



Статистика, учет и аудит, 4(99)2025. стр. 134-151

DOI: <https://doi.org/10.51579/1563-2415.2025.-4.10>

Экономикадағы пәнаралық зерттеулер

FTAMP 06.71.63

ӨОЖ 330.15

ҚҰРҒАҚ АЙМАҚТАРДАҒЫ СУАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ СУ-ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН СЦЕНАРИЙЛІК МОДЕЛЬДЕУ: ТҮРКІСТАН ОБЛЫСЫНЫҢ КЕЙСІ

Л.П. Молдашбаева¹, Г.У. Бекманова², Г.О. Байдаулетова^{2*}, Д.А. Куланова²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразиялық Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

*Corresponding author e-mail: gulnur.baidauletova@mail.ru

Аңдатпа. Қазіргі климаттық және ресурстық сын-қатерлер аграрлық жүйелердің су және энергетикалық ресурстарды тұрақты басқарудың жаңа парадигмаларына көшу қажеттілігін өзекті етеді. Бұл проблема су ресурстарының тұрақты тапшылығы, суару жүйелерінің энергия сыйымдылығының жоғары деңгейі және климаттық өзгерістер тарапынан өсіп келе жатқан қысым байқалатын Қазақстан Республикасының Түркістан облысы сияқты құрғақ өңірлер үшін аса маңызды болып отыр. Осы зерттеу агроөнеркәсіп өндірісіндегі су энергетикалық ағындарды стратегиялық жоспарлау және оңтайландыру құралы бола алатын ауыл шаруашылығының су-энергетикалық тиімділігінің интеграцияланған моделін қалыптастыруға және верификациялауға бағытталған. Зерттеудің әдістемелік архитектурасы WEF-Nexus (су-энергия-тамақ) тұжырымдамасына негізделген және кешенді құралдарды қамтиды: ирригациялық инфрақұрылымды геоақпараттық картаға түсіру, ресурстық тиімділікті бағалау үшін data Envelopment analysis (DEA) моделін қолдану, сондай-ақ инвестициялық сценарийлерді экономикалық-математикалық модельдеу. Әзірленген модель агроөндірістік тиімділік, су беру, энергетикалық шығындар және суармалы аумақтардың технологиялық жаңару деңгейі арасындағы жүйелі өзара байланысты ескереді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы кеңістіктік талдаудың пәнаралық интеграциясына, тиімділіктің экономикалық индикаторларына және технологиялық трансформацияларды сценарийлік модельдеуге негізделген аграрлық сектордағы су-энергетикалық тиімділікті бағалау мен басқарудың тұжырымдамалық жаңа тәсілін ұсынудан тұрады. Бұрын белгілі фрагменттік модельдерден айырмашылығы, ұсынылған жүйе жоғары бейімделгіштікке, операциялық ауқымдылыққа және климаттық тәуекелдер мен инфрақұрылымдық шектеулерді есепке алу қабілетіне ие. Модельдеу нәтижелері ұсынылған модельдің әлеуетін айқын көрсетеді: су шығынын 30-40% - га азайту, энергия шығынын 25%-ға төмендету және өнімділіктің 20-35%-ға өсуі. Модель агрополитика саласындағы менеджерлер үшін де, ауыл шаруашылығындағы су-энергетикалық инфрақұрылымды тұрақты дамытуға мүдделі инвесторлар үшін де қолданбалы маңызға ие.

Түйінді сөздер: су-энергетикалық тиімділік, WEF-байланысы, ирригациялық жүйелер, DEA-талдау, тұрақты ауыл шаруашылығы, климаттық тұрақтылық, ресурстарды оңтайландыру, құаң аймақтар.

Негізгі ережелер. Ғылыми мақалада WEF-nexus тұжырымдамасына негізделген суару жүйелерінің су-энергетикалық тиімділігінің интеграцияланған экономикалық моделі ұсынылған. Модель суару технологияларының тиімділігін бағалауға мүмкіндік беретін суды тұтыну, энергия шығыны және өнімділік арасындағы байланысты ескереді.

Cite this article as: Moldashbaeva L., Bekmanova G., Baidauletova G., Kulanova D.A. Scenario modeling of water and energy efficiency of irrigation systems in arid regions: the case of the Turkestan region. *Statistics, accounting and audit*. 2025, 4(99), 134-151. (In Kaz.). DOI: <https://doi.org/10.51579/1563-2415.2025.-4.10>



Ресурстар бірлігіне шаққандағы өнімнің өсімін көрсететін экономикалық су энергия тиімділігі көрсеткіші енгізілді. Түркістан облысының шаруа қожалықтарының мысалында модельді сынақтан өткізу қазіргі заманғы суару әдістері мен баламалы энергетиканы енгізу шығындарды 30%-ға дейін төмендетіп, өнімділікті 35%-ға дейін арттыратынын көрсетті. Өңірлік жағдайлар мен климаттық тәуекелдерді ескере отырып, мелиорациялық жобаларды бағалаудың инвестициялық тетігі әзірленді. Алынған нәтижелер су тапшылығы жағдайында агросектордың тұрақтылығы мен экономикалық тиімділігін арттыру үшін негіз қалыптастырады.

Кіріспе. Орталық Азияның құрғақ аймақтарында тереңдетілген су тұрақсыздығы және аграрлық өндірістің өсіп келе жатқан энергетикалық шығындары ирригациялық инфрақұрылымды басқарудағы жүйелі жетілмегендік проблемасын шиеленістіруде. Атап айтқанда, Қазақстан Республикасының Түркістан облысы сумен қамтамасыз ету және энергия тиімділігі көрсеткіштерінің нашарлауына тұрақты үрдісті көрсетіп отыр, бұл аграрлық өнімділіктің төмендеуіне, өнімнің өзіндік құнының өсуіне және әлеуметтік-экологиялық тәуекелдердің күшеюіне әкеп соғады. Бұл жағдай ресурстардың физикалық тапшылығына да, қолданыстағы реттеу тетіктерінің институционалдық тиімсіздігіне де байланысты.

Суару жүйелерін жаңғыртудың жекелеген бағдарламаларының болуына қарамастан, ғылыми және практикалық жазықтықта тұрақтылықтың экономикалық, су және энергетикалық параметрлерін бір мезгілде ескеруге қабілетті кешенді модельдердің тапшылығы сақталуда. Заманауи зерттеулер салааралық интеграция мен мультифакторлық әсерлерді сценарийлік бағалау қажеттілігін елемей, суды үнемдеудің немесе энергияны үнемдеудің фрагменттік аспектілеріне назар аударады. Бұл су-энергетикалық және экономикалық индикаторларды бірыңғай аналитикалық жүйеге интеграциялауға негізделген жаңа тәсілді әзірлеудің ғылыми және қолданбалы маңыздылығын анықтайды.

Осы зерттеу құрғақ климат жағдайында суару жүйелерінің су-энергетикалық тиімділігін бағалаудың интеграцияланған экономикалық моделін қалыптастыруға және валидациялауға бағытталған. Модель Түркістан облысының мысалында сыналған және индикаторлар кешенін қамтиды: су тапшылығы, суарудың энергия сыйымдылығы, агроэкономикалық өнімділік және жаңғыртудың инвестициялық негізділігі. Әдістемелік негіз жүйелі талдау, экономикалық-математикалық модельдеу және сценарийлік болжау синтезі болып табылады, бұл ирригациялық сектордың тұрақтылық, бейімделу және ресурстық тиімділік бағытында негізделген трансформациясын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Әдебиеттерге шолу. Өсіп келе жатқан климаттық және су қауіптері жағдайында аграрлық өндірістің су-энергетикалық тиімділігін арттыру мәселелері өзектілігін ғана емес, сонымен қатар азық-түлік және ресурстық қауіпсіздік үшін стратегиялық маңызға ие болады. Агросекторды трансформациялаудың заманауи трендтері су және энергетикалық ресурстарды, әсіресе құрғақ және жартылай құрғақ аймақтарда жүйелі басқаруға фрагменттік тәсілден көшуді талап етеді. Бұл тұрғыда өндірістік тиімділік, суды тұтыну және энергия тиімділігі арасындағы байланысты ескеретін интеграцияланған модельдерді әзірлеу өте маңызды болып табылады.

Өзекті шетелдік ғылыми әдебиеттерді талдау ирригациялық басқару саласындағы білімнің пәнаралық шоғырлануының жоғары дәрежесін растайды. Жұмыстарда [1,2] тұрақты басқару модельдерін қалыптастыру кезінде су, энергетика және агроэкономикалық параметрлерді кешенді есепке алу қажеттілігі атап көрсетілген. Атап айтқанда, авторлар сумен жабдықтауды энергия шығындарының динамикасымен



синхрондау механизмдерін зерттейді, бұл шығындарды айтарлықтай азайтуға және су беру режимдерін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Зерттеулерде [3, 4] сорғы станцияларының энергия сыйымдылығы мен өнімділік арасындағы тікелей байланыс дәстүрлі суару жүйелерінің тиімділік шектерін анықтайтыны дәлелденді. Энергия шығыны компоненті негізінде су пайдалануды модельдеу ресурстардың созымалы тапшылығы бар өңірлерде аграрлық саясаттың қолданыстағы парадигмаларын түрлендіруге қабілетті перспективалы бағыт болып көрінеді [5, 6].

