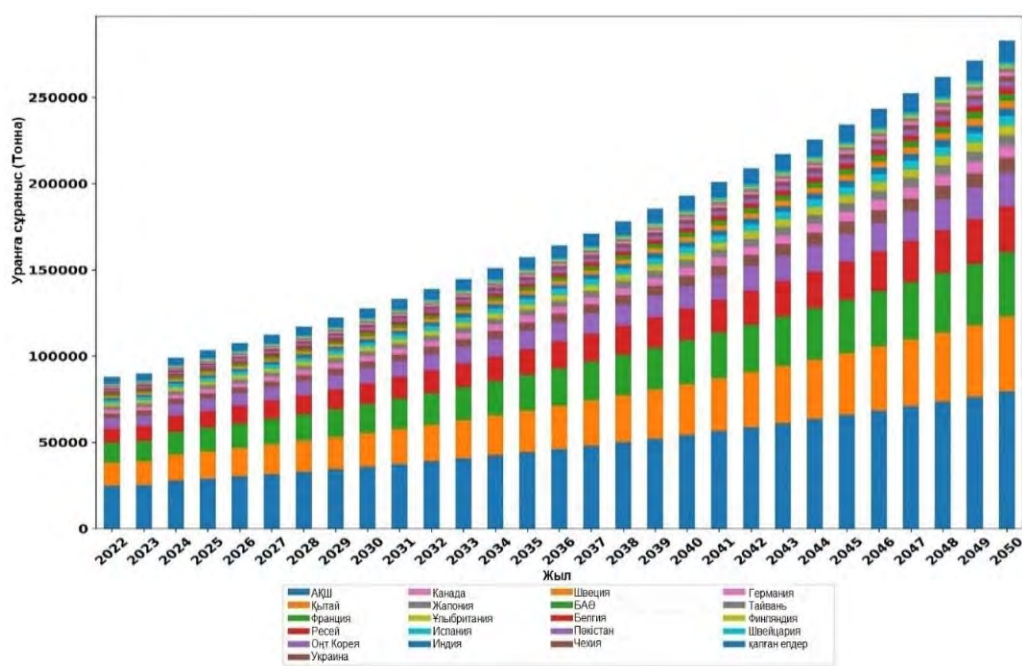


9-сурет– Ел деңгейінде болжанатын уран сұранысы: базалық сценарий  
Ескерту – авторлармен құрастырылған





10-сурет – Ел деңгейінде болжанатын уран сұранысы: пессимистік сценарий  
Ескерту – авторлармен құрастырылған



11-сурет – Ел деңгейінде болжанатын уран сұранысы: оптимистік сценарий  
Ескерту – авторлармен құрастырылған

### Талқылау

Бұл зерттеуде сұраныспен уран жеткізу болжамдары талданып, уран экономикасының болашақ динамикасы туралы егжей-тегжейлі баяндалған. Бірнеше елдер бойынша салыстыру және әртүрлі сценарийлерді қолдану арқылы жүргізілді. Нәтижелер әлеуетті нарықтық жағдайларды көрсететін сұраныс пен ұсыныс қисықтарының айқын траекторияларын көрсетті. Ұсыныс болжамдарын бағалау

