

Гидрология и водное хозяйство

Гидрология және су шаруашылығы

Hydrology and water management

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2026-1-28-40.3>

FTAMP 39.01.75, 39.01.77. 39.03.15

ӨОЖ 627.8:556.38

И. М. Мальковский¹, Л. С. Толеубаева², А. З. Таиров³, М. В. Леман*⁴,
А. У. Абдибеков⁵, Қ. Т. Нарбаева⁶ А. Толекова⁷

¹ Г. ғ. д., профессор, КазНАЕН академигі, БҒҚ («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; aidatol_86@mail.ru)

² Г. ғ. д., БҒҚ («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; listoleu@mail.ru)

³ Г. ғ. к., ЖҒҚ, зертхана жетекшісі («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; amra2005@list.ru)

⁴* PhD докторант, ҒҚ (ҚазҰАЗУ, «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; maxleman131@gmail.com)

⁵ ҒҚ («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; darkhan@mail.ru)

⁶ PhD, АҒҚ («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; narbayeva.kn@gmail.com)

⁷ ҒҚ («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; aidatol_86@mail.ru)

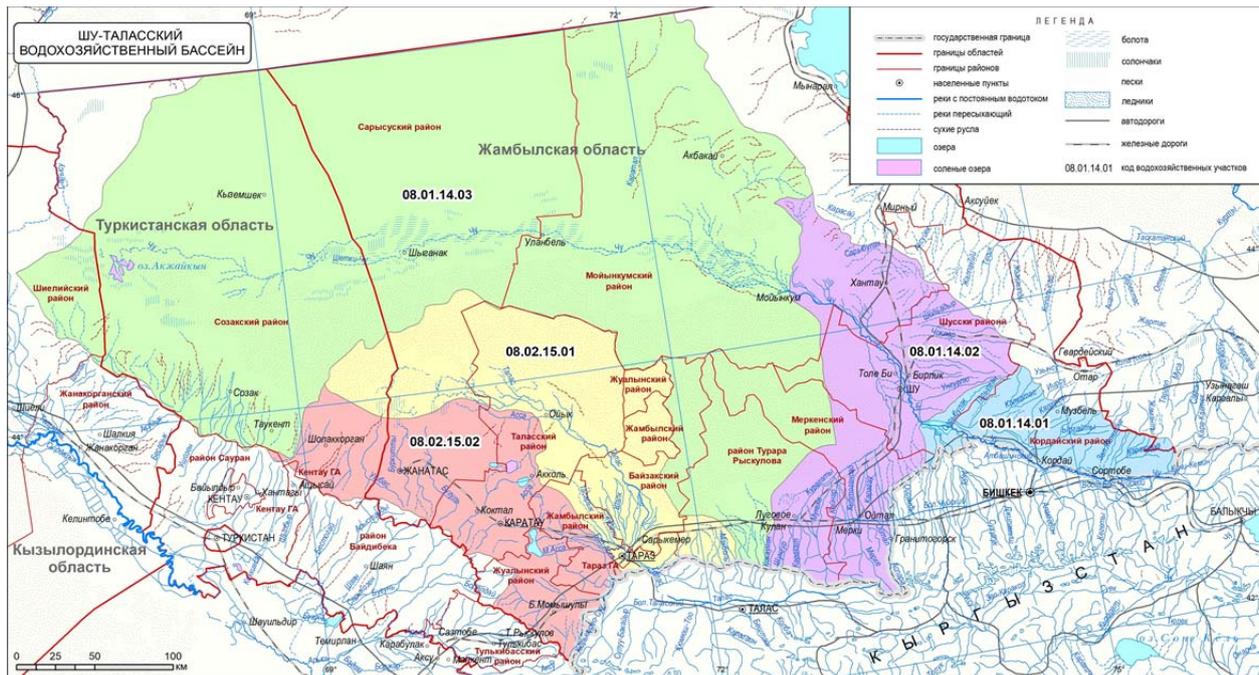
ДИНАМИКАЛЫҚ-СТОХАСТИКАЛЫҚ ТӘСІЛ НЕГІЗІНДЕ ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ ШУ-ТАЛАС БАССЕЙНІН СУМЕН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Трансшекаралық Шу-Талас бассейнінде Қазақстан Республикасының сумен қамтамасыз ету жүйесін (СҚЖ) дамыту проблемалары тұжырымдалынған және модельдеудің мақсаттары мен міндеттері айқындалынған. Мақсаттарға жетудің ғылыми әдісі ретінде тұрақты сумен қамтамасыз ету мәселесін өзіне тән көпөлшемділік, жанжал, белгісіздік қасиеттері бар күрделі жүйе ретінде қарастыратын жүйелік талдау әдістемесі ұсынылған. Жүйелік талдау құралы ретінде күрделі жүйелерді математикалық динамикалық-стохастикалық модельдеу технологиясы қолданылды, бұл белгілі бір уақыт аралығында нақты объектілердің мінез-құлқын имитациялайтын математикалық модельдермен компьютерде есептеу эксперименттерін жүргізудің сандық әдісі. Шу және Талас өзендерінің бассейндерін сумен қамтамасыз ету жүйелерінің хронологиялық құрылымының сипаттамасы, сумен қамтамасыз ету жүйелерінің логикалық-математикалық сипаттамасы берілген. Қалыптасқан әдіснамалық тәсілдердің әмбебаптығы мен формальды математикалық модельдерді қолданудың арқасында әзірленген әдістеме бейімделу мен масштабталудың жоғары деңгейіне ие.

Әдістеме суды пайдалану сценарийлерін бағалау, су пайдаланушылар арасындағы ықтимал мүдделер қақтығысын анықтау, тәуекелдерді талдау және тұрақты су шаруашылығын дамытуды қамтамасыз етуге және өңірлік су қауіпсіздігін нығайтуға бағытталған келісілген мемлекетаралық шешімдерді негіздеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: математикалық (имитациялық) модельдеу, компьютерлік бағдарлама, сумен қамтамасыз ету жүйесі, трансшекаралық бассейн, су қауіпсіздігі, Монте-Карло әдісі.

Кіріспе. Трансшекаралық Шу-Талас бассейнінде Қазақстан Республикасының сумен қамтамасыз ету жүйелерін дамыту мәселелері (1-сурет) Орталық Азияның аридті және жартылай аридті аумақтарының трансшекаралық ағынсыз бассейндеріне тән. Мұндай бассейндердің табиғи-шаруашылық жүйелерін сумен қамтамасыз ету саласындағы негізгі қауіптер мен сын-қатерлер жаһандық және өңірлік климаттың өзгеруі, мемлекетаралық су қатынастарының сәйкес келмеуі, су



1-сурет – Траншекаралық ШТБ қазақстандағы бөлігінің карта-схемасы

Figure 1 – Schematic diagram of the functioning and development of the water supply system

шығынының технологияларын пайдалану және суды реттеу мен су таратудың техникалық құралдарының жетілмегендігі болып табылады. Су қауіптерінің жүзеге асуының салдары «су дағдарыстары» болуы мүмкін, бұл мемлекетаралық су дауларының шиеленісуінде, экологиялық тұрақсыздықтың жаңа көздерінің пайда болуында және әлеуметтік-экономикалық даму бағдарламаларының бұзылуында көрінеді.