Су ресурстарының маусымдық қолжетімділігін, энергетикалық шектеулерді және агро ландшафттардың топырақ-климаттық ерекшеліктерін ескере отырып, су бөлуді оңтайландыру алгоритмдерін әзірлеуге байланысты бағыт ерекше назар аударуға тұрарлық [7, 8]. Су шығыны төмен дәстүрлі суару жүйелері бір мезгілде жүйелі технологиялық жаңғыртуды қажет ететін негізсіз энергия шығындарының көзі болып табылатыны атап өтілді.

Бірқатар соңғы басылымдарда талдау объектісіне айналған «қос ресурстық тиімділік» тұжырымдамасы [9,10] су және энергия өнімділігін бағалауға синергетикалық тәсіл болып табылады. Бұл әдіснамалық вектор климаттық және ресурстық синтезеуіңдерге, әсіресе трансшекаралық су пайдалану жағдайында бейімделу деңгейі жоғары тұрақты агроэкожүйелерді қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Қазақстандық зерттеу контексті осы мәселелерге назар аударудың артып келе жатқанын көрсетеді, алайда әдебиеттерді талдау [11-13] көрсеткендей, отандық академиялық ортадағы зерттеулер негізінен қолданбалы және фрагменттік сипатта болады. Суаруды басқаруда цифрлық шешімдерді қолданудың маңызды әлеуеті анықталды: сенсорлық жүйелер, ГАЖ технологиялары, қашықтықтан зондау, бірақ оларды енгізу институционалды және инфрақұрылымдық жағынан шектеулі.

Отандық ғалымдардың бірқатар еңбектерінде [14,15] су-энергетикалық процестерді басқару тетіктерін институционалды түрлендіру қажеттілігіне баса назар аударылды. Қолданыстағы модельдердің жаңа климаттық және нарықтық жағдайларға бейімделуінің төмен деңгейі, сондай-ақ суармалы шаруашылыққа энергия тиімді технологияларды енгізу үшін экономикалық ынталандырудың тапшылығы атап өтіледі. Су инфрақұрылымын жаңғыртуды субсидиялаудың және инвестициялық сүйемелдеудің тұрақты жүйесін қалыптастыру қажеттілігі ерекше атап өтіледі.

Осылайша, жүргізілген талдау біржақты қорытынды жасауға мүмкіндік береді: бірқатар құнды ғылыми әзірлемелердің болуына қарамастан, су және энергетикалық параметрлерді ирригациялық басқарудың бірыңғай экономикалық-математикалық моделіне интеграциялау мәселелері, әсіресе Орталық Азияның құрғақ аймақтарына қолдануда жеткіліксіз пысықталған күйінде қалып отыр. Бұл тұрақтылық, ресурстық тиімділік және цифрландыру принциптеріне негізделген суаруды стратегиялық басқарудың адаптивті модельдерін әзірлеуге бағытталған әрі қарайғы зерттеулердің жоғары ғылыми және қолданбалы маңыздылығын анықтайды.

Материалдар мен әдістер. Зерттеудің эмпирикалық бөлігі аймақтың әртүрлі климаттық аймақтарындағы суару желілерінің энергия сыйымдылығы, суды тұтыну және өнімділік бойынша бастапқы деректерді жинауға және өндеуге негізделген. Су-энергетикалық тиімділік деңгейі мен ауылшаруашылық өндірісінің экономикалық нәтижелері арасындағы корреляцияны анықтау үшін статистикалық өндеу және регрессиялық талдау (OLS, GLS) әдістері қолданылды. ГАЖ технологиялары (ArcGIS) модельді кеңістіктік тексеру және сыни осал аймақтарды бөлектеу үшін де қолданылды.



ESG-факторларын модельдік архитектураға біріктіру үшін аграрлық шаруашылықтардың стратегиялық құжаттары мен корпоративтік есептілігінің контент-талдауы пайдаланылды. Бұл институционалдық шектеулерді, стейкхолдерлердің сұраныстарын және ұлттық және өңірлік деңгейлерде өзектендірілген орнықты даму мақсаттарын есепке алуға мүмкіндік берді.

Суару жүйелерінің салыстырмалы тиімділігін бағалау үшін data Envelopment Analysis (DEA) әдістемесі қолданылды, бұл көп параметрлік кірістерді (су, энергия және инвестиция шығындары) және шығыстарды (кірістілік және экономикалық кірістілік көрсеткіштері) бір модельде есепке алуға мүмкіндік береді. DEA суару инфрақұрылымының ең тиімді және проблемалы аймақтарын анықтауға және ресурстарды пайдалануды оңтайландыру бойынша ұсыныстар жасауға мүмкіндік берді.

Сценарийлік модельдеу 2035 жылға дейінгі кезеңдегі су-энергетикалық тиімділік динамикасын және ауылшаруашылық алқаптарының өнімділігін болжау үшін пайдаланылды. Үш стратегиялық сценарий құрылды: негізгі (ағымдағы параметрлерді сақтау), инновациялық (жаңа технологияларды енгізу және ресурстардың жоғалуын азайту) және дағдарыстық (инфрақұрылымның нашарлауы және шығындардың артуы). Сценарийлік модельдеу инвестициялық, технологиялық және климаттық факторлардың агроэкожүйелердің тұрақтылығына әсерін жан-жақты бағалауды қамтамасыз етті.

Әдістердің кешенін қолдану модельдің жоғары репрезентативтілігін қамтамасыз етті және экономикалық, экологиялық және институционалдық факторларды ескере отырып, су-энергетикалық тиімділікті арттыру әлеуетін кешенді бағалауға, сондай-ақ өңірдің ирригациялық жүйелерін тұрақты дамыту үшін басқару шешімдерін әзірлеуге мүмкіндік берді.

Нәтижелер және талқылау. Агроөндірістің су-энергетикалық тиімділігін бағалау тәсілдерін трансформациялау нормативтік және модельдік конструкциялардан тыс шығуды талап етеді. Құрғақ ауылшаруашылық аймақтарына тән жүйелік белгісіздік жағдайында тек эмпирикалық расталған тәуелділіктер аймақтық және ұлттық деңгейде басқарушылық шешімдер қабылдауға негіз бола алады. Сондықтан бұл зерттеуде суару агрожүйелеріндегі нақты өндірістік процестерді көрсететін нақты дәлелдерге баса назар аударылады.

Суды пайдалану экономикасымен және шаруа қожалықтарындағы энергетикалық жүктемемен тығыз байланысты сипаттамаларға - бұрын отандық және аймақтық тәжірибеде үзік-үзік және аналитикасыз қарастырылған параметрлерге ерекше назар аударылады. Өндірістік есептілікті, инвестициялық метрикаларды, су ресурстарының таралу мониторингін және қашықтықтан зондау деректерін қоса алғанда, табиғаты бойынша әртүрлі ақпарат көздерін пайдалану мелиорациялық жүйелердің динамикада жұмыс істеу ерекшелігін барабар көрсететін көп параметрлі базаны құруға мүмкіндік берді.

Төменде келтірілген нәтижелер қолданыстағы суару практикасына тән трендтер мен шектеулерді анықтап қана қоймай, сонымен қатар ресурстарды үнемдеу, технологиялық бейімділік және өндірістік әлеуетті тұрақты молайту қағидаттарына негізделген басқарудың интеграцияланған модельдеріне көшу қажеттілігін негіздеуге мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл суға тәуелділік деңгейі жоғары өңірлерде аграрлық инфрақұрылымды жаңғыртудың ғылыми негізделген стратегияларын әзірлеу үшін мүмкіндіктер ашады.

Жүйелі талдау мақсатында алты жылдық кезеңдегі динамикадағы ирригациялық егіншіліктің су-энергетикалық тиімділігінің жай-күйін сипаттайтын негізгі көрсеткіштер жинақталып, салыстырылды. Мұндай уақытша іріктеу сыртқы факторларға



(гидрологиялық жағдайлар, инвестициялық белсенділік, баға конъюнктурасы) байланысты қысқа мерзімді ауытқуларды да, аграрлық субъектілердің технологиялық бейімделуіне байланысты тұрақты трендтерді де анықтауға мүмкіндік берді.

Төмендегі кестеде зерттелетін агроөнеркәсіптік кәсіпорындардың өндірістік, ресурстық және кеңістіктік сипаттамаларын қамтитын негізгі параметрлер бойынша орташа жылдық мәндер келтірілген. Сумен жабдықтау тиімділігін, энергия тұтыну қарқындылығын, технологиялық инвестициялар деңгейін және егіс алқаптарының вегетациялық белсенділігін көрсететін индикаторларға ерекше назар аударылады. Мұндай құрылым өсіп келе жатқан ресурстық қысым жағдайында аймақтың аграрлық инфрақұрылымының жай-күйінің эволюциясы туралы тұтас түсінік береді (1-кесте).