үшін зерттелген екі әдістің де сәйкестігі байқалды (эконометриялық әдіс және ұсыныс қисығы әдісі), олардың арасында айтарлықтай айырмашылықтарсыз тығыз сәйкес келетін нәтижелер берді. Осы сәйкестікті ескере отырып және қысқаша болу үшін келесі талқылау сұранысты болжаумен алдағы салыстыру бағалауларындағы репрезентативті мысал ретінде эконометриялық модель қорытындыларына назар аударады. Ұсыныс қисығы әдісінен алынған дәл осындай түсініктер экономикалық модельге де қолданылады. Сұраныс сценарийлеріне қарасақ, төмен сұраныс графиктері бірте-бірте өсуді, содан кейін 2035 жылдан кейін теңестіруді және төмендеуді көрсетеді, бұл белгілі бір елдерде атом энергиясынан біртіндеп бас тарту мүмкіндігін көрсетеді. Сонымен қатар, орта сценарий ядролық энергетиканың тұрақты және теңгерімді өсуін болжайды, бұл экологиялық бастамаларға да, экономикалық өсуге де сәйкес келеді, атап айтқанда дамушы елдерде. Екінші жағынан, сұраныстың жоғары сценарийі экологиялық саясаттың шектеулерін аз ескере отырып, атом энергетикасының дамуы агрессивті түрде өсетін болашақты бейнелейтін күрт өсуді ұсынады. Бір қызығы, сұранысты болжау сценарийлері салыстырылған кезде ұсыныс жағы басқа оқиғаны айтады. Төмен және орташа сұраныс сценарийлері жағдайында уран ұсынысы тұрақты өсуде, бірақ 2035 жылдан кейін сұраныстан артта қала бастайды. Жоғары сұраныс сценарийі бұдан да үлкен алшақтықты көрсетеді, әлеуетті жеткізілім тапшылығы туралы хабарды жібереді, бұл күшті экономикалық өсу мен ядролық экспансия жүзеге асатын болса, стратегиялық әрекеттердің маңызды қажеттілігін тудырады.

Сұраныс пен ұсыныс арасындағы ауытқу, әсіресе орта және жоғары сценарийлердегі болашақ икемді саясатты жобалауға мүмкіндік беретін бірнеше маңызды ойларды көрсетеді. Біріншіден, уран жеткізілімінің тапшылығы уран бағасының көтерілуіне және жаңа барлау мен өндіру жұмыстарына түрткі болуы мүмкін. Екінші жағынан, уран өнеркәсібінің тарихи деректері бағаның өзгеруіне баяу әрекет етуді көрсетеді, яғни бұл сұраныс олқылықтары дер кезінде толтырылмауы мүмкін. Екіншіден, бағаның өзгеруі мен өндіріс арасындағы жауаптың бұл артта қалуы ұлттық стратегияларға бірнеше әсер етеді. Мысалы, уранның көптігі бар елдер әлеуетті тапшылықты өтеу үшін экспорт пен өндіру саясатын түзетуі керек, ал атом энергиясына қатты тәуелді және уранның айтарлықтай көлемін қажет ететін елдер уран қорлары мен импортын басқару саясатына назар аударуы керек. Бұл болашақ жеткізілімдер үшін қауіпсіз буфер жасау немесе экспорттаушылармен ұзақ мерзімді келісімшарттар жасау үшін уран кеніштеріне инвестиция салуды қамтуы мүмкін.

Уранның болжамды тапшылығы біздің энергия қоспасын әртараптандырудың маңыздылығын көрсетеді. Нұсқалардың бірі – ядролық энергияға ықтимал шектен тыс тәуелділікке қарсы буферді қамтамасыз ету үшін жаңартылатын энергияға және басқа да таза энергия көздеріне инвестициялау. Бұл елдерге уран саудасы туралы келісімдер мен бірлескен тау-кен кәсіпорындарына қатысты салаларда күш-жігерді біріктіруге және ортақ ресурстарды пайдалана отырып, энергетикалық қауіпсіздік мақсаттарына қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Бұған қоса, елде де, жаһандық деңгейде де негізделген инвестициялық шешімдер қабылдау үшін уран нарығын мұқият бақылау өте маңызды. Бұл зерттеуде сұраныс пен ұсыныстың талдауы олардың нарықтық көрсеткіш ретінде ғана емес, сонымен қатар кеңірек энергетикалық динамикасын ашатынын көрсетті. Сондықтан бұл динамикаларды түсіну инвестициялық мүмкіндіктерді анықтау және салалық трендтерді анықтау үшін өте маңызды. Экономикалық, технологиялық және геосаяси факторлардың бұл байланысы нарықтың болашақта қандай болуы мүмкін екендігі туралы жан-жақты суретті ұсынады. Сонымен қатар, бұл талдау саясаткерлерді тиімді және икемді саясаттарды әзірлеу үшін маңызды құралдармен жабдықтайды.