Талас өзені негізінен Қырғыз Республикасының аумағында қалыптасады. Өзен ұзындығы 661 км құрайды, оның 444 км Қазақстан Республикасының аумағына жатады. Талас өзенінің бассейні екі бөлікке бөлінеді: таулы (Тараз қаласына дейін) және жазық.

Бассейннің жалпы ауданы 52 700 км², оның ішінде 9 240 км² таулы жер бедері. Ағынды су түзілу аймағы болып табылатын бассейннің таулы бөлігі оның оңтүстік бөлігін алып жатыр және жалпы аумақтың шамамен 40% құрайды. Бассейннің орталық және солтүстік-батыс бөліктері ағынды судың шашыраңқы аймағының құрамына кіретін тау бөктеріндегі жазықтар мен шөлді аймақтардан тұрады. Талас өзенінің ағынды су түзілу аймағының барлық дерлік таулы аймағы Қырғызстан Республикасының аумағында орналасқан.

Қазақстанда шамамен 40 жуық өзен бар, олардың көпшілігі негізгі өзенге жетпей, Мойынқұм өзенінің құмына сіңіп кетеді. Сондай-ақ жалпы ауданы 60,8 км² болатын шамамен 50 көл бар. Қазіргі уақытта Қазақстан Республикасында қарастырылып отырған бассейнде жалпы сыйымдылығы 1,0 млн м³-ден асатын жеті су қоймасы жұмыс істейді. Бұл су қоймаларының жалпы пайдалы сыйымдылығы 23,6 млн м³, ал жалпы ауданы 16,7 км². Ең үлкен су қоймасы – Бөлек-Қызыл (жалпы сыйымдылығы – 14,5 млн м³), ол 1971 жылы Талас өзенінде салынған. Сонымен қатар, бассейнде кішігірім су қоймалары (1,0 млн м³-ден аз) және тоғандар бар, олардың жалпы сыйымдылығы шамамен 14,6 млн м³ құрайды. Талас өзенінің негізгі ағыны 1974 жылы пайдалануға берілген, жобалық сыйымдылығы қалыпты тіркелеген су деңгейінде 520,0 млн м³ болатын ұзақ мерзімді реттеуші су қоймасы Киров су қоймасымен реттелетінін атап өткен жөн.

Шу өзені Қырғызстан Республикасынан бастау алады. Өзен бассейні тығыз және кең гидрографиялық желімен сипатталады, оған жалпы ұзындығы 22 894 км болатын 4906 өзен, сондай-ақ 806 су айдындары (көлдер, тоғандар және су қоймалары) кіреді. Жалпы ұзындығы 1305 км болатын негізгі өзеннен басқа, бассейнде ұзындығы 101-ден 200 км-ге дейінгі сегіз өзен бар. Қалған су ағындары шағын және өте кіші өзендер санатына жатады. Қазақстан Республикасындағы Шу өзені бассейнінде жалпы су бетінің ауданы 238 км² болатын 201 көл бар. Оның ішінде 222 км²

су бетінің ауданы бар 192 көл Шу өзені бассейніне тікелей жатады, ал қалған тоғыз көл, 15,8 км² су бетінің ауданы бар, Шу-Талас өзенаралық алаңында орналасқан. Бассейндегі көлдердің көпшілігінің суы (шамамен 80%) тұщы су, ал тұзды көлдер шамамен 20% құрайды. Кішігірім көлдер әдетте жазда құрғап кетеді.

Қазіргі уақытта Шу өзені бассейнінде жалпы пайдалануға жарамды сыйымдылығы шамамен 580 млн м³ болатын 17 ірі және шағын су қоймасы жұмыс істейді. Олардың ішіндегі ең ірісі – Шу өзеніндегі Тасөткел су қоймасы (пайдалану сыйымдылығы 551 млн м³), ол негізінен суару үшін пайдаланылады.

Шу және Талас өзендерінің су ресурстарын Қазақстан Республикасы мен Қырғыз Республикасы арасында бөлу бұрынғы КСРО Мелиорация және су шаруашылығы министрлігі әзірлеген қағидаттар мен ережелер негізінде су бөлу туралы «Ережелерге...»: «Шу өзенінің ағынын бөлу туралы ережелерге» (Мәскеу, 1983) және «Талас өзенінің ағынын бөлу туралы ережелерге» (Мәскеу, 1983), сондай-ақ «Күркүреусу мен Аспара суын бөлу туралы ережелерге» (Фрунзе, 1948) сәйкес жүзеге асырылады [1].

Жоғарыда аталған құжаттарға сәйкес, Талас өзені бассейнінің су ресурстары тараптар арасында теңдік негізінде бөлінеді, бұл Қазақстан мен Қырғызстан арасындағы су ресурстарын тең пайдалануды білдіреді. Шу өзені бассейнінің су ресурстары Қырғыз Республикасы арасында 58% және Қазақстан Республикасы арасында 42% бөлінеді. Аспара өзенінің көлемі Қазақстан арасында 62% және Қырғызстан арасында 38% бөлінеді. Бұл ережелер бүгінгі күні де өзінің практикалық маңызын сақтап, мемлекетаралық су ынтымақтастығын ұйымдастырудың негізі болып табылады.

2000 жылы «ҚР Үкіметі мен Қырғыз Республикасы Үкіметі арасындағы Шу және Талас өзендеріндегі мемлекетаралық су шаруашылығы құрылыстарын пайдалану туралы келісімге» қол қойылды (Астана, 2000). 2002 жылдың 16 сәуірінде «Келісім...» мемлекеттер парламенттері ратификациялағаннан кейін күшіне енді [2]. Қазақстан мен Қырғызстанның ресми ұстанымдары су қатынастары саласындағы өзара тиімді ынтымақтастықты одан әрі нығайтуға және дамытуға деген ұмтылысты көрсетеді.

Қазақстанның орнықты дамуына көшуінің негізгі шарттарының бірі бола отырып, табиғи-шаруашылық жүйелерді сумен қамтамасыз ету проблемалары аса маңызды әлеуметтік-экономикалық және экологиялық мәнге ие болады [3-7].

Соңғы онжылдықтарда бүкіл әлемде кешенді гидрологиялық модельдеуге және су ресурстарын басқаруда озық технологияларды енгізуге маманданған көптеген зерттеу ұйымдары пайда болды. Су ресурстарын сәтті басқару құрғақшылық пен тұщы судың тапшылығынан бастап су тасқынына дейінгі көптеген мәселелерді қамтитын күрделі және қиын міндетке айналуға. Құрылған компьютерлік бағдарламалар жеке және біріктірілген түрде жұмыс істейді, бұл пайдаланушыларға өзен бассейндерінің су ресурстарын басқару және олардың дамуын жоспарлау мәселелеріне оңтайлы және салмақты шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді [8-10].