Жалпыланған деректерді талдау ирригациялық егіншілікті модернизациялаудың жекелеген аспектілеріндегі прогресті де, құрылымдық шектеулерді де көрсететін көп бағытты тенденциялардың болуын көрсетеді.

Біріншіден, су тұтынудың үдемелі өсуі байқалады: 2019 жылы 6,20 мың м³/га-дан 2024 жылы 8,35 мың м³/га-ға дейін. Бұл үрдіс суармалы алқаптар аумағының кеңеюін ғана емес, сонымен қатар суды көп қажет ететін дақылдарға көшуді немесе суды пайдаланудың қатаң лимиттері болмаған жағдайда ресурстарды тиімсіз басқаруды да көрсетуі мүмкін.

Екіншіден, суару процесінің энергия сыйымдылығы орташа төмендеуді көрсетті: 2019 жылы 4,41 ГДж/га-дан 2024 жылы 3,69 ГДж/га-ға дейін. Бұл ескірген сорғы жабдықтарын ішінара ауыстыруды, энергияны үнемдейтін технологияларды енгізуді (соның ішінде тамшылатып суару) және энергия көздерін әртараптандыруды көрсетуі мүмкін.

2019-2024 жылдардағы ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігі 55,2-ден 67,5 ц/га-ға дейін өзгерді. 2020-2021 жылдары ауа-райының қолайсыздығына және жаңғыртудың бейімделу қиындықтарына байланысты төмендеу байқалды. 2024 жылға қарай өнімділік 62,7 ц/га дейін өсті, бұл сумен қамтамасыз етуді жақсартумен және заманауи агротехнологияларды қолданумен байланысты болуы мүмкін.

1 кесте – Түркістан облысы агроөнеркәсіп кешендерінің су-энергетикалық тиімділігінің негізгі көрсеткіштері

Жыл	Су тұтыну (мың м ³ /га)	Энергия тұтыну (ГДж/га)	Өнімділік (ц/га)	Инвестициялар (млн тг/га)	Су шығыны (%)	Баламалы энергия (%)	NDVI индексі
2019	6,20	4,41	67,54	2,89	31,01	13,04	0,50
2020	6,39	4,02	55,24	1,79	20,83	8,49	0,62
2021	7,26	3,45	56,66	2,73	28,52	10,08	0,54
2022	6,50	3,73	65,80	1,61	26,74	15,51	0,55
2023	7,64	3,82	57,77	1,68	31,56	8,32	0,57
2024	8,35	3,69	62,66	2,75	28,42	15,55	0,63

Ескерту: кестеде келтірілген параметрлерді есептеу сипаттамалық статистика, нормативтік модельдеу, сондай-ақ геоаппараттық талдау (NDVI есептеу үшін) әдістерін біріктіретін интегралды аналитикалық тәсіл негізінде орындалады (<https://stat.gov.kz>, <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo-water>, <https://primeminister.kz> мәліметтер бойынша есептелген)

Суару жүйелеріне инвестициялар 2024 жылы 2,75 млн тг/га-ға жетіп, өткен жылдардағы көрсеткіштерден асып түсті. Бұл мемлекеттік бағдарламалардың қолдауымен жаңғырту үдерістерінің қайта жанданғанын айғақтайды.

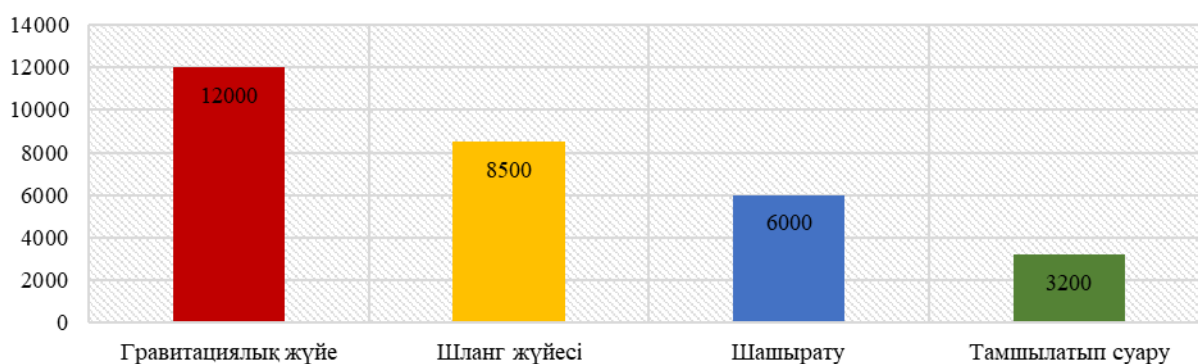
Каналдардағы судың шығыны тұрақты түрде жоғары болып қалады (26-32%), бұл су тарату желілерін қайта құру қажеттілігін көрсетеді. Баламалы энергияны, әсіресе күн



сорғыларын пайдалану 2024 жылы 15,6%-ға дейін өсті, бұл орталықтандырылмаған энергия шешімдеріне қызығушылықты көрсетеді.

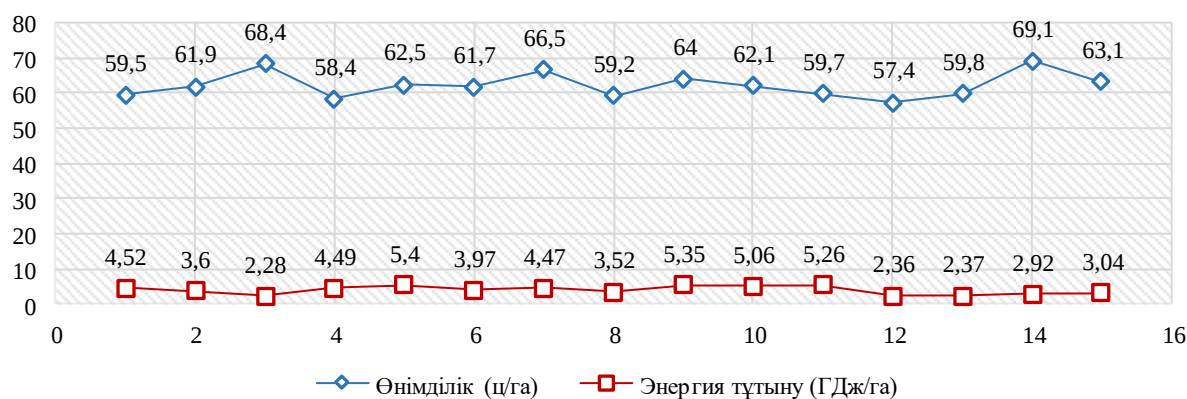
NDVI индексі 0,50-0,63 аралығында тұрақты түрде өзгереді. Оның 2024 жылы өсуі суару режимін оңтайландырудың арқасында дақылдардың жақсы вегетациялық күйін көрсетеді.

Су тапшылығы жағдайында тиімді сумен жабдықтау технологиясын таңдау өте маңызды. Эмпирикалық дәлелдер дәстүрлі гравитациялық жүйелердің ең үлкен шығындармен ерекшеленетінін көрсетеді, ал тамшылатып және жаңбырлатып суару ресурстарды үнемді пайдалануды қамтамасыз етеді (1-сурет).



1 сурет - Сумен жабдықтау түрі бойынша орташа су тұтыну (м³/га)

Ескерту: талдау ҚР Экология және табиғи ресурстар министрлігі
<https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo?lang=ru> ұсынған жалпыланған статистикалық мәліметтерге негізделген



2 сурет – Түркістан облысы кәсіпорындары бойынша энергия тұтыну және өнімділік

Ескерту: 1) зерттелген аграрлық кәсіпорындардың деректері бойынша авторлық есептеулер; 2) өнімділік және энергия тұтыну мәндері модельденген мәліметтер негізінде 15 агроөнеркәсіп бойынша ұсынылған. Көрсеткіштер ауданы бойынша нормаланған (1 гектарға есептегенде) және пайдаланылатын технологиялардың энергия тиімділігінің өзгергіштігін көрсетеді. Есептеу рұқсат етілген диапазондарда кездейсоқ генерациялау әдісімен жүзеге асырылады: өнімділік үшін 55-70 ц/га және энергия тұтыну үшін 500-1500 кВт·сағ/га

2-суретте көрсетілген нәтижелер су берудің технологиялық әдістерімен салыстырғанда гравитациялық суарудың су шығыны әлдеқайда жоғары екенін айқын көрсетеді. Бұл қорытынды, әсіресе Қазақстанның оңтүстік өңірлерінде су тапшылығының күрт күшеюі жағдайында, тамшылатып және жаңбырлатып суару



