

А.Е. Баймаганбетов¹
Техн. ғылымд. канд., доцент Е.В. Гайдукова²
Техн. ғылымд. канд., доцент Г.И. Сұлтамұрат¹

СТОХАСТИКАЛЫҚ БОЛЖАМ ӘДІСІН СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАННЫҢ ӨЗЕН БАССЕЙНДЕРІНЕ ҚОЛДАНУ

Түйін сөздер: стохастикалық модельдеу, гидрологиялық болжам, ағынның тәуліктік қабаттары, статистикалық сипаттамалар, Солтүстік Қазақстанның өзендері

Бастапқы статистикалық моменттер үшін дифференциалдық теңдеулер жүйесін шешуге негізделген стохастикалық фондық болжам әдісі қарастырылды. Әдіс Есіл және Тобыл бассейндерінің өзендеріне қолданылды. Бірінші және екінші бастапқы моменттерді тексеру болжамдары су тасқыны кезеңіне тәуліктік күнбұрындылығымен жасалды. Бірінші момент екіншісіне қарағанда сенімді болатындығы анықталды. Осындай статистикалық сипаттамалардың болжамы Қазақстан экономикасы секторларының өндірістік функциялары үшін қажетті қамтамасыздық қисықтарын шығаруға мүмкіндік береді.

Кіріспе. Су ресурстарын пайдаланумен тығыз байланысты экономиканың көптеген салалары гидрологиялық болжамдарды қажет етеді. Сенімді болжам өндіріс қажеттіліктерін ескере отырып экономикалық қызметті оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Экономиканың суға тәуелді салаларының, жекелеген кәсіпорындардың және су тұтынушылардың өндірістік функцияларына еңбек ресурстары, күрделі салымдар және табиғи ресурстар жатады [9], оған өндірістік өнім, құрылымдардың жұмысының қауіпсіздігі, экологиялық қауіпсіздік және т.б. тәуелді (суды пайдалану сипатына байланысты). Табиғи ресурстардың ең динамикалық құрамдас бөлігі – су, дәлірек айтсақ өзен ағынының өзгеруін анықтайтын, есептелген гидрологиялық сипаттамалары (норма, вариация және асимметрия

¹Баишев университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

²Ресей мемлекеттік гидрометеорологиялық университеті, Санкт-Петербург, Қазақстан

коэффициенттері). Динамикалық заңдарға негізделген модельдер кең таралған, бірақ олар ағынның пайда болуында кездейсоқтық элементтерін ескермейді (мысалы, [2]). Алайда стохастикалық дифференциалдық теңдеулерге негізделген стационарлық емес гидрологиялық кездейсоқ процестерді модельдеуге және болжауға мүмкіндік беретін, оның ішінде жылдық динамиканы қосатын әдістер бар (мысалы, [5]).

Мақалада келтірілген зерттеудің мақсаты – гидрологиялық сипаттамалардың стохастикалық фондық болжамының әдісін сынау болып табылады. Болжамдар тәуліктік күнбұрындылығымен жасалды. Күрт көтерілуімен және құлдырауымен сипатталатын көктемгі су тасқыны кезінде Солтүстік Қазақстанның су алаптарында жүргізілді.

Ағын сипаттамаларының стохастикалық фондық болжау әдісі.

Динамикалық болжам есептеу торабының түйіндеріндегі өтімдердің (деңгейлердің) нақты мәндерін көрсетумен шектеледі. Мұндай қатаң детерминистік көзқарас ағынның пайда болуының кездейсоқ факторларын, сондай-ақ бастапқы мәліметтерді, қателіктердің параметрлерін және сыртқы әсерлерді орнатудағы қателіктерді ескермейді (болжамды жауын-шашынның жүрісі). Гидрологиялық есептеулерде экономиканың суға тәуелді секторларының өндірістік функцияларына тоқтала отырып, су өтімдері мен су деңгейлерінің ықтималды бағалауы қолданылады. Ағындардың $p(Q)$ немесе деңгейлердің $p(H)$ ықтималдық тығыздығының үлестірулерінің қисықтарын (немесе болжанған үлестірулерін) білу, оның пайда болу ықтималдығын ағынның (деңгейдің) кез-келген болжамды мәніне тағайындауға мүмкіндік береді. Бұл экономика үшін қате шешімдер қабылдау қаупін бағалау мүмкіндігін кеңейтеді.