Қазіргі заманғы компьютерлік технологиялар мен олардың бағдарламалық өнімдерінің пайда болуы белгілі бір әмбебаптыққа ие болуға мүмкіндік береді. Дегенмен, бұл «өнімдерді» трансшекаралық өзен бассейндеріндегі ұлттық мәселелерді шешуге бейімдеу қиын, бұл стандартты емес тәсіл мен нақты міндеттерді талап етеді. Ұлттық су мәселелерін шешуге арналған шетелдік бағдарламалық өнімдердің импорты ұлттық ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз ету шараларымен шектеледі. Сондықтан, құпия ақпаратты қоса алғанда, барлық қолжетімді ақпаратты пайдалана отырып, нақты бассейндер үшін нақты мәселелерді модельдеу бұл салада өзекті болып келеді.

Материалдар мен әдістер. Мақсаттарға жетудің ғылыми әдісі ретінде жүйелік талдау әдіснамасы қолданылады, онда тұрақты сумен жабдықтау мәселесі көп өлшемділік, қақтығыс және белгісіздік сияқты өзіне тән қасиеттері бар күрделі жүйе ретінде қарастырылады.

Шетелде су шаруашылығы жүйелерін имитациялық және математикалық модельдеу құралдарының белсенді дамуы байқалады. Сонымен, weар (суды бағалау және жоспарлау жүйесі), MODSIM және SWAT типті бағдарламалық кешендер трансшекаралық өзара іс-қимылды, суды пайдаланудың тұрақтылығын бағалауды және климаттың өзгеруінің салдарын болжауды қоса алғанда, кешенді су шаруашылығы міндеттерін талдау үшін қолданылады. Бұл құралдарды пайдалану гидрологиялық және экономикалық параметрлердің ықтималды таралуын ескере отырып, сценарийлік және оңтайландыру модельдеуіне мүмкіндік береді. Заманауи зерттеулер динамикалық-стохастикалық модельдеу әдістерін қуатты есептеу платформаларымен біріктіретін

біріктірілген тәсіл су ресурстарын басқаруда, әсіресе деректердің шектеулілігі мен табиғи процестердің жоғары белгісіздігі жағдайында шешім қабылдау сапасын айтарлықтай арттыруға қабілетті екенін атап көрсетеді.

WEAP (суды бағалау және жоспарлау жүйесі), MODSIM және MIKE BASIN сияқты бағдарламалық шешімдер Еуропа, Африка және Азиядағы трансшекаралық суды басқару жүйелерін талдау үшін сәтті қолданылады. WEAP суды пайдалану сценарийлерінің икемді конфигурациясын және су тапшылығының ықтималдық бағалауын қамтамасыз етеді, MODSIM су квотасының шектеулері бар елдер арасында су ресурстарын оңтайлы бөлуді модельдеуге мүмкіндік береді, ал MIKE BASIN трансшекаралық бассейндерді кешенді талдау үшін гидрологиялық, гидравликалық инженерия және суды пайдалану деректерін біріктіреді. Осы шетелдік құралдарды отандық әзірлемелермен біріктіру гидрологиялық процестердің стохастикалық сипатын да, әлеуметтік-экономикалық шектеулерді де ескеретін су ресурстарын басқарудағы шешімдерді қолдау үшін әмбебап платформаларды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Жүйелік талдау құралы ретінде күрделі жүйелерді математикалық динамикалық-стохастикалық модельдеу технологиясы қолданылады, бұл белгілі бір уақыт аралығында нақты объектілердің мінез-құлқын имитациялайтын математикалық модельдермен компьютерде есептеу эксперименттерін жүргізудің сандық әдісі. Бұл ретте мұндай объектілердің жұмыс істеуі белгіленген уақыт сәтіндегі объектінің ықтималдық күйін және берілген кезеңдегі объект күйінің динамикасын имитациялайтын алгоритмдер жиынтығымен сипатталады [11, 12].

2-суретте жүйенің дамуының ұлғайтылған уақыт аралықтары (T), су ресурстарының жиынтық көрсеткіштері (W) және суға сұраныстың (I), статистикалық критерийлер жиынтығымен бағаланатын агрегаттық кеңістіктік бірліктер (i) пайдаланылған сумен қамтамасыз етудің бассейндік жүйесінің динамикалық-стохастикалық моделінің тұжырымдамасы схемалық түрде ұсынылған (Φ).



2-сурет – Сумен қамтамасыз ету жүйесінің жұмыс істеуі мен даму моделінің схемасы

Figure 2 – Schematic diagram of the model of functioning and development of the water supply system

Бассейндік жүйені басқару объектісінің T уақытының кез келген сәтіндегі жағдайы көп өлшемді вектормен – тұтастай алғанда қолжетімді су ресурстарымен және олардың $W^T_{i,m}$ компоненттері арасындағы таралуымен, сондай-ақ $V^T_{i,n}$ суға деген сұраныспен анықталады. Белгілі бір әсер ету нәтижесінде жүйе қабылданған критерийлер тұрғысынан белгілі бір тиімділік деңгейімен бір күйден екінші күйге ауыса алады. Бұл әсерлер көп өлшемді $Y^T_{i,y}$ векторы түрінде көрсетіледі, мұнда оның құрамдас бөліктері су ресурстарын реттеу және бөлу құралдарының жиынтығы болып табылады. Жүйеде болып жатқан процестерге $Z^T_{i,b}$ бұзылу векторын құрайтын бірқатар кездейсоқ факторлар әсер етеді, оның құрамдас бөлігі су көздерінің біржақты болжанбайтын режимі болып табылады. Сумен қамтамасыз ету жүйесін дамытудың қарастырылып отырған процесінің имитациялық моделінде жаңғырту кезінде алынған нәтижелер кездейсоқ іске асырулар болып табылады. Сондықтан, процестің объективті және тұрақты сипаттамаларын табу үшін оны бірнеше рет көбейту және алынған деректерді кейіннен статистикалық өңдеу қажет.

Сумен қамтамасыз ету жүйесін басқару міндеті оны бастапқы күйден қалаған соңғы күйге, белгілі бір мағынада, белгіленген шектеулерді сақтай отырып, ең тиімді түрде аударуға дейін азаяды. Сумен қамтамасыз ету жүйесін басқару «ресурстарды басқару» құралдары мен «сұранысты басқару» құралдарының үйлесімі деп түсініледі.

Модельдеу әдістемесі тарихи деректерге негізделген модельді калибрлеу кезеңдерін, негізгі гидрологиялық және су шаруашылығы параметрлерінің ықтималдық үлестірімдерін құруды, климаттың өзгеруі мен суды пайдаланудың сценарийлік талдауын жүргізуді және бассейндік су жүйесінің сыртқы факторлардың өзгеруіне сезімталдығын бағалауды қамтыды. Модельдеу нәтижелері су тапшылығының маңызды кезеңдерін анықтауға және қолданыстағы гидротехникалық іс-шаралардың тиімділігін бағалауға, сондай-ақ бассейн елдері арасында су ресурстарын трансшекаралық бөлудің оңтайлы стратегияларын қарастыруға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері. Жүйенің хорологиялық құрылымы оның әкімшілікке тиесілігін (әкімшілік аудан) және пайдаланылатын су көзін анықтайтын элементтермен қалыптасады (1-кесте).