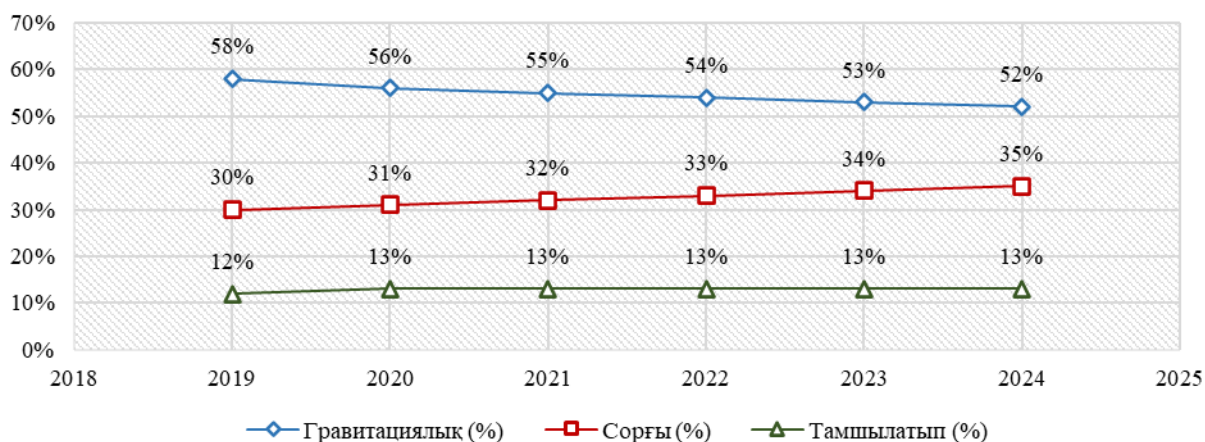
жүйелерін жедел енгізудің өзектілігін растайды. Су-энергетикалық тиімділікті арттыру тек инфрақұрылымды жаңғыртуды ғана емес, сонымен қатар басқарушылық тәсілді қайта қарауды қажет етеді: экстенсивті шығындарға негізделген тәжірибеден жерді тұрақты пайдалану қағидаттарына сүйенген ресурстарды адаптивті басқаруға көшу маңызды.

Агроөндіріс тиімділігін бағалаудың маңызды құрамдас бөлігі – энергия тұтыну мен өнімділік арасындағы өзара байланыс. Ұсынылған деректер жоғары өнімділік әрқашан энергия шығындарының артуын талап етпейтінін көрсетеді. Бұл құбылыс қолданылатын технологиялардың энергия тиімділігі деңгейіндегі, автоматтандыру дәрежесіндегі және кәсіпорындардағы инновациялық шешімдердің енгізілуіндегі айырмашылықтармен түсіндіріледі.

Ұсынылған деректер энергия тұтыну деңгейі мен дақылдардың өнімділігі арасында тұрақты оң корреляцияның жоқтығын көрсетеді. Кейбір жағдайларда жоғары өнімділікке энергияның қалыпты шығындарымен қол жеткізіледі, бұл қолданылатын технологиялардың энергия тиімділігінің әр түрлі деңгейін көрсетеді. Мұндай өзгергіштік аграрлық сектордағы өндірістік нәтижелер энергия тұтыну көлеміне емес, пайдаланылатын техникалық шешімдердің сапасына және ресурстарды басқарудың тиімділігіне байланысты екенін растайды. Нәтижелер тұрақты ауыл шаруашылығына көшу жағдайында энергия шығындарын бағалау мен оңтайландыруға сараланған көзқарастың қажеттілігін көрсетеді.

Сумен жабдықтау түрін ұтымды таңдау аграрлық өндірістің су және энергия тиімділігіне тікелей әсер ететін суару жүйелерін басқарудың маңызды элементі болып табылады. 2019-2024 жылдардағы сумен жабдықтау құрылымын эмпирикалық талдау суарудың технологиялық базасының өзгеруінің тұрақты тенденциясын байқауға мүмкіндік береді (3-сурет).

Бүкіл кезеңде гравитациялық жүйелер үлесінің төмендеуі байқалады - 2019 жылғы 58%-дан 2024 жылы 52%-ға дейін. Бұл су ресурстарының тапшылығы мен климаттық тәуекелдердің артуы жағдайында олардың төмен тиімділігі туралы хабардарлықты көрсетеді. Сонымен қатар, сорғы жүйелерінің үлес салмағы (30%-дан 35%-ға дейін) артады, бұл агроөнеркәсіптердің суды икемді және басқарылатын бөлуге деген ұмтылысын көрсетеді. Тамшылатып суару тұрақты көрсеткіштерді көрсетеді (13% деңгейінде), сумен қамтамасыз етудің ең технологиялық, бірақ қаржылық жағынан қымбат әдісі болып қала береді.



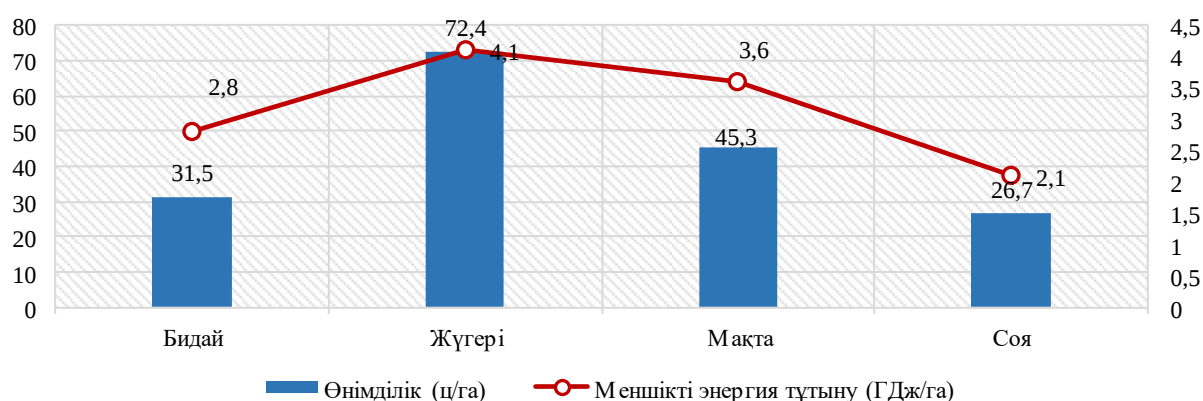
3 сурет - Түркістан облысы кәсіпорындары бойынша энергия тұтыну және өнімділік



Ескерту: 1) зерттелген аграрлық кәсіпорындардың деректері бойынша авторлық есептеулер; 2) ұсынылған мәндер жіктеуге негізделген суару алаңдарының жалпы құрылымында сумен жабдықтаудың әр түрінің үлес салмағын көрсетеді: гравитациялық, сорғы және тамшылатып су беру

Мұндай динамика су шығынын азайтуға және суару режимдерін оңтайландыруға ықпал ететін энергияны көп қажет ететін, бірақ тиімдірек технологияларға басымдықтардың біртіндеп ауысуын көрсетеді.

Ресурстардың шектеулілігі жағдайында өнімділік пен нақты энергия тұтынудың арақатынасын бағалау агротехнологиялардың тиімділігін талдаудың негізгі құралына айналады. Ұсынылған деректер 4-суретте суармалы жерлерде өсірілетін ауыл шаруашылығы дақылдарының энергия тиімділігіндегі айырмашылықтарды анықтауға мүмкіндік береді.



4 сурет - Дақылдар бойынша өнімділік және меншікті энергия тұтыну

Ескерту: 1) зерттелген аграрлық кәсіпорындардың деректері бойынша авторлық есептеулер; 2) Меншікті энергия тұтыну (ГДж/га) егіс алаңының бірлігіне энергияның барлық түрлерінің (электр энергиясы, дизель отыны, сорғы жабдығы) жиынтық шығындары ретінде есептелген. Өнімділік бойынша деректер (ц/га) 2019-2024 жылдар кезеңінде зерттеуге қатысатын кәсіпорындар бойынша орташа өлшенген көрсеткіштер негізінде негізгі дақылдар бөлінісінде ұсынылған

Ұсынылған деректер әртүрлі ауыл шаруашылығы дақылдары арасында 1 гектарға шаққандағы меншікті энергия тұтынудың өзгергіштігін анықтауға және оны өнімділікпен салыстыруға мүмкіндік береді. Энергия шығындары мен агрономиялық өнімділік арасындағы байқалған диспропорция ресурстарды оңтайландыру тұрғысынан маңызды болып табылатын дақылдардың энергия шығынында айтарлықтай айырмашылықтардың болуын көрсетеді.