Динамикалықтан стохастикалық болжамға ауысу үшін Фоккер-Планк-Колмогоров (ФПК) теңдеуін қолданып, өзен ағынының моделін стохастикалық түрде қорыта алуға болады $\tau dQ/dt + Q/k = \dot{X}$ [7]. Келесі белгілеулер модельге енгізілген: $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$, $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$. Мұнда, k – ағын коэффициенті; τ – өзен бассейнінің релаксация уақыты; \dot{X} – жауын-шашынның қарқындылығы, \tilde{c} және \tilde{N} – ақ Гаусс шуы $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ қарқындылығымен және $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ өзара қарқындылығымен бірге. Кездейсоқ процестер теориясында белгілі стохастикалық қорыту процедурасы [7] қолданылады және келесі теңдеу шығады:

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(A(Q,t)p(Q,t)) + 0.5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(B(Q,t)p(Q,t)), \quad (1)$$

мұнда $A(Q,t)$ және $B(Q,t)$ – ағыс пен диффузия коэффициенттері.

Бұл тендеуді жоғарыдағы мақсатты шешу үшін қолдануға болады. Алайда, іс жүзінде (1) жуықтап қарапайым дифференциалдық тендеулер жүйесімен шектелу жеткілікті [10]:

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})m_1 + \bar{N} - 0,5G_{\bar{c}\bar{N}}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\bar{c}\bar{N}}m_2 + 3G_{\bar{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\bar{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 4 \cdot 3,5G_{\bar{c}\bar{N}}m_3 + 6G_{\bar{N}}m_2, \end{aligned} \quad (2)$$

мұнда m_i – i -ші реттің бастапқы статистикалық моменттері. Алғашқы үш тендеу ассиметриялық ықтималдық үлестірімінің эволюциясын алу үшін жеткілікті.

Жүйенің параметризациясының әртүрлі нұсқалары болуы мүмкін (2). $c = 1/k\tau$, $N = \dot{X}/\tau$ формулаларын ескере отырып, сонымен қатар, k және τ коэффициенттері модельді оңтайландыру кезінде, ал \dot{X} – ауа райы болжамынан анықталған соң, белгілі m_1 , m_2 және m_3 қолданып, жүйенің (2) алғашқы үш тендеуінен $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$ және $G_{\bar{c}\bar{N}}$ қарқындылықтарын анықтауға болады. Бұл коэффициенттерді ағындыны 30 күндік бақылаулар негізінде анықтауға болады.

Тәулік ішінде су өтімдерінің мәндері көп ауытқуларға ұшырайды. Олар өлшенбейді және тіркелмейді. Ал іс жүзінде тек орташа тәуліктік мәндермен жұмыс жасалады, яғни су өтімдерінің тәулік ішіндегі ауытқулардың статистикалық жалпылауын қолданады. Бастапқы моменттерге арналған тендеулер жүйесінің (2) шешімі алғашқы үш моменттің болжамды мәндері болып табылады. Бұл моменттер орташа тәуліктік мәнді, тәулік ішіндегі су өтімдерінің вариациясын ($Cv = \sqrt{m_2 - m_1^2} / m_1$) және орташа мәннің модальдіден ауытқуын сипаттайды ($Cs = (m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3)/(Cv^3m_1^3)$).

Солтүстік Қазақстанның өзен бассейндерінде әдісті апробациялау. Зерттеу нысандары ретінде Қазақстан аумағында орналасқан Есіл және Тобыл өзендерінің бассейндеріндегі 11 гидрологиялық бекеттер таңдалды (кесте 1). 2014 жылғы су тасқыны кезеңінің 60 тәулігі үшін мынадай бастапқы деректер пайдаланылды: судың орташа тәуліктік өтімдері, ауаның орташа тәуліктік температурасы, тәулік ішіндегі жауын-шашын сомасы және су тасқыны басталған күнгі қар қоры.