1-кесте – Қазақстан бөлігінің су шаруашылығы аймақтары
Table 1 – Water management areas of the Kazakh part

Су шаруашылық ауданы	Ресурстар
08.01.14.01	1. Қырғыз Республикасынан келетін нақты ағын
	1.1. Өзендермен ағын (Шу)
	1.2. Арна ағыны
	2. Жергілікті өндірілген
	3. Жалпы ағын
	4. Жалпы ресурстар
08.01.14.02	1. Нақты ағын
	1.1. Өзендер арқылы ағын (Шу)
	1.2. Қырғыз Республикасынан арналар арқылы ағын
	2. Жергілікті деңгейде қалыптасқан
	3. Жалпы ағын
	4. Жалпы ресурстар
08.01.14.03	1. Нақты ағын
	2. Жергілікті қалыптасу
	3. Жалпы ағын
	4. Жалпы ресурстар
08.02.15.01	1. Қырғыз Республикасынан (Талас) нақты ағын
	2. Жергілікті деңгейде қалыптасқан
	3. Жалпы ағын
	4. Жалпы ресурстар
08.02.15.02	1. Қырғыз Республикасынан (Күркүреусу)
	2. Жергілікті қалыптасу
	3. Жалпы ағын
	4. Жалпы ресурстар

Шу өзенінің бассейнінде 2 облыс орналасқан: Жамбыл және Түркістан облысы.

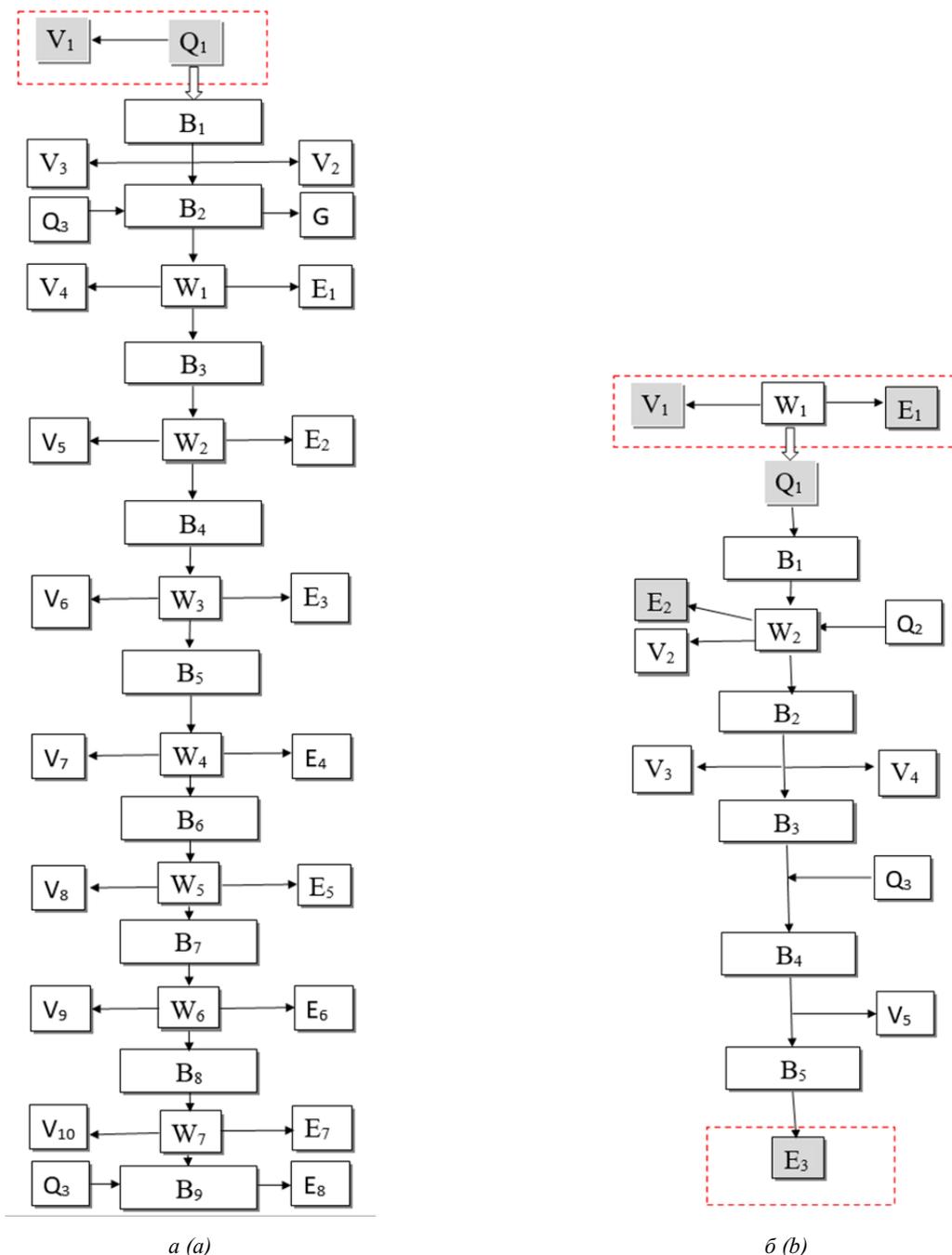
Жамбыл облысына келесі аудандар кіреді: 1) Қордай ауданы; 2) Мерке ауданы; 3) Мойынқұм ауданы; 4) Т. Рысқұлов атындағы аудан; 5) Сарысу ауданы; 6) Шу ауданы.

Түркістан облысына келесі аудан кіреді: 1. Созақ ауданы.

Талас өзенінің бассейнінде Жамбыл облысы орналасқан.

Жамбыл облысына келесі аудандар кіреді: 1) Байзақ ауданы; 2) Жамбыл ауданы; 3) Жуалы ауданы; 4) Талас ауданы; 5) Тараз қаласы.

Траншекаралық Шу-Талас бассейнін сумен қамтамасыз ету жүйесінің имитациялық динамикалық-стохастикалық моделінің құрылымы (Қазақстан бөлігі) 3-суретте және 2-кестеде көрсетілген.



3-сурет – Өзен бассейндерін сумен қамтамасыз ету жүйелерінің имитациялық моделінің алгоритмі: а – Талас; б – Шу
 Figure 3 – The algorithm of the simulation model of water supply systems of river basins: a – Talas; b – Shu

2-кесте – Сумен қамтамасыз ету жүйелерінің имитациялық динамикалық-стохастикалық моделінің құрылымы

Table 2 – The structure of the simulation dynamic-stochastic model of water supply systems