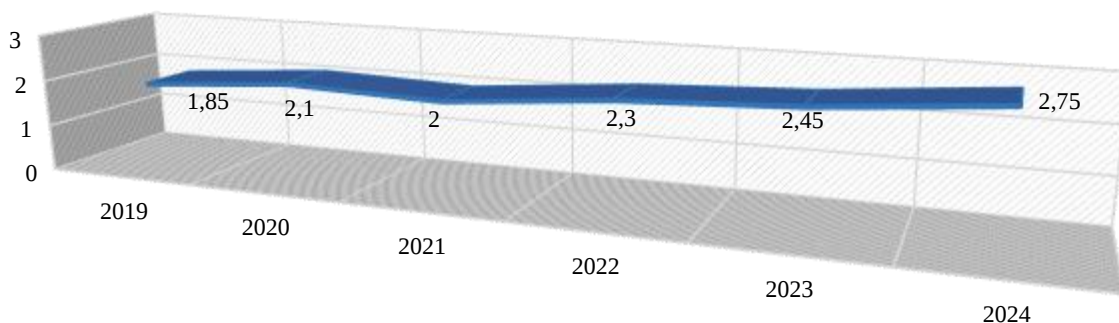
Сонымен, жүгеріге жұмсалатын энергия шығындарының салыстырмалы түрде жоғары деңгейінде (12 ГДж/га-дан астам) оның өнімділігі ең жоғары мәндерге жетеді, бұл энергияның өтелуінің жоғары деңгейін құрайды. Керісінше, соя мен арпа сияқты энергия шығыны төмен дақылдар өнімділіктің төмендеуімен сипатталады, бірақ шектеулі ресурстарда тұрақты тиімділікті қамтамасыз етеді.

Анықталған арақатынастар егіс құрылымдарын жоспарлау кезінде, сондай-ақ су және отын-энергетикалық ресурстардың шектеулілігі жағдайында энергия үнемдейтін агроөнеркәсіптік кешен бағдарламаларын әзірлеу кезінде энергия экономикалық тиімділігін бағалау әдістерін интеграциялау қажеттілігін көрсетеді.

Климаттық тәуекелдердің шиеленісуі және су ресурстарына қысымның артуы жағдайында ауыл шаруашылығының тұрақты дамуы ирригациялық инфрақұрылымды жаңғыртуға басымдық беруді талап етеді. Осы бағыттағы прогрестің негізгі



индикаторларының бірі технологиялық жаңару деңгейін, мемлекеттік және жеке ресурстардың тартылу дәрежесін, сондай-ақ агроөнеркәсіптердің ресурстық және энергетикалық тиімділікті арттыруға мүдделілігін көрсететін суару жүйелеріне арналған инвестициялық шығындар болып табылады. Төменде ұсынылған 5-сурет агроинженерлік орта трансформациясының жалпы тенденцияларын бағалауға мүмкіндік беретін 2019-2024 жылдар кезеңінде 1 гектарға суаруды жаңғыртуға салынған инвестициялардың динамикасын көрсетеді.



5 сурет – Суару жүйелерін жаңғыртуға арналған инвестициялық шығындар\N (млн тенг / га)

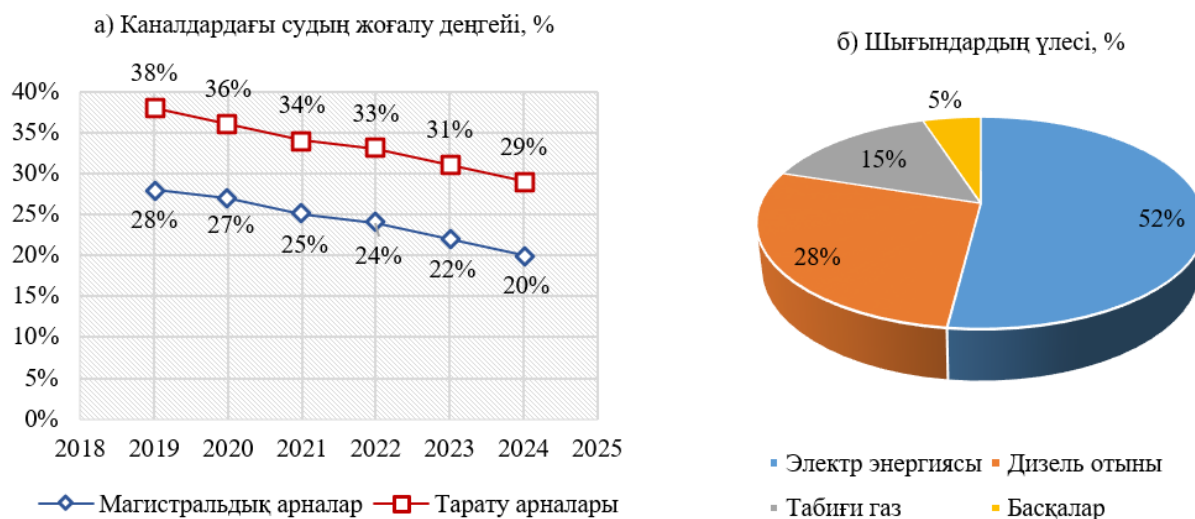
Ескерту: 1) зерттелген аграрлық кәсіпорындардың деректері бойынша авторлық есептеулер; 2) Есептеулер инфляциялық түзетуді ескере отырып, 2019-2024 жылдардағы агроөнеркәсіптік кәсіпорындардың есептік деректері негізінде орындалды. Модернизацияланған аудандардың көлеміне байланысты Күрделі салымдарды дисконттау тәсілі әдіснамалық түрде қолданылды

Бұл тренд бірқатар факторларға байланысты болуы мүмкін: (1) Энергия тиімді тамшылатып және жаңбырлатып суару жүйелерін белсенді енгізу; (2) суару жөніндегі инвестициялық жобаларды мемлекеттік субсидиялауды күшейту; (3) агроөнеркәсіптерді су тапшылығының өзгермелі жағдайларына бейімдеу. Сонымен қатар, инвестициялардың байқалған ұлғаюы олардың тиімділігін одан әрі бағалауды талап етеді, әсіресе кірістілік, энергияны тұтыну және салынған капиталды қайтару контекстінде.

Осылайша, кесте агросектордағы су ресурстарын басқарудың институционалдық және инвестициялық тәсілінің қолданыстағы трансформациясын растайды және су-энергетикалық және агроэкономикалық тиімділік тұрғысынан модернизациядан түскен кірісті жүйелі бағалау қажеттілігін көрсетеді.

Аграрлық өңірлерде су және энергетика ресурстарының тапшылығының күшеюі жағдайында ирригациялық жүйелердің жұмыс істеу тиімділігін кешенді бағалау ерекше өзекті болып отыр. Бұл үшін магистральдық және тарату арналарындағы судың жоғалуын да, энергия шығындарының құрылымын да талдау маңызды.

Бұдан әрі ұсынылған ба және бб-суреттер ресурс тиімділігін арттырудың негізгі бағыттарын анықтауға мүмкіндік береді: Біріншіден, техникалық жаңғырту және су айналымын басқаруды арттыру нәтижесінде су шығынын азайту динамикасы; екіншіден, пайдалану шығындарының құрылымындағы электр энергиясының басым мәні, бұл сумен жабдықтаудың энергия үнемдеу технологияларына көшу қажеттілігін анықтайды.



6 сурет - Суару арналарындағы су шығыны деңгейі мен энергия шығындарының құрылымы (%)

Ескерту: 1) зерттелген аграрлық кәсіпорындардың деректері бойынша авторлық есептеулер; 2) Су шығыны деңгейі бойынша деректер Су шаруашылығы ұйымдарының 2019-2024 жылдардағы есептері негізінде жинақталған және магистральдық және тарату учаскелеріндегі ағып кетулердің есептеулерін берілген судың жалпы көлемінің пайызымен қамтиды. Энергия ресурстарына арналған шығындардың құрылымы кәсіпорындардың электр энергиясына, дизель отынына және суармалы алқаптың 1 гектарына қайта есептегенде есептелген өзге де көздерге жұмсайтын шығындарының орташа өлшенген мәндерін көрсетеді. Есептеулер құрғақ аймақтардағы 42 агроөнеркәсіп кешенінен іріктеу бойынша орташалау әдісімен орындалды.

Ұсынылған суреттер суару инфрақұрылымының жұмысының екі маңызды аспектісін көрсетеді. Магистральдық және тарату арналарындағы су шығыны деңгейінің төмендеуі жүйелердің біртіндеп жаңарғанын көрсетеді, ал энергия шығындарының құрылымы сумен қамтамасыз етудегі электр энергиясының басым рөлін көрсетеді, бұл энергия тиімділігіне көбірек назар аударуды қажет етеді.

Су ресурстарының өсіп келе жатқан тапшылығы жағдайында ирригациялық жүйелердің жұмыс істеу тиімділігін кешенді бағалау мақсатында жерді қашықтықтан зондтау (NDVI) деректеріне, энергия және су тұтынудың экономикалық көрсеткіштеріне, сондай-ақ инвестициялық және пайдалану шығындарының құрылымына негізделген интеграцияланған талдау жүзеге асырылды.

Геоақпараттық талдауды қолдану ауылшаруашылық жерлерінің кеңістіктік сипаттамаларын егжей-тегжейлі көрсетуге мүмкіндік берді, ал жиынтық статистикалық параметрлер суару жүйесіндегі трансформациялық процестердің динамикасын жыл аралық аралықта көрсетеді.