Осы зерттеуде болжанған 2050 жылға дейін жинақталған уран жеткізілімі 2021 жылға дейін хабарланған қолжетімді ресурстарды сарқипайтынын атап өту өте маңызды. Анықталған қалпына келтірілетін ресурстар (негізделген сенімді ресурстар және болжамды ресурстар) 6 078 500 тонна уранды құрайды [4]. Бұған қоса, жоғарыда аталған анықталған ресурстардың құны бір кг U үшін 130 долларды құрайды, бірақ егер қайтарылатын ресурстар кг U үшін 260 долларға дейін қарастырылса, жалпы анықталған ресурс айтарлықтай 7,918 миллион тонна уранға дейін артады. Бұл болашақта сұраныстың ауытқуын және ядролық энергия өндірісінің әлеуетті ұлғаюын қанағаттандыра алатын жеткілікті уран жеткізілімінің бар екенін көрсетеді.

Уран өндірісі мен сұранысының геосаяси контекстінде және Қазақстан, Канада және Ресей сияқты негізгі экспорттаушы елдер арасында және олардың жаһандық жеткізу тізбегіне қалай әсер ететінін байқауға болатын бірнеше нәтижелер бар. Мысалы, Қазақстанның 2022 жылғы жағдай бойынша 43% басым үлесі болды, ал Канада 15% үлес қосты, бұл бірнеше негізгі елдерде жеткізілімге бағытталғанын көрсетеді. Оның үстіне, геосаяси ахуалда өзгерістер бар, әсіресе Батыстың ресейлік уранға тәуелділігін азайту ниеті, яғни бұл елдер негізгі жеткізушілер ретінде өз ұстанымдарын нығайтуы керек. Бұл Қазақстан мен Канададан келетін импортқа тәуелді Үндістан жағдайында айқын көрінеді. Сол сияқты, АҚШ-тың ресейлік ураннан бас тарту ниеті де осы үрдіске сәйкес келеді. 2050 сұраныс пен ұсынысты болжау негізінен саяси қарым-қатынастар, энергетикалық қауіпсіздік саясаты және уранға бай елдердің стратегиялық жоспарлары сияқты факторларға негізделген. Бұл факторлардың бірігуі әлемдік уран нарығын қалыптастырады және жаңа одақтар мен сауда үлгілеріне әкелуі мүмкін. Уран нарығының болашағы қазіргі және жаңа альянстардың геосаяси қатынастарды қалай басқаратынына және өсіп келе жатқан жаһандық сұранысты қанағаттандыру үшін уран ресурстарын қалай пайдаланатынына байланысты болады.

Уран нарығындағы тепе-теңдік тек тау-кен өндіру көлемімен шектелмейді. Шикі уран концентратын ( $U_3O_8$ ) гексафторидке ( $UF_6$ ) айналдыру – конверсия кезеңі - бірнеше елдегі аз ғана зауыттарда шоғырланған. 2010 жылдары Канада мен АҚШ-тағы бірқатар қуаттардың жабылуы нәтижесінде нарықта құрылымдық тәуекелдер пайда болды. Қазіргі кезде негізгі конверсия қуаттары Франция, Канада және Қытайда орналасқан, бұл жаһандық жеткізілімнің қауіпсіздігіне тәуелділік тудырады. Сол сияқты, байыту қуаты да (Separative Work Units, SWU) маңызды тар орын болып табылады. Әлемдік байыту қызметінің басым бөлігін «Росатом», Urenco және Orano қамтамасыз етеді, соңғы жылдары Қытайдың үлесі де артып келеді. 2022 жылдан кейін Батыс елдері ресейлік байыту қызметтеріне тәуелділікті азайтуға ұмтылғандықтан, SWU нарығында тапшылық байқалып, бағалар өсті. Бұл жағдай уран өндіру жеткілікті болған кезде де нарықтағы қысымды күшейтті.