Көрсеткіштері	Өзен бассейндерін сумен қамтамасыз ету жүйелері	
	Талас	Шу
1	2	3
Жер үсті су көздері		
Q_1	Талас өз. трансшекаралық ағыны	Трансшекаралық ағын (Шу өз.)
Q_2	Жергілікті ағын	Жергілікті ағын (Ақсу өз.)
Q_3	Ағынды сулар (ағын сулар)	Жергілікті ағын (Құрағаты өз.)
Су алу		
V_1	«1992 ж. Келісімге...» сәйкес Қырғызстан аумағындағы су алу	Қырғызстандағы су алу (Орто-Токой су қоймасы)
V_2	Асса-Талас арнасы	Шу арнасынан су алу (оң жақ жағалау)
V_3	Базарбай арнасы	Шу арнасына су тарту (оң жағалау)
V_4	Юбилейный су қоймасынан су алу	Шу арнасынан су алу (сол жағалау)
V_5	Темірбек су қоймасынан су алу	Фурмановка арнасынан су алу
V_6	Қазақбай су қоймасынан су алу	
V_7	Жиеналы су қоймасынан су алу	
V_8	Ойық су қоймасынан су алу	
V_9	Жадық су қоймасынан су алу	
V_{10}	Белекқызыл су қоймасынан су алу	
Жер асты су көздері		
G	Талас өзені бассейніндегі жер асты суын пайдалану	Шу өзені бассейніндегі жер асты суын пайдалану
Арна ағыны		
B_1	Қазақстан шекарасына ағып келетін теңгерімдік ағын	Тасөткел су қоймасына ағып келетін теңгерімдік ағын
B_2	Юбилейный су қоймасында су қабылдағаннан кейінгі ағып келетін теңгерімдік ағын	теңгерімдік ағын
B_3	Темірбек су қоймасына ағып келетін теңгерімдік ағын	Су қабылдағаннан кейінгі теңгерімдік ағын (V_3 и V_4)
B_4	Қазақбай су қоймасына ағып келетін теңгерімдік ағын	Ағып келгеннен кейінгі теңгерімдік ағын (Q_3)
B_5	Жиеналы су қоймасына ағып келетін теңгерімдік ағын	Су қабылдағаннан кейінгі теңгерімдік ағын (V_5)
B_6	Ойық су қоймасына ағып келетін теңгерімдік ағын	
B_7	Жадық су қоймасына ағып келетін теңгерімдік ағын	
B_8	Белекқызыл су қоймасына ағып келетін теңгерімдік ағын	
B_9	Көл жүйесіне ағып келетін теңгерімдік ағын	
Су қоймаларын толтыру		
W_1	Юбилейный су қоймасының сыйымдылығы (арналық)	Орто-Токой су қоймасының сыйымдылығы (Қырғызстан, арналық)
W_2	Темірбек су қоймасының сыйымдылығы (арналық)	Тасөткел су қоймасының сыйымдылығы (арналық)
W_3	Қазақбай су қоймасының сыйымдылығы (арналық)	
W_4	Жиеналы су қоймасының сыйымдылығы (арналық)	

2-кестенің жалғасы		
1	2	3
W_5	Ойық су қоймасының сыйымдылығы (арналық)	
W_6	Жадық су қоймасының сыйымдылығы (арналық)	
W_7	Белекқызыл су қоймасының сыйымдылығы (арналық)	
Экологиялық су шығындары		
E_1	Юбилейный су қоймасының булануы	Орто-Токой су қоймасының булануы (Қырғызстан, арналық)
E_2	Темірбек су қоймасының булануы	Тасөткел су қоймасының булануы (арналық)
E_3	Қазақбай су қоймасының булануы	Су экожүйелеріне (тасқын көлдер, батпақты жерлер) арналған экологиялық шығындар (шығындар)
E_4	Жиеналы су қоймасының булануы	
E_5	Ойық су қоймасының булануы	
E_6	Жадық су қоймасының булануы	
E_7	Белекқызыл су қоймасының булануы	
E_8	Су объектілеріне (көлдер, жайылма, өзен сулы-батпақты экожүйелер) кететін экологиялық шығындар	

Жүйенің негізгі су пайдаланушылары коммуналдық-тұрмыстық секторлар, өнеркәсіп және ауыл шаруашылығы болып табылады. Бассейндік сумен қамтамасыз ету жүйесінің даму сценарийлерін болжамды даму деңгейлері (2030, 2040 және 2050 жж.) бойынша салыстырмалы бағалау су қауіпсіздігі критерийлеріне: тұрақтылыққа, әділдікке және тәуекелге негізделіп жүргізіледі.

Математикалық модельдің құрылымы кеңістік пен уақыт шеңберінде ақпараттың жоғары деңгейде агрегациялануына негізделген Қазақстандағы сумен қамтамасыз ету жүйелерін жоспарлау мен дамытудың ұзақ мерзімді (стратегиялық) мәселелерін шешуге бағытталған.

Жүйенің негізгі кеңейтілген элементтері: агрегаттық су көздері (трансшекаралық және жергілікті өзен ағыны ($Q_{i,n}^T$), жер асты сулары ($G_{i,n}^T$) және бассейнаралық ағындар ($U_{i,n}^T$); агрегаттық су пайдаланушылар ($V_{i,n}^T$) – әлеуметтік-экономикалық (коммуналдық-тұрмыстық, өнеркәсіптік, ауылшаруашылық) және экологиялық ($E_{i,n}^T$) (жайылма, атырау, көл); арналық және теңгерімдік ағын ($B_{i,n}^T$); ішкі және шеткі су айдындары ($W_{i,n}^T$).

Жүйенің болжамды зерттеу кезеңі 30 жылды (2020-2050) құрайды, үш кезең (τ) жүйенің динамикасын 2030, 2040 және 2050 жж. деңгейлерінде анықтайды, жүйенің стохастикалық өзгергіштігі бір жылдық (T) уақыт қадамымен сипатталады. Өзен ағынының жылдық қатарын жасау үшін ағынның ықтималдық үлестірім функцияларын пайдалануға және диапазон $0 \leq \varphi^T \leq 99$ бойынша біркелкі бөлінген «жалған кездейсоқ сандарды» компьютерлік генерациялауға негізделген Монте-Карло ($2020 \leq T \leq 2050$ болжам кезеңінде) әдісі таңдалды.

Жылдық ағынның модульдік коэффициенттерін (k_i^T) модельдеуге берілген заңға және ықтималдық үлестірімінің параметрлеріне (Φ) сәйкес жүзеге асырылады:

$$k_i^T = \Phi(\varphi^T, C_V, C_S, r),$$

мұнда φ^T – жалған кездейсоқ біркелкі таралған сан; C_V и C_S – вариация және асимметрия коэффициенттері; r – автокорреляция коэффициенті.

Ағын нормасының берілген мандерінде жылдық ағынның жалған кездейсоқ қатарларын \bar{Q} модельдеу келесі формула бойынша жүргізіледі:

$$Q_i^T = k_i^T \cdot \bar{Q}, \quad (1)$$

мұнда Q_i^T – T -ші жылдағы i -ші су көзінің жылдық ағынының мәні.

Жүйені дамытудың әрбір кезеңіндегі агрегатталған су пайдаланушыларының суға деген сұранысы әкімшілік аудандардың сұранысын қосу формуласы арқылы анықталады:

$$V_i^r = \sum_{j=1} (V_{i,j,k}^r + V_{i,j,n}^r + V_{i,j,c}^r), \quad (2)$$

мұнда i – біріктірілген су пайдаланушылар; j – i -ші су пайдаланушы құрамындағы әкімшілік аудандар; k, n, c – тиісінше, коммуналдық-тұрмыстық, өнеркәсіптік, ауылшаруашылық компоненттері.