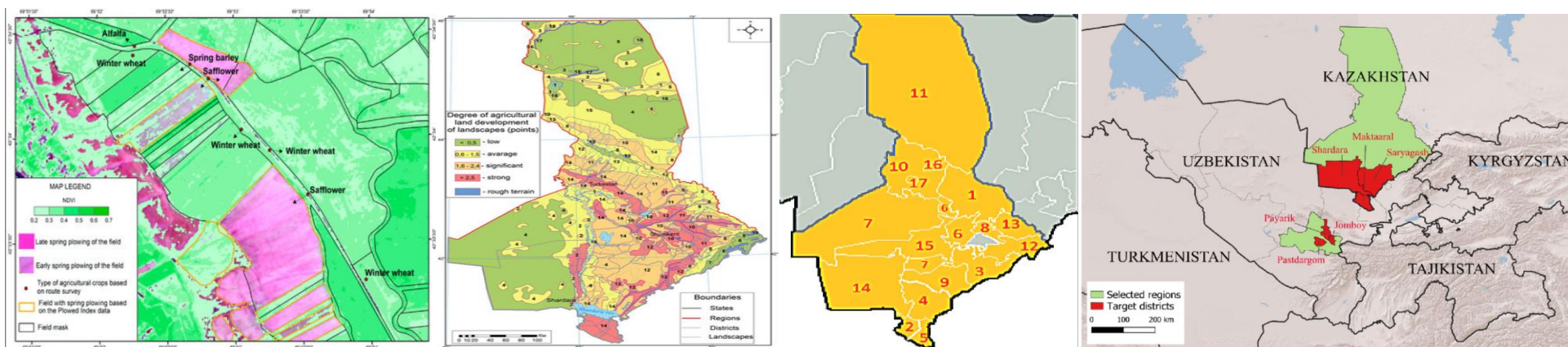
Ұсынылған жиынтық кестес егіс өнімділігін арттырудың, су шығыны мен энергия шығынын азайтудың, сондай-ақ суару инфрақұрылымын жаңғырту бойынша инвестициялық белсенділіктің өсуінің негізгі үрдістерін байқауға мүмкіндік береді (кесте 2).



2 кесте – Суару жүйелерінің тиімділігінің кешенді көрсеткіштері, 2019-2024 жж.

Жыл	NDVI (орташа)	Су шығыны (%)	Энергия тұтыну (ГДж/га)	Өнімділік (ц/га)	Инвестиция (мын. тг/га)	Электр энергиясына шығын (%)
2019	0,46	27,4	3,8	3,8	94,1	52,9
2020	0,48	25,9	4,1	4,1	106,4	49,7
2021	0,51	23,8	4,0	4,0	113,8	47,1
2022	0,53	21,5	3,6	3,6	124,5	44,2
2023	0,56	19,3	3,3	3,3	138,9	41,8
2024	0,59	17,2	3,1	3,1	152,3	39,4

Ескерту: 1) NDVI маусымдық агрегациясы бар Sentinel-2 спутниктік суреттерінен жасалған. Судың жоғалуы магистральдық және тарату арналарындағы ағып кетуді көрсетеді. Энергия тұтыну және инвестициялық шығындар суармалы алқаптың гектарына қайта есептеліп берілді; 2) Деректер құрғақ аудандардың 42 агроөнеркәсіп кешені бойынша орташаланған бөліністе ұсынылған.





Кестеде келтірілген деректерді талдау суару жүйелерінің тиімділік көрсеткіштеріндегі кеңістіктік-уақыттық айырмашылықтарды көрсетеді. Меншікті энергия тұтынудың (ГДж/га) төмендеуі аясында NDVI орташа мәнінің артуы аграрлық өндірістің ресурстық тиімділігін арттырудағы оң үрдісті көрсетеді. Сонымен бірге магистральдық және тарату арналарында су шығынының азаюы байқалады, бұл сумен жабдықтауды басқарудың заманауи технологияларын енгізуге және сумен жабдықтаудың неғұрлым тұрақты түрлеріне, атап айтқанда тамшылатып және локализацияланған суаруға көшуге байланысты болуы мүмкін.

Сонымен қатар, суару инфрақұрылымын қайта құруға инвестициялар үлесінің өсуі негізгі дақылдар бойынша өнімділіктің (ц/га) ұлғаюымен байланысты, бұл су шаруашылығы секторына күрделі салымдардың мультипликативті сипатының әсерін көрсетеді. ГАЗ деректеріне негізделген кеңістіктік талдау суды үнемдеу іс-шараларын басымдықпен жоспарлауға негіз болатын өнімділік пен су шығынының шоғырлану әлеуеті жоғары аймақтарды одан әрі анықтауға мүмкіндік береді. Осылайша, көрсеткіштер жиынтығы технологиялық, экологиялық және экономикалық факторлардың синтезіне негізделген суару жүйелерін модернизациялаудың кешенді тәсілінің қажеттілігін растайды.

Су-энергетикалық ресурстардың өсіп келе жатқан тұрақсыздығымен және климаттық жағдайлардың өзгеруімен сипатталатын қазіргі жағдайда суару жүйелерінің тұрақты жұмыс істеуі құрғақ аймақтардың азық-түлік қауіпсіздігі мен агроэкономикалық тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін стратегиялық маңызға ие болады. Су пайдалану және агроөнеркәсіптік кешен саласында негізделген басқару шешімдерін әзірлеу үшін статикалық бағалаудан тәуекелдер мен мүмкіндіктердің кең спектрін ескеруге қабілетті динамикалық болжамға көшу қажет.

Жоғарыда аталған факторларды ескере отырып, осы зерттеу шеңберінде орта мерзімді перспективада суару жүйелерін дамытудың баламалы траекторияларын модельдеуге мүмкіндік беретін сценарийлік модельдеуге негізделген тәсіл әзірленді.

Бұл тәсіл статус-квоны сақтаудан бастап инновациялық технологиялық шешімдерді енгізуге немесе инфрақұрылымның тозуы мен сумен жабдықтаудың нашарлауына байланысты дағдарыстық құбылыстардың басталуына дейінгі әртүрлі басқару стратегияларының салдарын кешенді бағалауды қамтамасыз етеді (3-кесте).

Біздің зерттеуімізде модельдеу үш стратегиялық сценарий бойынша жүргізіледі - базалық, инновациялық және дағдарыстық - олардың әрқайсысы сумен қамтамасыз етудің нақты жағдайларын, технологиялық жаңғырту дәрежесін және агрожүйелердің күтілетін өнімділігін көрсетеді. Модельдеу 2035 жылға дейінгі кезеңді қамтиды және инвестициялық және климаттық факторлардың динамикасын ескере отырып, өнімділік, су тұтыну және энергия тиімділігі бойынша болжамды қамтиды.



3 кесте – Суармалы егіншілік жүйесіндегі өнімділіктің, су тұтынудың және энергия шығымдылығының сценарийлік болжамы, 2024-2035 жж.

Жыл	Инновациялық сценарий			Негізгі сценарий			Дағдарыс сценарийі		
	Өнімділік (ц/га)	Су тұтыну (м3 / с)	Энергия тиімділігі (ц/ГДж)	Өнімділік (ц/га)	Су тұтыну (м3 / с)	Энергия тиімділігі (ц/ГДж)	Өнімділік (ц/га)	Су тұтыну (м3 / с)	Энергия тиімділігі (ц/ГДж)
2024	100,00	120,00	2,100	100,00	120,00	2100	100,00	120,00	2,100
2025	102,00	117,00	2,163	101,00	120,00	2,121	95,50	122,40	2,058
2026	104,04	114,08	2,223	102,01	120,00	2,142	97,02	124,85	2,017
2027	106,12	111,23	2,295	103,03	120,00	2,163	95,57	127,35	1,977
2028	108,24	108,45	2,364	104,06	120,00	2,185	94,14	129,90	1,937
2029	110,41	105,74	2,435	105,10	120,00	2,207	92,72	132,50	1,898
2030	112,62	103,10	2,508	106,15	120,00	2,229	91,33	135,15	1,860
2031	114,87	100,52	2,583	107,21	120,00	2,251	89,96	137,85	1,823
2032	117,17	98,01	2,660	108,28	120,00	2,274	88,51	140,61	1,786
2033	119,51	95,56	2,740	109,36	120,00	2,297	87,18	143,42	1,750
2034	121,90	93,18	2,822	110,45	120,00	2,320	85,87	146,29	1,715
2035	124,34	90,86	2,906	111,55	120,00	2,343	84,58	149,22	1,681

Ескерту: 1) Болжамды мәндер үш сценарий траекториясы жағдайында суды пайдалану, энергия тиімділігі, инвестициялық тиімділік және агроөндірістік тиімділік динамикасын ескеретін авторлық модель негізінде есептелген: базалық (ағымдағы параметрлерді сақтай отырып), инновациялық (суару жүйелерін технологиялық жаңартумен және ресурстардың ысырабын қысқартумен) және дағдарыстық (сумен жабдықтаудың нашарлауымен және шығындардың өсуімен); 2) Есептеулер 2019-2024 жылдардағы Түркістан облысының ауыл шаруашылығы алқаптары бойынша Экономикалық-математикалық талдаумен және NDVI кеңістіктік деректерімен ұштастыра отырып, сценарийлік модельдеу әдісін пайдалана отырып орындалды. NPV және IRR көрсеткіштері 2024 жылы белгіленген бағамен, 10% жеңілдікпен ұсынылған.