Сонымен қатар, екінші реттік көздер - қайта өңделген ядролық отын, әскери қорларды азаматтық айналымға шығару, сондай-ақ тауарлық қорларды пайдалану - жалпы ұсынысқа үлес қосқанымен, олардың тұрақтылығы төмен және ұзақ мерзімді шешім ретінде қарастыруға болмайды. Сол сияқты, келісімшарт архитектурасы нарықтағы болжамдылықты анықтайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады. Ұзақ мерзімді формулалық келісімдер спот нарықтағы құбылмалылықты жұмсартқанымен, нарықтың ашық еместігі («market opacity») нақты баға динамикасын болжауды күрделендіреді. Уран нарығының тағы бір ерекшелігі - келісімшарттық қатынастардың күрделі архитектурасы. Негізінен екі үлгі қолданылады:

- ұзақ мерзімді келісімдер, онда жеткізілім бағасы формула немесе индекстелген негізде белгіленеді;
- қысқа мерзімді/спот нарық операциялары, онда баға бірден нарықтық конъюнктураға тәуелді болады.

Көптеген ұзақ мерзімді келісімдерде базалық баға мен «есеп айырысу формуласы» қолданылады, мысалы, инфляция индексі немесе энергия бағасы бойынша түзету. Мұндай құрылым сатып алушы мен сатушыға нарықтағы құбылмалылықтан қорғануға мүмкіндік береді. Алайда нарықтың ашық еместігі («market opacity») баға белгілеу процесін қиындатады. Уран саудасының көп бөлігі екіжақты келісімдер арқылы жүзеге асады, ал олардың шарттары жария етілмейді. Мысалы, 2023-2024 жылдары жарияланған спот бағасы тоннасына 80-90 АҚШ доллары аралығында болса да, нақты ұзақ мерзімді келісімдердегі бағалар одан едәуір төмен немесе жоғары болуы мүмкін. Бұл жағдай нарықтағы болжамдылықты азайтып, инвесторлар мен тұтынушылар үшін тәуекелді күшейтеді.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Бүкіл әлем бойынша ағымдағы және болжамды ядролық қуаттарды талдау уран нарығының динамикалық дамуын көрсетеді, бұл белгілі бір елдердегі әлеуетті кеңею болашақтағы күшті сұранысты көрсетеді. Қытайға, Үндістанға және Ұлыбританияға қарасақ, олардың ядролық қуаттарды ұлғайту бойынша сенімді жоспарлары бар. Екінші жағынан, АҚШ пен Франция тұрақты сұраныспен жетілген нарықтарды көрсетеді. Бұған қоса, жаһандық динамика энергетикалық саясаттың, экологиялық

міндеттемелердің және алдағы жылдарға уран нарығын қалыптастыратын нарықтық күштердің күрделі өзара әрекетін көрсетеді. Болашақ жұмыс жаңа технологиялар, саясаттың ауысуы және экологиялық шектеулер сияқты факторлардың ықтимал әсерін ескере отырып, осы оқиғаларды зерттеуі керек. Мұндай зерттеулер геосаяси жолдардың сценарийлерін кеңейту және жеткізу тізбегінің ықтимал әсерлеріне қатысты болжамды талдаулар жүргізу арқылы осы зерттеуге негізделуі мүмкін.

Осы зерттеудің нәтижелері болжамды уран сұранысы мен ұсынысы арасындағы айтарлықтай алшақтықты көрсетеді, бұл Орташа және Жоғары сценарийлердегі ең елеулі алшақтықпен. Бұл айырмашылықтар 2035 жылға дейін уран жеткізіліміндегі кез келген ықтимал тапшылықты болдырмау үшін стратегиялық араласулардың болуы өте маңызды екенін көрсетеді. Болжамдық жеткізілім негізінен тау-кен өндірісі негізінде белгіленеді, Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттік алдағы жылдары тау-кен өндірісі уранның негізгі көзі болады деген болжамын көрсетеді, дегенмен екінші реттік көздер жалпы жеткізілімге үлес қосуы мүмкін.