Бассейндегі өзен ағынының экологиялық шығындары (булану мен сүзілуден туындайтын өнімді емес шығындар) арна ағынының мәніне немесе су айдындарының беткі ауданына эмпирикалық түрде белгіленген нақты су шығындарының көбейтіндісі ретінде агрегаттық көрсеткіштермен мына формулаларға сәйкес анықталады:

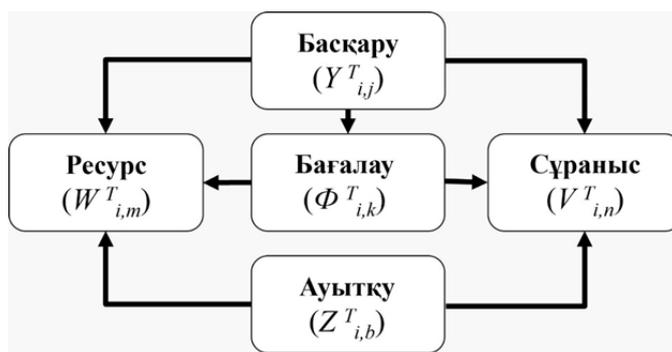
$$E_1^T = e_1^r (Q_1^T + Q_2^T), \quad (3)$$

$$E_2^T = e_2^r F_1^T, \quad (4)$$

мұнда $e_1^r, e_2^r - \tau$ (б.р.) кезеңіндегі арна ағынының жоғалуының эмпирикалық коэффициенттері.

Математикалық модель бойынша оны заманауи бағдарламалау тілдерінде компьютерлік іске асыру әзірленуде [13-19]. Компьютерлік модельдің жұмысы бірнеше кезеңнен тұрады: бастапқы деректерді жүктеу, есептеуге деректерді дайындау, Монте-Карло әдісін қолдана отырып, көрсетілген ықтималдық үлестірім функцияларына (жергілікті және трансшекаралық) негізделген жылдық өзен ағыны серияларын модельдеу, халық, өнеркәсіп, ауыл шаруашылығы және табиғи нысандар бойынша суға деген сұраныстың динамикасын модельдеу, болжамды даму деңгейлеріндегі негізгі жүйе компоненттері үшін су ресурстарының тапшылығы мен артықшылығын анықтай отырып, болжамды суды басқару теңгерімдерін модельдеу, қабылданған су қауіпсіздігі критерийлеріне негізделген сценарийлерді бағалау және модельдеу нәтижелерін визуализациялау. Сарапшының модельмен жұмысының соңғы кезеңі келесі эксперимент жүргізу және сумен қамтамасыз ету жүйесінің (СКЖ) тұрақты дамуы бойынша ұсыныстар беру мақсатында «ресурстарды басқару» және «сұранысты басқару» құралдарын пайдалана отырып, анықталған қауіптер мен қиындықтарға жауап беру шараларын әзірлеумен модельдеу нәтижелерін талдау және талқылау.

Имитациондық моделін компьютерде іске асыру бірге жұмыс істейтін әртүрлі жүйелердің күрделі жиынтығы болып табылады [20-22]. Бағдарламалық жасақтама жиынтығы интерактивті пайдаланушы интерфейсмен, дерекқорды басқарумен, операциялық жүйенің өзара әрекеттесуімен және көмекші модульдермен жұмыс істеу үшін әртүрлі кітапханаларды біріктіреді (4-сурет).



4-сурет – Модульдер диаграммасы және олардың арасындағы байланыстар

Figure 4 – Diagram of modules and relationships between them

Нәтижелерді талқылау. Шу-Талас трансшекаралық бассейніндегі Қазақстанның сумен қамтамасыз ету жүйесін дамыту мәселелері тұжырымдалынды, зерттеудің мақсаттары мен міндеттері айқындалынды.

Тұжырымдалған мақсаттар мен міндеттерге қол жеткізу үшін имитациялық динамикалық-стохастикалық модельдеу әдіснамасын қолданудың тиімділігі негізделген.

Модельдің кеңістіктік-уақыттық құрылымын және оның жұмыс істеу ережелерін анықтайтын талдап тексеру деңгейлері табылды.

Суды басқару жүйесінің логикалық және математикалық сипаттамасы суды басқару жүйесінің компоненттерінің – жер үсті және жер асты су көздерінің, әлеуметтік-экономикалық және экологиялық су пайдаланушылардың, сондай-ақ суды басқару инфрақұрылымы нысандарының жұмыс істеуі мен дамуын көрсететін өзара байланысты алгоритмдер жиынтығы ретінде берілген.

Имитациялық модельдеуді қолдана отырып, сумен қамтамасыз ету жүйесінің дамуын сценарийлік талдаудың бірінші кезектегі міндеттері тұжырымдалған, соның ішінде:

– климаттың өзгеруі және көршілес елдердің аумағынан трансшекаралық ағынның азаюы туралы деректерді ескере отырып, бассейнің қолжетімді су ресурстарының өзгеруіне арналған сценарийлік болжамдарды әзірлеу және модельдеу;

– халық санының болжамы, суды көп қажет ететін өндірістердің даму гипотезалары, табиғат объектілерін сақтау нормативтері негізінде бассейнің табиғи-шаруашылық жүйесінің суға сұраныс динамикасын әзірлеу және модельдеу;

– сумен қамтамасыз ету жүйесінің су шаруашылығы инфрақұрылымын оңтайландыру сценарийлерін әзірлеу және модельдеу, оның ішінде өзен ағынының бассейнаралық тасымалы және баламалы су көздерін игеру;

– модельдеу нәтижесінен максималды ақпарат алу үшін компьютерлік имитациялық модельдеу эксперименттерін жоспарлау, жүргізу және нәтижелерді талдау.

Қорытынды. Математикалық модельді қолдануға негізделген әзірленген зерттеу әдістемесі трансшекаралық Шу-Талас бассейнінің су шаруашылығы кешенін Стратегиялық жоспарлау саласында басқарушылық шешімдер қабылдауды қолдаудың, сондай-ақ өңірлік су қауіпсіздігін қамтамасыз етудің тиімді құралы болып табылады. Бұл әдісті қолдану су ресурстарын бөлуге және пайдалануға әсер ететін табиғи, әлеуметтік-экономикалық және басқару факторларын жан-жақты ескеруге мүмкіндік береді. Белгіленген тәсілдердің әмбебаптығына байланысты әдістемені басқа трансшекаралық өзен бассейндеріндегі су ресурстарын талдау және басқару үшін бейімдеуге және қолдануға болады.

Ұсынылған құрылым су ресурстарын басқарудың ақпараттық-аналитикалық жүйесінің логикалық құрылған және функционалды түрде аяқталған архитектурасын көрсетеді. Оны құрудың модульдік принципі жоғары икемділікті және жүйені әртүрлі даму мақсаттары мен сценарийлеріне бейімдеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді, сондай-ақ ықтимал тәуекелдерді анықтауға, су шаруашылығының тұрақтылығын бағалауға және қабылданған шешімдердің салдарын талдауға мүмкіндік береді.

Деректерді визуализациялау мен графикалық бейнелеудің заманауи құралдарын біріктіру сарапшыларға, талдаушыларға және шешім қабылдаушыларға талдау нәтижелерінің көрнекілігі мен қол жетімділігіне ықпал етеді, суды пайдалану және су қауіпсіздігі саласындағы басқару процестерінің негізділігі мен тиімділігін арттырады.