Жүргізілген сценарийлік модельдеу ирригациялық жүйелерді дамытудың үш балама траекториясы: базалық, инновациялық және дағдарыс жағдайында аграрлық өндірістің су-энергетикалық тиімділігінің негізгі параметрлерінің динамикасына сандық баға алуға мүмкіндік берді. Бағалау 2024 жылдан 2035 жылға дейінгі кезеңді қамтиды және агрожүйелердің ресурстық және технологиялық тұрақтылық деңгейін көрсететін өнімділік, суды нақты тұтыну және энергия тиімділігі болжамын қамтиды.

Нәтижелерді талдау инновациялық сценарий барлық негізгі көрсеткіштер бойынша ең үлкен оң динамиканы көрсететінін көрсетеді. 2035 жылға қарай өнімділік базалық деңгеймен салыстырғанда 24,3%-ға артады, бұл ретте меншікті су тұтынудың 25%-ға жуық тұрақты төмендеуі байқалады, бұл ресурс үнемдеудің жоғары дәрежесін көрсетеді. Бұл сценарийде энергия тиімділігі 38%-дан астамға артады, бұл дәл суаруды, автоматтандырылған басқаруды және адаптивті агротехнологияларды енгізу арқылы аграрлық өндіріс тиімділігінің айтарлықтай артуын көрсетеді.

Негізгі сценарий суды тұтынудың тұрақты деңгейін сақтай отырып, өнімділіктің орташа өсуін (2035 жылға қарай шамамен 11,5%) көрсетеді. Энергия шығынын арттыру тегіс және негізінен инерциялық технологиялық дамуға байланысты. Мұндай сценарий консервативті тәсілдің әсерін көрсетеді, онда модернизация эпизодтық түрде жүзеге асырылады және институционалдық қолдау шектеулі.

Дағдарыс сценарийі, керісінше, деградациялық тенденцияларды көрсетеді. 2035 жылға қарай өнімділік 15%-дан астамға төмендейді, меншікті су тұтыну шамамен 25%-ға



артады және энергия тиімділігі сыни шектен төмен түседі, бұл жүйенің жоғары ресурстық және экономикалық тиімсіздігін көрсетеді. Бұл өзгерістер суару желілерінің инфрақұрылымдық жағдайының нашарлауына, сумен жабдықтаудың энергия сыйымдылығының өсуіне және технологиялық инвестициялардың болмауына байланысты болуы мүмкін.

Кеңістіктік аспект ерекше назар аударуға тұрарлық. Инновациялық сценарийде NDVI вегетациялық индексі негізінде анықталған өнімді және тұрақты учаскелер аумағының кеңеюі байқалады, ал дағдарыс сценарийінде азық-түлік пен әлеуметтік тұрақсыздықтың локализацияланған тәуекелдеріне әкелуі мүмкін өнімді аймақтың тарылуы тіркеледі.

Осылайша, нәтижелер цифрландыруға, ресурстарды үнемдеуге және кеңістіктік-аналитикалық әдістерді шешім қабылдау процесіне біріктіруге бағытталған ирригациялық егіншілікті дамытудың инновациялық жолына басымдық беру қажеттілігін көрсетеді. Тек осындай тәсіл климаттық және ресурстық белгісіздік жағдайында аграрлық сектордың ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу ирригациялық егіншіліктің су және энергия ресурстарын тиімді пайдалануды арттыру жағдайында тұрақты даму перспективаларын кешенді бағалауға мүмкіндік берді. Эмпирикалық талдау аймақтың әртүрлі климаттық жағдайларында суару желілерінің энергия сыйымдылығы, суды тұтыну және өнімділік бойынша бастапқы деректерді жинау мен өңдеуге негізделді. Су-энергетикалық тиімділік деңгейі мен аграрлық өндірістің экономикалық нәтижелері арасындағы корреляциялық байланыстарды анықтау үшін статистикалық өңдеу және регрессиялық талдау (OLS, GLS) әдістері қолданылды. Сонымен қатар, ГАЗ технологиялары (ArcGIS) кеңістіктік модельдеу және сыни осал аймақтарды айқындау үшін қолданылып, модельдің нақты өңірлік ерекшеліктерді ескеретінін қамтамасыз етті.

Зерттеу барысында әзірленген сценарийлік модель суармалы жүйелерді трансформациялаудың әртүрлі траекториялары бойынша аграрлық өндірістің әлеуетті нәтижелілігін бағалауға мүмкіндік берді. Модельдеу нәтижелері инновациялық сценарийге көшу кезінде - тамшылатып және автоматтандырылған суаруды енгізгенде - су шығындарының 30%-ға дейін төмендеуі, энергия тиімділігінің және өнімділіктің 15-20%-ға өсуі мүмкін екенін көрсетті. Бұл инвестициялық көрсеткіштердің (NPV, IRR) оң мәнін қамтамасыз етеді және тиімді учаскелердің кеңістіктік қамтылуын арттыруға мүмкіндік береді. Керісінше, дағдарыс траекториясы бойынша даму өндірістік өнімділіктің төмендеуі, энергия шығындарының өсуі және аграрлық кәсіпорындардың экономикалық тұрақтылығының төмендеуіне әкеледі.

Ғылыми жаңалығы ESG-факторларын модельдің архитектурасына біріктіруде, аграрлық шаруашылықтардың стратегиялық құжаттары мен корпоративтік есептілігінің контент-талдауын қолдануда көрініс тапты. Бұл тәсіл институционалдық шектеулерді, стейкхолдерлердің сұраныстарын және ұлттық, өңірлік деңгейде өзектендірілген тұрақты даму мақсаттарын есепке алуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, модельдің кеңістіктік компоненті аграрлық өндірістің техникалық және экологиялық әлеуетін нақты географиялық жағдайлармен байланыстыра отырып бағалауға жол ашты.

Қолданылған кешенді әдістер су-энергетикалық тиімділікті арттыру әлеуетін экономикалық, экологиялық және институционалдық факторларды ескере отырып бағалауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелердің практикалық маңызы жоғары: олар аграрлық саясатты стратегиялық қайта бағыттау, суды үнемдеу және энергияны тиімді пайдалану тәсілдерін енгізу, сондай-ақ өңірлік бағдарламаларды қалыптастыру кезінде



тікелей қолданылуы мүмкін. Модель Қазақстанның құрғақ және жартылай құрғақ аймақтарында ғана емес, сондай-ақ Орталық Азияның басқа да құрғақ аймақтарында суармалы егіншілікті трансформациялауды жоспарлау үшін қолданылуға лайықты.

Зерттеудің шектеулері мен болашақ зерттеу бағыттары да анықталды. Модельдің тиімділігін арттыру үшін ұзақ мерзімді мониторинг жүргізу, әртүрлі климаттық және агроэкологиялық шарттардағы бейімделген сценарийлерді әзірлеу қажет. Сонымен қатар, басқа секторлардағы тәжірибені салыстыру және ESG-интеграцияның экономикалық әсерін кеңейту ғылыми зерттеулердің келесі кезеңдерін құрайды.

Осылайша, жүргізілген зерттеу аграрлық сектордағы су және энергия ресурстарын тиімді басқаруды қамтамасыз ететін кешенді ғылыми негізді ұсынады, өңірлік саясатты қалыптастыруға, инвестициялық шешімдерді жоспарлауға және Орталық Азияның құрғақ аймақтарында тұрақты ауыл шаруашылығын дамытуға нақты практикалық ұсыныстар береді.

Әдебиет тізімі

1. Ahmad M., Farooq U., Iqbal N. Economic efficiency of irrigation water use and its determinants in arid regions of Pakistan // *Agricultural Water Management*. – 2020. – Vol. 238. – e. 106208. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106208>.
2. Chukalla A. D., Krol M. S., Hoekstra A. Y. Green and blue water use efficiency of global food production under different water and land management scenarios // *Ecological Indicators*. – 2021. – Vol. 124. – e. 107405. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107405>.
3. Шарипов Б. Б., Нурмуханбетов А. С. Анализ водозергетических параметров аграрного сектора Казахстана // *Вестник КазНАУ*. – 2021. – №2 (105). – С. 34–41.
4. Wang H., Li X., He W. Integrated modeling of water-energy-food nexus for sustainable irrigation management // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 364. – e. 132675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132675>.
5. Тлеуова С. А., Жанзакова Ж. О. Модернизация систем орошения как фактор устойчивого аграрного развития в южных регионах Казахстана // *Экономика: стратегия и практика*. – 2020. – №4 (17). – С. 112–121.
6. Sinyak Yu. E., Sidorov E. A. Modeling of the water-energy nexus in agriculture: A system dynamics approach // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 3930–3941. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.058>.
7. Досанова Г. К., Маханбетова С. Б. Оценка водообеспеченности аграрных территорий Южного Казахстана // *Региональная экономика: теория и практика*. – 2022. – №7 (514). – С. 49–62. <https://doi.org/10.24891/re.22.7.49>.
8. Khan Z., Linares P., García-González J. Integrating water-energy efficiency metrics in irrigation: An economic perspective // *Resources, Conservation & Recycling*. – 2020. – Vol. 155. – e. 104658. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104658>.
9. Есимбеков Б. А., Абишева А. А. Инновационные подходы к управлению ирригационными ресурсами в условиях дефицита воды // *Труды КазНИИ экономики АПК и развития сельских территорий*. – 2021. – №4. – С. 87–92.
10. Rojas-Downing M. M., Nejadhashemi A. P., Harrigan T. Sustainability evaluation of irrigation systems using integrated modeling approach // *Sustainable Production and Consumption*. – 2023. – Vol. 36. – P. 435–447. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.005>.
11. Омаров А. Б., Сабыров А. Е. Проблемы водозергетического регулирования в сельском хозяйстве РК // *Аграрная наука Евразии*. – 2020. – №6 (61). – С. 56–61.
12. Sreeja P. E., Sajeena A. Climate-resilient irrigation: A review of strategies and decision-support tools // *Environmental Science and Policy*. – 2021. – Vol. 124. – P. 543–552. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.004>.
13. Хасенов Б. К., Турсынов Б. К. Энергоэффективность в сельском водопользовании: оценка и пути повышения // *Статистика, учет и аудит*. – 2023. – №2. – С. 84–92.