Қазақстан, Канада және Ресей 2050 жылға дейін уран өндірісі мен сұранысының геосаяси ахуалын қалыптастыратын негізгі ойыншылар болып табылады. Батыс елдері ресейлік уранға тәуелділігін азайтуға тырысуда, бұл жаһандық сауда динамикасын қайта құруға ықпал етеді. 2050 жылға қарай уранға бай елдердің саяси және энергетикалық қауіпсіздік мәселелеріне жауап ретінде қабылдаған стратегиялық шешімдері жаңа жаһандық одақтар мен сауда үлгілерін құруға әсер етеді. Негізгі назар қазіргі және жаңа альянстардың өздерінің геосаяси қарым-қатынастарын қалай басқаратынына және атом энергиясына өсіп келе жатқан сұранысты қанағаттандыру үшін уранды қалай пайдаланатынына бағытталған.

Уран нарығының баға өзгерістеріне бейімделуі мен ресурстардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын бағалау үшін, әсіресе қайталама уран көздерін ескере отырып, жан-жақты зерттеу қажет. Бұл ядролық сектордағы экономикалық модельдеу, саясатты талдау және техно-экономикалық бағалау саласындағы зерттеушілердің үйлесімді жұмысын талап етеді. Зерттеу нәтижелері уран жеткізу тізбегіндегі ықтимал қиындықтар мен мүмкіндіктерді анықтауға көмектеседі. Осы мүмкіндіктерді тиімді пайдалану үшін әртүрлі салалардағы мүдделі тараптардың бірлесе әрекет етуі аса маңызды.

Осы зерттеудің нәтижелеріне сүйене отырып, Қазақстан үшін келесі саясаттық бағыттарды айқындауға болады:

1. Өндіріс пен конверсия/UF<sub>6</sub> келісімдерін кеңейту арқылы қосылған құнды арттыру.
2. Каспий–Түркия маршруты тәуекелдерін әртараптандыру және балама бағыттарды сақтау.
3. Негізгі тұтынушылармен ұзақ мерзімді off-take келісімдері мен price collar механизмдерін енгізу.
4. Ұлттық стратегиялық уран қорын құру және баға тәуекелдерін хеджирлеу құралдарын дамыту.
5. Жаңа технологиялар мен шетелдік серіктестер арқылы қосымша инвестиция мен технология трансферін ынталандыру.
6. Сыртқы саясатта көпвекторлықты сақтау арқылы тұрақты жеткізуші ретіндегі беделді нығайту.

### Әдебиеттер тізімі

1. МАГАТЭ. Ядерная энергетика в центре внимания COP29, поскольку страны и компании ищут решения для борьбы с изменением климата [Электронды ресурс] // IAEA [web-сайт]. – 2024. – URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-power-in-the-cop29-spotlight-as-countries-and-companies-eye-climate-solutions> (Қарау уақыты: 01.11.2024).
2. Палата представителей США одобряет запрет на импорт российского урана [Электронды ресурс] // Bloomberg [web-сайт]. – 2023. – URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-12-11/us-house-approves-russian-uranium-import-ban-sending-to-senate> (Қарау уақыты: 01.11.2024).
3. Tharoor, I. Переворот в Нигере привлекает внимание к урану страны [Электронды ресурс] // The Washington Post [web-сайт]. – 2023. – URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2023/08/01/uranium-niger-france-coup/> (Қарау уақыты: 01.11.2024).
4. МАГАТЭ. Ядерная энергетика творит историю, поскольку окончательное соглашение COP28 призывает к более быстрому развертыванию [Электронды ресурс] // IAEA [web-сайт]. – 2023. – URL:



<https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-energy-makes-history-as-final-cop28-agreement-calls-for-faster-deployment> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

5. NEA, IAEA. Уран 2022: ресурсы, производство и спрос. – Париж: OECD Publishing. 2023. – № 11. – С. 101-111

6. Торебаева М. Почему производство урана снижается, а цена растет [Электронды ресурс] // Cronos Asia [web-сайт]. – 2021. – 21 сентября. – URL: <https://cronos.asia/ekonomika/pochemu-dobycha-urana-sokrashhaetsya-a-cena-letit-vverh> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