Қаржыландыру. Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Комитетінің қаржылық қолдауымен «Қазақстан Республикасының су қауіпсіздігі: 2050 жылға дейінгі кезеңге арналған климаттық өзгерістер мен шаруашылық қызмет жағдайындағы трансшекаралық Шу-Талас бассейні» тақырыбы бойынша орындалды.

ӘДЕБИЕТ

- [1] Положение о делении стока в бассейне реки Шу. Минводхоз СССР. – Москва, 1983. – 12 с.
- [2] Временное положение о водodelении р. Талас, Куркуреу-су и Аспара. Главводхоз СССР. – Фрунзе, 1948. – 25 с.
- [3] Мальковский И. М. Географические основы водообеспечения природно-хозяйственных систем Казахстана. – Алматы, 2008. – 204 с.
- [4] Медеу А. Р., Мальковский И. М., Толеубаева Л. С. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление (концепция). – Алматы, 2012. – 94 с.
- [5] Медеу А. Р., Мальковский И. М., Толеубаева Л. С. Управление водными ресурсами Республики Казахстан: проблемы и решения // Материалы I международной научно-практической конференции «Гидрология и инновационные технологии в водном хозяйстве». – Астана, 2015. – С. 18-22.
- [6] Мальковский И. М., Толеубаева Л. С. К формированию единой системы водообеспечения Республики Казахстан // Вопросы географии и геоэкологии. – Алматы, 2010. – № 2. – С. 19-23.
- [7] Alimkulov S., Makhmudova L., Zagidullina A. Long-term water level projections for Lake Balkhash using scenario-based water balance modeling under climate and socioeconomic uncertainties // Water. – 2025. – Vol. 17, No. 13. – Article 2021. – DOI: 10.3390/w17132021.

- [8] Alcamo J., Gallopín G. Building a new generation of scenarios for environmental change. – Dordrecht: Springer, 2009. – 290 p.
- [9] Henriques V. Transboundary water management in Central Asia: Challenges and opportunities // *Environmental Science & Policy*. – 2015. – Vol. 54. – P. 25-36.
- [10] Mahmoud M., Liu Y., Hartmann H., Stewart S. A formal framework for scenario development in water resources planning // *Environmental Modelling & Software*. – 2011. – Vol. 26, No. 7. – P. 798-808.
- [11] Dong C., Zhang J., Guo S. Scenario analysis for sustainable water management // *Journal of Hydrology*. – 2013. – Vol. 493. – P. 45-58.
- [12] Leman M., Tairov A., Malkovskiy I., Toleubaeva L., Aldiyarova A. Dynamic-stochastic model of sustainable water resources management in Kazakhstan // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. – 2025. – No. 6(474). – P. 151-167. – DOI: 10.32014/2025.2518-170X.577.
- [13] Мальковский И. М., Толеубаева Л. С., Толекова А., Долбешкин М. В., Пузиков Е. М. Оценочная модель сценариев развития единой системы водообеспечения Республики Казахстан // «Вопросы географии и геоэкологии». – Алматы, 2015. – № 2. – С. 15-25.
- [14] Бектурганов Н. С., Пивоваров А. Н., Мальковский И. М. Водная безопасность Республики Казахстан: транскозахстанский канал «Ертис-Сырдария» // *Известия НАЕН*. – Астана, 2013. – № 4. – С. 4-9.
- [15] Официальный сайт MIKE powered by DHI [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/>.
- [16] Бектурганов Н. С., Пивоваров А. Н., Мальковский И. М. Водная безопасность Республики Казахстан: транскозахстанский канал «Ертис-Сырдарья» // *Известия НАН РК*. – Астана, 2013. – № 4. – С. 4-9.
- [17] Официальный сайт Hydrologic Engineering Center (HEC), U.S. Army Corps of Engineers [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.hec.usace.army.mil/>.
- [18] Официальный сайт Aquaveo, LLC [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.aquaveo.com/>.
- [19] Мальковский И. М., Толеубаева Л. С., Сорокина Т. Е., Тайров А. З., Пузиков Е. М., Толекова А., Абдибеков Д. У., Долбешкин М. В., Поветкин Р. Д. Методика имитационного динамико-стохастического моделирования систем водообеспечения Республики Казахстан // *Материалы МНПК «Водные ресурсы Центральной Азии и их использование», посвященной подведению итогов объявленного ООН 10-летия «Вода для жизни»*. – Алматы, 2016. – Т. 1. – С. 125-132.
- [20] Ji L., Wu T., Xie Y., Huang G., Sun L. A novel two-stage fuzzy stochastic model for water supply management from a water-energy nexus perspective // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 277. – P. 123386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123386>.
- [21] Manakou V, Tsiakis P., Tsiakis T., Kungolos A. Management of the Hydrological Basin of Lake Koronia using Mathematical Programming <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=15664>.
- [22] Dong C., Zhang J., Guo S. Scenario analysis for sustainable water management // *Journal of Hydrology*. – 2013. – Vol. 493. – P. 45-58.

REFERENCES

- [1] Regulations on the division of flow in the Shu River basin. USSR Ministry of Water Resources. Moscow, 1983. 12 p. (in Russ.).
- [2] Provisional Regulation on Water Distribution in the Talas, Kurkureu-su, and Aspara Rivers. Main Water Management Administration of the USSR. Frunze, 1948. 25 p. (in Russ.).
- [3] Malkovsky I. M. Geographical Foundations of Water Supply for Natural and Economic Systems in Kazakhstan. Almaty, 2008. 204 p. (in Russ.).
- [4] Medeu A. R., Malkovsky I. M., Toleubaeva L. S. Water resources of Kazakhstan: assessment, forecast, management (concept). Almaty, 2012. 94 p. (in Russ.).
- [5] Medeu A. R., Malkovsky I. M., Toleubaeva L. S. Water resource management in the Republic of Kazakhstan: problems and solutions // *Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference «Hydrology and Innovative Technologies in Water Management»*. Astana, 2015. P. 18-22 (in Russ.).
- [6] Malkovsky I. M., Toleubaeva L. S. On the formation of a unified water supply system in the Republic of Kazakhstan // *Issues of geography and geoecology*. Almaty, 2010. No. 2. P. 19-23 (in Russ.).
- [7] Alimkulov S., Makhmudova L., Zagidullina A. Long-term water level projections for Lake Balkhash using scenario-based water balance modeling under climate and socioeconomic uncertainties // *Water*. 2025. Vol. 17, No. 13. Article 2021. DOI: 10.3390/w17132021.
- [8] Alcamo J., Gallopín G. Building a new generation of scenarios for environmental change. Dordrecht: Springer, 2009. 290 p.
- [9] Henriques V. Transboundary water management in Central Asia: Challenges and opportunities // *Environmental Science & Policy*. 2015. Vol. 54. P. 25-36.
- [10] Mahmoud M., Liu Y., Hartmann H., Stewart S. A formal framework for scenario development in water resources planning // *Environmental Modelling & Software*. 2011. Vol. 26, No. 7. P. 798-808.
- [11] Dong C., Zhang J., Guo S. Scenario analysis for sustainable water management // *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 493. P. 45-58.
- [12] Leman M., Tairov A., Malkovskiy I., Toleubaeva L., Aldiyarova A. Dynamic-stochastic model of sustainable water resources management in Kazakhstan // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2025. No. 6 (474). P. 151-167. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.577.
- [13] Malkovsky I. M., Toleubaeva L. S., Tolekova A., Dolbeshkin M. V., Puzikov E. M. Evaluation model of development scenarios for the unified water supply system of the Republic of Kazakhstan // *Problems of Geography and Geoecology*. Almaty, 2015. No. 2. P. 15-25 (in Russ.).