14. Kalinina E. A., Ivanov A. V. Digital irrigation and smart farming in arid lands: Challenges and potential // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 194. – e. 106727. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106727>.

15. Бейсекеева А. Р., Аманжолова Ж. Ж. Потенциал устойчивого водопользования в аграрном секторе Туркестанской области // *Вестник инновационной экономики*. – 2024. – №1 (33). – С. 103–112.

References

1. Ahmad M., Farooq U., Iqbal N. Economic efficiency of irrigation water use and its determinants in arid regions of Pakistan. *Agricultural Water Management*, 2020, Vol. 238, e. 106208, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106208>.

2. Chukalla A. D., Krol M. S., Hoekstra A. Y. Green and blue water use efficiency of global food production under different water and land management scenarios. *Ecological Indicators*, 2021, Vol. 124, e. 107405, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107405>.

3. Sharipov B. B., Nurmukhanbetov A. S. Analysis of water-energy parameters of the agricultural sector of Kazakhstan. *Vestnik KazNAU*, 2021, 2(105), pp. 34–41.

4. Wang H., Li X., He W. Integrated modeling of water-energy-food nexus for sustainable irrigation management. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 364, e. 132675, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132675>.

5. Tleuova S. A., Zhanzhakova Zh. O. Modernization of irrigation systems as a factor of sustainable agricultural development in the southern regions of Kazakhstan. *Economics: Strategy and Practice*, 2020, 4(17), pp. 112–121.

6. Sinyak Yu. E., Sidorov E. A. Modeling the water-energy nexus in agriculture: a system dynamics approach. *Energy Reports*, 2021, 7, pp. 3930–3941, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.058>.

7. Dosanova G. K., Mahanbetova S. B. Assessment of water provision of agricultural territories in southern Kazakhstan. *Regional Economics: Theory and Practice*, 2022, 7(514), pp. 49–62, <https://doi.org/10.24891/re.22.7.49>.

8. Khan Z., Linares P., García-González J. Integrating water-energy efficiency metrics in irrigation: an economic perspective. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, 155, e. 104658, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104658>.

9. Yesimbekov B. A., Abisheva A. A. Innovative approaches to irrigation resource management under water scarcity. *Proceedings of KazNIICEAPK and Rural Development*, 2021, 4, pp. 87–92.

10. Rojas-Downing M. M., Nejadhashemi A. P., Harrigan T. Sustainability evaluation of irrigation systems using integrated modeling approach. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 36, pp. 435–447, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.005>.

11. Omarov A. B., Sabirov A. E. Issues of water-energy regulation in agriculture of Kazakhstan. *Agrarian Science of Eurasia*, 2020, 6(61), pp. 56–61.

12. Sreeja P. E., Sajeena A. Climate-resilient irrigation: a review of strategies and decision-support tools. *Environmental Science and Policy*, 2021, 124, pp. 543–552, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.004>.

13. Khasenov B. K., Tursynov B. K. Energy efficiency in agricultural water use: evaluation and pathways to improvement, *Statistika, Uchet i Audit*, 2023, 2, pp. 84–92.

14. Kalinina E. A., Ivanov A. V. Digital irrigation and smart farming in arid lands: challenges and potential. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 194, e. 106727, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106727>.

15. Beysekeeva A. R., Amanzholova Zh. Zh. Potential for sustainable water use in the agricultural sector of Turkestan region, *Vestnik Innovatsionnoy Ekonomiki*, 2024, 1(33), pp. 103–112.

SCENARIO MODELING OF WATER AND ENERGY EFFICIENCY OF IRRIGATION SYSTEMS IN ARID REGIONS: THE CASE OF THE TURKESTAN REGION

L. Moldashbaeva¹, G. Bekmanova², G. Bidauletova^{2*}, D.A. Kulanova²

¹L.N Gumilyov Eurasian National university, Astana, Kazakhstan

²M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan



Summary. Amid growing water scarcity and increasing energy intensity in agricultural production, especially in arid regions, an integrated model of water-energy efficiency has been developed, using the Turkestan region of Kazakhstan as a case study. The methodological framework is based on the WEF-nexus approach, combining DEA analysis and scenario-based modeling. The model captures interrelations between productivity, water use efficiency, energy consumption, and technological modernization. Unlike fragmented approaches, it offers adaptability and accounts for climate-related and infrastructural constraints. Projected outcomes include up to 40% reduction in water losses, 25% lower energy use, and up to 35% increase in crop yields. The model serves as a practical tool for strategic agri-policy planning and sustainable investment initiatives.

Keywords: Water-energy efficiency, WEF nexus, Irrigation systems, DEA analysis, Sustainable agriculture, Climate resilience, Resource optimization, Arid regions;.

СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ЗАСУШЛИВЫХ РЕГИОНАХ: КЕЙС ТУРКЕСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Л. Молдашбаева¹, Г.У. Бекманова², Г.О. Байдаулетова^{2}, Д.А. Куланова²*

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

Резюме. В условиях усиливающегося дефицита водных ресурсов и роста энергоёмкости агропроизводства, особенно в засушливых регионах, разработана интегрированная модель водно-энергетической эффективности на примере Туркестанской области Казахстана. Методологическая основа включает WEF-nexus-подход, DEA-анализ и сценарное моделирование. Модель учитывает взаимосвязь между продуктивностью, водоотдачей, энергозатратами и уровнем технологического обновления. В отличие от фрагментарных подходов, система обладает адаптивностью и способностью учитывать климатические риски. Прогнозируемые эффекты - снижение водопотерь до 40%, энергозатрат - на 25%, рост урожайности - до 35%. Модель представляет интерес для стратегического агропланирования и устойчивых инвестиций.

Ключевые слова: водно-энергетическая эффективность, WEF-нейросвязь, ирригационные системы, DEA-анализ, устойчивое сельское хозяйство, климатическая устойчивость, оптимизация ресурсов; засушливые регионы.

Авторлар туралы ақпарат:

Молдашбаева Луиза Полатхановна – экономика ғылымының кандидаты, "Есеп және талдау" кафедрасының доценты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразиялық Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: askar_96_96@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4491-9567>

Бекманова Гульжан Усеновна – магистр, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: gulzhan_p.kz@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3870-5117>

Байдаулетова Гульнур Омаровна* - PhD докторанты, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: gulnur.baidauletova@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1748-0576>

Дарикуль Куланова Аскарбековна - экономика ғылымдарының кандидаты, профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: k_dana_a@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9188-5243>

Information about the authors:

Moldashbaeva Luiza - candidate of economic sciences, associate professor of the Department of "Accounting and analysis", L.N Gumilyov Eurasian National university, Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: askar_96_96@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4491-9567>



Bekmanova Gulzhan – master, senior lecturer, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: gulzhan_p.kz@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3870-5117>

Baidauletova Gulnur* - PhD student, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: gulnur.baidauletova@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1748-0576>

Darikul Kulanova - Candidate of Economic Sciences, Professor M. Auezov South Kazakhstan University City, country Shymkent, Kazakhstan, e-mail: k_dana_a@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9188-5243>

Информация об авторах:

Молдашибаева Луиза Полатхановна – кандидат экономических наук, доцент кафедры "Учет и анализ", Евразийский Национальный Университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: askar_96_96@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4491-9567>

Бекманова Гульжан Усеновна – магистр, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: gulzhan_p.kz@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3870-5117>

Байдаулетова Гульнур Омаровна* - докторант PhD, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: gulnur.baidauletova@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1748-0576>

Дарикуль Куланова Аскарбековна - кандидат экономических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: k_dana_a@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9188-5243>

Алынды: 11.08.2025

Қарауға қабылданды: 25.09.2025

Онлайн қолжетімді: 10.11.2025