7. Groves, G. L. R. Now it Can be Told: The Story of the Manhattan Project. – Нью-Йорк: Da Capo Press. –2022. С.141-145

8. World Nuclear Association. Uranium Production Figures, 2013-2022 [Электронды ресурс] // World Nuclear Association Reports [web-сайт]. – URL: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-figures> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

9. АО «НАК «Казатомпром». Отчет «Investor Handout» за 2024 год [Электронды ресурс] // Kazatomprom [web-сайт]. – 2024. – URL: [https://www.kazatomprom.kz/storage/6b/kap\\_investor\\_handout\\_31012025wgelrpmkbrptwidg3lrhr.pdf](https://www.kazatomprom.kz/storage/6b/kap_investor_handout_31012025wgelrpmkbrptwidg3lrhr.pdf) (Қарау уақыты: 01.11.2024).

10. «Казатомпром» завершит строительство урана в 2021 году [Электронды ресурс] // Власть.kz [web-сайт]. – 2019. – 20 августа. – URL: <https://vlast.kz/novosti/34890-kazatomprom-prodolzit-sokrasat-dobycu-urana-v-2021-godu.html> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

11. Даль К. Эластичность спроса и предложения энергии // Энергетическая политика. – 2009. – № 72. –С. 80-84.

12. Грэм Э. Дж. Извращенная реакция предложения в горнодобывающем секторе Либерии [Электронды ресурс] // Всемирный банк [web-сайт]. – 2013. – URL: <https://doi.org/10.1596/1813-9450-6663> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

13. Trieu L. H., Savage E., Dwyer G. Модель мирового рынка урана [Электронды ресурс] // Energy Policy [web-сайт]. – 1994. – Т. 22, № 4. – С. 317–329. – URL: [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90006-X) (Қарау уақыты: 01.11.2024).

14. УхС. Перспективы рынка урана [Электронды ресурс] // УхС [web-сайт]. – 2024. – URL: <https://www.uxc.com/p/product/report/umo> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

15. Schneider E. A., Sailor W. C. Оценки долгосрочных поставок урана [Электронды ресурс] // Техасский университет в Остине и Национальная лаборатория Лос-Аламоса [web-сайт]. – 2008. – URL: <https://doi.org/10.13182/NT08-A3963> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

16. АО «НАК «Казатомпром». Консолидированный годовой отчет за 2023 год [Электронды ресурс] // Kazatomprom [web-сайт]. – 2023. – URL: [https://www.kazatomprom.kz/storage/bd/book\\_2023\\_kap\\_fin\\_ru.pdf](https://www.kazatomprom.kz/storage/bd/book_2023_kap_fin_ru.pdf) (Қарау уақыты: 01.11.2024).

17. Шарипова С. Е. Разработка нейронной сети для прогнозирования влияния фосфора на урожайность яровой пшеницы: докторская диссертация [Электронды ресурс] // [web-сайт]. – 2024. – URL: <https://surl.li/eljyxh> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

18. Statista. Потребление урана в странах-лидерах [Электронды ресурс] // Statista [web-сайт]. – 2024. – URL: <https://www.statista.com/statistics/264796/uranium-consumption-leading-countries/> (Қарау уақыты: 01.11.2024).

## References

1. MAGATE. (2024). Yadernaya energetika v centre vnimaniya COP29, poskol'ku strany i kompanii ishchut resheniya dlya bor'by s izmeneniem klimata. IAEA. Retrieved November 1, 2024, from <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-power-in-the-cop29-spotlight-as-countries-and-companies-eye-climate-solutions>.

2. Bloomberg. (2023). Palata predstavitelej SShA odobryaet zapret na import rossijskogo urana. Retrieved November 1, 2024, from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-12-11/us-house-approves-russian-uranium-import-ban-sending-to-senate>.

3. Tharoor, I. (2023). Perevorot v Nigere privlekaet vnimanie k uranu strany. The Washington Post. Retrieved November 1, 2024, from <https://www.washingtonpost.com/world/2023/08/01/uranium-niger-france-coup/>.