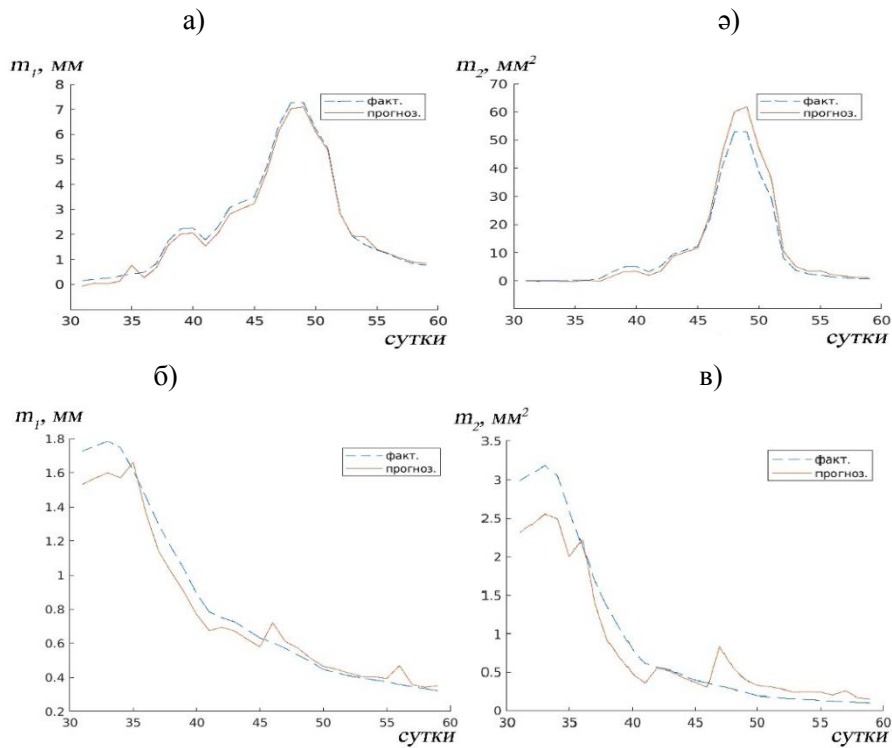
Есіл және Тобыл өзендерінің бассейндеріндегі гидрологиялық бекеттердің тізімі

Өзен — бекет	Су жинағыш ауданы, км ²	Ауа райын болжау станциясы
Жабай — Атбасар а.	8530	Атбасар
Қалкутан — Қалкутан а.	16500	Новомарковка
Есіл — Түрген а.	3240	Ақкөл
Желкуар — Чайковский а.	4324	Жетықара
Тобыл — Гришенка а.	13100	Тобыл
Аят — Варваринка а.	9020	Рудный
Тобыл — Қостанай	28000	Қостанай
Тобыл — Милютинка а.	32700	Жетықара
Үй — Уйское а.	36752	Михайловка
Есіл — Тоқсан би а.	90000	Атбасар
Шағалалы — Павловка а.	1750	Ақкөл

Аз қателікпен статистикалық моменттерді алуға мүмкіндік беретін болжамдық жүйенің параметрлерін оңтайландыру болжамды шығару күнінің алдындағы 30 күнде жүргізілді. Динамикалық параметрлеу процедурасы келесі дереккөзден алынды [6]. Ықтималдық моменттерін тексеру болжамдары күнделікті күнбұрындылығымен келесі отыз тәулікке жасалған. 1-суретте мысал ретінде 30 күндегі нақты және болжамды гидрографтар көрсетілген. 2-кестеде S/σ_{Δ} (S – орташа квадраттық қателік, σ_{Δ} — өзгерістердің орташа квадраттық ауытқуы) арақатынасы түріндегі тексеру болжамдарын бағалауы көрсетілген.

2-кестеде № 1, 3, 4, 5, 10, 11 гидрологиялық бекеттердегі көрсетілген S/σ_{Δ} арақатынасының сандық мәндері m_1 алғашқы бастапқы момент үшін 0,8-ден аспайды. Бұл көрсеткіш 30 күндік тексеру болжамдары үшін қанағаттанарлық нәтиже болып табылады.

m_2 екінші бастапқы моменті үшін нәтиже біршама нашар: тек төрт су жинағыш ауданы үшін S/σ_{Δ} арақатынасы рұқсат етілген 0,8 мәннен аспайды. m_1 , m_2 сәйкесінше ағын қабатын мм-де және мм² сипаттайтындығын ескеру қажет. Көптеген гидрологиялық бекеттерде нақты ағын қабаттары мен болжамды ағын қабаттарының мәндері арасындағы айырмашылықтары мм-де үлкен емес (1 сурет), бірнеше миллиметрден аспайды, бірақ S/σ_{Δ} критерийі бойынша әдістің тиімділігін бағалау кезінде қанағаттанарлықсыз нәтиже туындайды. Бұл нәтижені ағынды қабаттағы кішігірім бір күндік ауытқуларды сипаттайтын σ_{Δ} мәнімен түсіндіруге болады.