- [14] Bekturganov N. S., Pivovarov A. N., Malkovsky I. M. Water security of the Republic of Kazakhstan: the trans-Kazakhstan «Ertis-Syrdarya» canal // *Izvestiya NAEN*. Astana, 2013. No. 4. P. 4-9 (in Russ.).
- [15] Official website of MIKE powered by DHI. [Electronic resource]. – URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/> (in Russ.).
- [16] Bekturganov N. S., Pivovarov A. N., Malkovsky I. M. Water security of the Republic of Kazakhstan: the trans-Kazakhstan Ertis-Syrdarya canal // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. Astana, 2013. No. 4. P. 4-9 (in Russ.).
- [17] Official website of the Hydrologic Engineering Center (HEC), U.S. Army Corps of Engineers. [Electronic resource]. – URL: <http://www.hec.usace.army.mil/> (in Russ.).
- [18] Official website of Aquaveo, LLC. [Electronic resource]. – URL: <https://www.aquaveo.com/>.
- [19] Malkovsky I. M., Toлеубаева L. S., Sorokina T. E., Tairov A. Z., Puzikov E. M., Toлекова A., Abdibekov D. U., Dolbeshkin M. V., Povetkin R. D. Methodology of simulation dynamic-stochastic modeling of water supply systems of the Republic of Kazakhstan // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Water Resources of Central Asia and Their Use»*, dedicated to summarizing the UN-declared Decade «Water for Life». Almaty, 2016. Vol. 1. P. 125-132 (in Russ.).
- [20] Ji, L., Wu, T., Xie, Y., Huang, G., Sun, L. (2020). A novel two-stage fuzzy stochastic model for water supply management from a water-energy nexus perspective. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123386>.
- [21] Manakou V., Tsiakis P., Tsiakis T., Kungolos A. Management of the Hydrological Basin of Lake Koronia using Mathematical Programming <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=15664>.
- [22] Dong C., Zhang J., Guo S. Scenario analysis for sustainable water management // *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 493. P. 45-58.

**И. М. Мальковский¹, Л. С. Толеубаева², А. З. Таиров³, М. В. Леман^{*4},
А. У. Абдибеков⁵, К. Т. Нарбаева⁶, А. Толекова⁷**

¹ Д. г. н., профессор, академик КазНАЕН, ГНС
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; aidatol_86@mail.ru)

² Д. г. н., ГНС (АО «Институт географии и водной безопасности»,
Алматы, Казахстан; lstoleu@mail.ru)

³ К. г. н., ВНС, руководитель лаборатории
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; amra2005@list.ru)

^{4*} PhD докторант, НС (КазНАИУ, АО «Институт географии и водной безопасности»,
Алматы, Казахстан; maxleman131@gmail.com)

⁵ НС (АО «Институт географии и водной безопасности»,
Алматы, Казахстан; darkhan@mail.ru)

⁶ PhD, СНС (АО «Институт географии и водной безопасности»,
Алматы, Казахстан; narbayeva.kn@gmail.com)

⁷ НС (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; aidatol_86@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСГРАНИЧНОГО ШУ-ТАЛАССКОГО БАСЕЙНА НА ОСНОВЕ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Аннотация. Сформулированы проблемы развития системы водобеспечения (СВО) Республики Казахстан в трансграничном Шу-Таласском бассейне и определены цели и задачи моделирования. В качестве научного метода достижения целей предложена методология системного анализа, рассматривающего проблему устойчивого водобеспечения как сложную систему с присущими ей свойствами многомерности, конфликтности, неопределенности. В качестве инструмента системного анализа использована технология математического динамико-стохастического моделирования сложных систем, представляющего собой численный метод проведения на компьютере вычислительных экспериментов с математическими моделями, имитирующими поведение реальных объектов, во времени в течение заданного периода. Даны описание хронологической структуры систем водобеспечения бассейнов рек Шу и Талас, логико-математическое описание СВО. Благодаря универсальности заложенных методологических подходов и использованию формализованных математических моделей разработанная методика обладает высокой степенью адаптивности и масштабируемости. Методика может быть использована для оценки сценариев водопользования, выявления потенциальных конфликтов интересов между водопользователями, анализа рисков и обоснования согласованных межгосударственных решений, направленных на обеспечение устойчивого водохозяйственного развития и укрепление региональной водной безопасности.

Ключевые слова: математическое (имитационное) моделирование, компьютерная программа, система водобеспечения, трансграничный бассейн, водная безопасность, метод Монте-Карло.

I. M. Malkovsky¹, L. S. Toleubaeva², A. Z. Tairov³, M. V. Leman^{*4},
A. U. Abdibekov⁵, K. T. Narbayeva⁶, A. Tolekova⁷

¹ Doctor of Geography, Professor, Academician of the Kazakh National Academy of Sciences, Chief Researcher (JSC «Institute of Geography and Water Safety», Almaty, Kazakhstan; *aidatol_86@mail.ru*)

² Doctor of Geography, Chief Researcher (JSC «Institute of Geography and Water Safety», Almaty, Kazakhstan; *listoleu@mail.ru*)

³ Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Head (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; *amra2005@list.ru*)

^{4*} PhD doctoral student, research associate (KazNARU, JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; *maxleman131@gmail.com*)

⁵ Research associate (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; *darkhan@mail.ru*)

⁶ PhD, Senior Researcher (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; *narbayeva.kn@gmail.com*)

⁷ Research associate (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; *aidatol_86@mail.ru*)

MODELING OF THE WATER SUPPLY SYSTEM OF THE TRANSBOUNDARY SHU-TALAS BASIN BASED ON A DYNAMIC-STOCHASTIC APPROACH

Abstract. The problems of developing the water supply system (WSS) of the Republic of Kazakhstan in the transboundary Shu-Talas basin are formulated, and the goals and objectives of modeling are defined. As a scientific method for achieving the objectives, a system analysis methodology is proposed, which considers the problem of sustainable water supply as a complex system with its inherent properties of multidimensionality, conflict, and uncertainty. The technology of mathematical dynamic-stochastic modeling of complex systems is used as a tool for system analysis, which is a numerical method for conducting computational experiments on a computer with mathematical models that simulate the behavior of real objects over time during a given period. A description of the chorological structure of the water supply systems of the Shu and Talas River basins is given, and a logical-mathematical description of the WSS is provided. Due to the versatility of the underlying methodological approaches and the use of formalized mathematical models, the developed methodology has a high degree of adaptability and scalability. The methodology can be used to assess water use scenarios, identify potential conflicts of interest between water users, analyze risks, and justify agreed interstate decisions aimed at ensuring sustainable water management development and strengthening regional water security.

Keywords: mathematical (simulation) modeling, computer program, water supply system, transboundary basin, water security, Monte Carlo method.