4. MAGATE. (2023). Yadernaya energetika tvorit istoriyu, poskol'ku okonchatel'noe soglasenie COP28 prizyvaet k bolee bystremu razvertyvaniyu. IAEA. Retrieved November 1, 2024, from <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-energy-makes-history-as-final-cop28-agreement-calls-for-faster-deployment>.
5. NEA, IAEA. (2022). Uran 2022: resursy, proizvodstvo i spros. Paris: OECD Publishing. – № 11. – 101-111
6. Torebaeva, M. (2021, September 21). Pochemu proizvodstvo urana snizhaetsya, a cena rastet. Cronos Asia. Retrieved November 1, 2024, from <https://cronos.asia/ekonomika/pochemu-dobycha-urana-sokrashhaetsya-a-cena-letit-vverh>.
7. Groves, G. L. R. (2009). Now it Can be Told: The Story of the Manhattan Project. New York: Da Capo Press. -2022. –141-145
8. World Nuclear Association. (2023). Uranium Production Figures, 2013-2022. World Nuclear Association Reports. Retrieved November 1, 2024, from <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-figures>
9. AO «NAK Kazatomprom». (2024). Otchet «Investor Handout». Retrieved November 1, 2024, from [https://www.kazatomprom.kz/storage/6b/kap\\_investor\\_handout\\_31012025wgelrpmkbrptwidg3lrhr.pdf](https://www.kazatomprom.kz/storage/6b/kap_investor_handout_31012025wgelrpmkbrptwidg3lrhr.pdf).
10. Kazatomprom zavershit stroitel'stvo urana v 2021 godu. (2019, August 20). Vlast.kz. Retrieved November 1, 2024, from <https://vlast.kz/novosti/34890-kazatomprom-prodolzit-sokrasat-dobycu-urana-v-2021-godu.html>.
11. Dahl, C. (2009). Elastichnost' sprosa i predlozheniya energii. Energeticheskaya politika, 72. – 2009. – № 72. – 80-84.
12. Graham, E. G. (2013). Izvrashchennaya reakciya predlozheniya v gornodobyvayushchem sektore Liberii. World Bank Policy Research Working Paper 6663. Retrieved November 1, 2024, from <https://doi.org/10.1596/1813-9450-6663>.
13. Trieu, L. H., Savage, E., Dwyer, G. (1994). Model' mirovogo rynka urana. Energy Policy, 22(4), 317–329. Retrieved November 1, 2024, from [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90006-X).
14. UxC. (2024). Perspektivy rynka urana. Retrieved November 1, 2024, from <https://www.uxc.com/p/product/report/umo>.
15. Schneider, E. A., Sailor, W. C. (2007). Ocenki dolgosrochnykh postavok urana. Texas University at Austin and Los Alamos National Laboratory. Retrieved November 1, 2024, from <https://doi.org/10.13182/NT08-A3963>
16. AO «NAK Kazatomprom». (2023). Konsolidirovannyj godovoj otchet. Retrieved November 1, 2024, from [https://www.kazatomprom.kz/storage/bd/book\\_2023\\_kap\\_fin\\_ru.pdf](https://www.kazatomprom.kz/storage/bd/book_2023_kap_fin_ru.pdf).
17. Sharipova, S. E. (2024). Razrabotka nejronnoj seti dlya prognozirovaniya vliyaniya fosfora na urozhnost' yarovoj pshenicy: doktoral'naia dissertaciya. Retrieved November 1, 2024, from <https://surl.li/eljyxh>.
18. Statista. (2024). Potreblenie urana v stranakh-liderakh. Retrieved November 1, 2024, from <https://www.statista.com/statistics/264796/uranium-consumption-leading-countries/>.

## STRUCTURAL IMBALANCES IN THE GLOBAL URANIUM MARKET AND THEIR POLITICAL IMPLICATIONS

**B. K. Omirzakov<sup>1</sup>, J. Juman<sup>1</sup>, A. Makulova<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>University Narxoz, Almaty, Republic of Kazakhstan

---

### ABSTRACT

*Purpose* – This study provides a comprehensive analysis of the global uranium market and assesses the ability of future supplies to meet growing demand through 2050. The study aims to identify potential imbalances between projected uranium supply and demand, taking into account market and geopolitical factors.