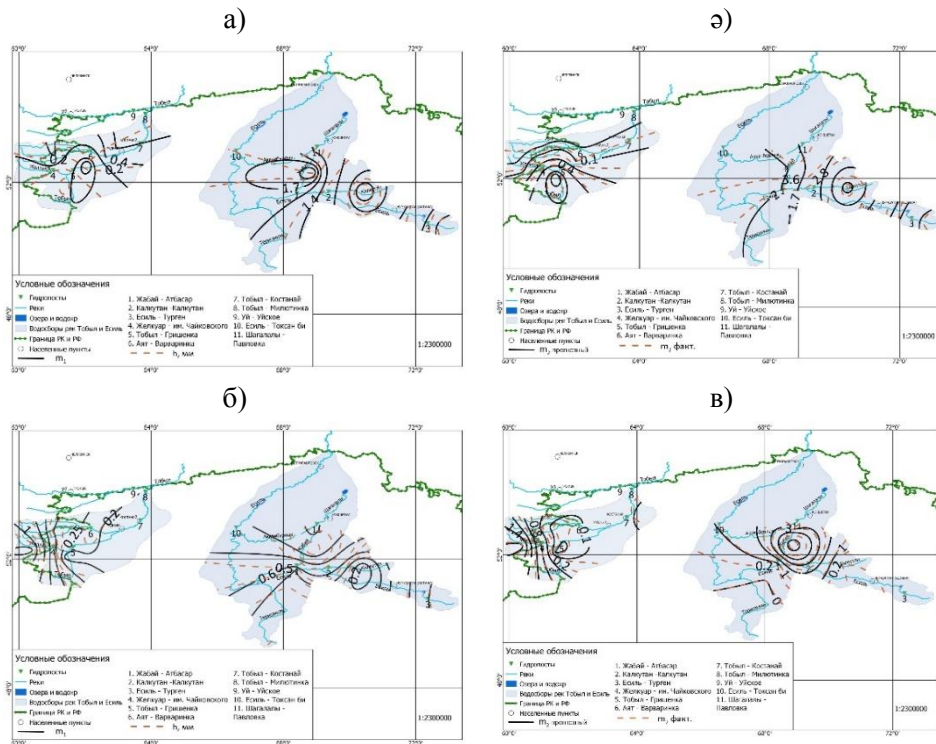
Сур. 1. Нақты және болжамды бірінші m_1 (а, б) және екінші m_2 (ә, в) бастапқы моменттердің өзгеруі: а, ә – Желқуар өз. – Чайковский а.; б, в – Есіл өз. – Тоқсан би а.

Кесте 2

Болжамды әдістің тиімділігін бағалау критерийлерінің сандық мәндері

№	Өзен — бекет	S/\square_{Δ}	
		m_1	m_2
1	Жабай — Атбасар	0,31	0,19
2	Қалкутан — Қалкутан	1,74	0,20
3	Есіл — Түрген	0,68	1,67
4	Желқуар — Чайковский	0,14	0,46
5	Тобыл — Гришенка	0,75	0,42
6	Аят — Варваринка	1,27	1,68
7	Тобыл — Қостанай	6,03	2,05
8	Тобыл — Милютинка	3,06	1,43
9	Үй — Уйское	1,16	0,91
10	Есіл — Тоқсан би	0,47	1,26
11	Шағалалы — Павловка	0,83	2,15

Изолиния карталар түріндегі фондық ықтималдық болжамның мысалы 2 суретте көрсетілген (мәндер ағын қабаттарда берілген). Алғашқы екі момент статистикалық гидрологиялық сипаттамаларды (норма, вариация коэффициенті) анықтауға жеткілікті, демек, қарастырылып отырған аумақтың кез-келген нүктесінде Қазақстан экономикасы секторларының өндірістік функцияларына кіретін күнделікті ағынды қабатының мәндері үшін қамтамасыз ету қисығын табуға да жеткілікті [11].



Сур. 2. Болжам басталған күннен бастап 5 (а, ә) және 25 (б, в) тәуліктен кейін нақты және болжамды бірінші (а, б) және екінші (ә, в) статистикалық бастапқы моменттердің үлестіру карталарының мысалы (болжам тәуліктік қадаммен берілді).