*Methodology* – The study is based on a comprehensive approach that combines econometric analysis and uranium supply curve modeling. Econometric analysis uses a variety of methods to examine the correlation between prices and production volumes, ensuring the reliability of the results. Supply curve modeling shows how uranium availability will change with price changes, allowing for an assessment of market stability under different scenarios.

*Originality / value* – The study analyzes the International Atomic Energy Agency's forecasts and shows that primary uranium production will remain the main resource, despite the contribution from secondary sources. The study also highlights the importance of reviewing production and export policies in uranium-rich countries and ensuring security of supply.

*Findings* – The main conclusion is that a significant imbalance between the projected uranium demand and supply, especially under medium and high demand scenarios, indicates that a potential shortage may arise by 2035. Kazakhstan is expected to take a leading position in the uranium export market by 2050. In addition, political and energy security issues may contribute to the growth of demand for nuclear energy, leading to the formation of new global partnerships and trade routes. The conclusions provide a deep understanding of market dynamics and contribute to the sustainable development of nuclear energy.

*Keywords:* Export potential, uranium supply chain, uranium industry, nuclear energy, uranium economy, uranium market.

## СТРУКТУРНЫЕ ДИСБАЛАНСЫ НА МИРОВОМ РЫНКЕ УРАНА И ИХ ПОЛИТИЧЕСКИЕ ИМПЛИКАЦИИ

Б. К. Омирзаков<sup>1</sup>, Ж. Жуман<sup>1</sup>, А. Т. Макулова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> КазНУ имени аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup> Университет Нархоз, Алматы, Республика Казахстан

---

### АННОТАЦИЯ

*Цель исследования* – В данном исследовании представлен комплексный анализ мирового рынка урана и дана оценка способности будущих поставок удовлетворить растущий спрос до 2050 года. Целью исследования является выявление потенциального дисбаланса между прогнозируемым предложением и спросом на уран с учетом рыночных и геополитических факторов.

*Методология* – Исследование основано на комплексном подходе, сочетающем эконометрический анализ и моделирование кривой предложения урана. Эконометрический анализ изучает корреляцию между ценами и объемом производства с использованием различных методов, обеспечивая надежность результатов. Моделирование кривой предложения показывает, как меняется доступность урана по мере изменения цен, что позволяет нам оценить стабильность рынка при различных сценариях.

*Оригинальность/ценность исследования* – Исследование, анализирующее прогнозы Международного агентства по атомной энергии, показывает, что первичная добыча урана остается основным ресурсом, несмотря на вклад вторичных источников. Кроме того, в исследовании подчеркивается важность пересмотра политики производства и экспорта в странах, богатых ураном, а также обеспечения безопасности поставок.

*Результаты исследования* – Основной вывод заключается в том, что значительный дисбаланс между прогнозируемым спросом и предложением урана, особенно в сценариях среднего и высокого спроса, указывает на то, что к 2035 году может возникнуть потенциальный дефицит. Ожидается, что к 2050 году Казахстан займет лидирующие позиции на рынке экспорта урана. Кроме того, вопросы политической и энергетической безопасности могут способствовать росту спроса на ядерную энергию, что приведет к формированию новых глобальных партнерств и торговых путей. Полученные результаты обеспечивают глубокое понимание динамики рынка и способствуют устойчивому развитию ядерной энергетики.

*Ключевые слова:* экспортный потенциал, цепочка поставок урана, урановая промышленность, атомная энергетика, урановая экономика, рынок урана.

#### Авторлар туралы

**Өмірзақов Бақдәулет Қайратұлы** – докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: bakhdaulet.98@gmail.com

**Жұман Жаппар** – Қазақстан Республикасының еңбек сіңірген қайраткері, ҚР ҰҒА құрметті академигі, экономика ғылымдарының докторы, профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: sad171@mail.ru

**Макулова Айымжан Тулегеновна** – экономика ғылымдарының докторы, профессор, Нархоз Университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiymzhan.makulova@narхоз.kz, ORCID: 0000-0003-0144-0844\*