Алынған ықтималдық сипаттамаларын үлестіру карталары β критерийі бойынша бағаланды [8], ол бастапқы моменттер үшін жүйенің шешімінің тұрақсыздық дәрежесін сипаттайды. Тобыл бассейні өзендерінің ағын болжамы кезінде шешім тұрақсыз болып шықты, бұл S/σ_{Δ} жоғары көрсеткіштерімен де расталады. Сонымен қатар, тұрақсыздық негізінен болжамдардың бастапқы кезеңінде көрінеді. Мұндай су жинағыш аудандарында болжам нәтижелерін жақсарту үшін ішінара

инфиниттік гидрология әдіснамасын пайдалану жоспарлануда. Ол математикалық сипаттама мен ағынды болжау үшін қосымша фазалық айнымалыларды тарту арқылы тұрақты шешімдер алуға мүмкіндік береді. Ықтималды болжау аясында бұл ықтималдықтың n -өлшемді үлестіріміне көшуді білдіреді [3]. Қандай қосымша фазалық айнымалыларды қосу керек деген сұраққа жауап беру үшін фракталдық диагностика әдісі қолданылады [12].

Қорытындылай келе, Қазгидрометте су тасқынын болжаудың негізгі әдістері статистикалық, физикалық-статистикалық және суббаланстық әдістер болып табылатындығын ескеру қажет [4]. Бұл әдістердің барлығы ХХ ғасырда жасалған және қазіргі кезде бұл әдістердің кемшілігі барлық компоненттерді тікелей өлшеу немесе анықтау мүмкін емес. Бұл, ең алдымен, бастапқы ақпараттың шектеулі болуына және оның дәлдігінің төмендігіне байланысты. Судың топыраққа инфильтрациясы, судың жер бетінде сақталуы, жалпы булану сияқты жеке параметрлер тым жуықтау (шамамен) бағаланады немесе анықталады. Қазіргі уақытта Солтүстік Қазақстан өзендерінің ағынын болжау үшін қарқынды пайдаланылатын статистикалық әдісте күзгі ылғалдылық негізгі параметрлердің бірі ретінде ескеріледі. Алайда, күзгі ылғалдылық коэффициенті өлшенбейді, бірақ ұзақ уақыт бойы жауын-шашынды ескеретін әдіс бойынша анықталады. Егер күзгі ылғалдылықты есептеу кезінде қателік орын алса, онда, тиісінше, бұл болжамның сапасына айтарлықтай әсер етеді [1]. Қарастырылған стохастикалық әдіс күзгі ылғалдылықты және анықталуы қиын басқа параметрлерді, мысалы, еңгізілген параметрлер мен сыртқы әсерді параметрлеуге мүмкіндік береді.

Қорытынды. Мақалада стохастикалық болжау әдісін Солтүстік Қазақстанның өзен бассейндеріне қолдану мүмкіндігі көрсетілген. Бұл әдіс бастапқы статистикалық моменттер үшін дифференциалдық теңдеулер жүйесін шешуде негізделген. Солтүстік Қазақстан өзендері су тасқынының тез көтерілуі мен құлдырауымен, сондай-ақ су жинағыш аудандарындағы қардың едәуір қорымен сипатталады.

Бір тәулікте ағын қабатының орташа мәнімен вариациясын көрсететін бірінші және екінші бастапқы моменттердің тәуліктік күнбұрындылығымен болжамдары жасалды. Бірінші бастапқы моменті екіншісіне қарағанда сенімді болатындығы анықталды, сонымен қатар болжамды мәндердің нақты мәндерден ауытқуы кейбір су жинағыш аудандарында бірнеше миллиметр ғана құрады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Баймаганбетов А.Е., Гайдукова Е.В. Применение метода стохастического фонового прогноза к речным бассейнам Казахстана // Гидрометеорология и экология. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – № 59. – 2020. – С. 41-50.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М: Академия, 2010. – 298 с.
3. Гайдукова Е.В., Шаночкин С.В., Москалюк М.А. Учет испарения при математическом моделировании речного стока // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – № 52. – 2018. – С. 79-87.
4. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – С. 190-191.
5. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Девятков В.С. Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – № 18. – 2011. – С. 10-20.
6. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Методические указания по дежурству в учебном бюро гидрологических прогнозов. – СПб.: изд. РГГМУ, 2013. – 30 с.
7. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е, испр. и доп. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
8. Коваленко В.В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии. СПб: изд. РГГМУ, 2011. – 107 с.
9. Кротов В.Ф. Основы теории оптимального управления. – М.: Высш. шк., 1990. – 431 с.
10. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В.В. Коваленко. – СПб: изд-во РГГМУ, 2010. – 51 с.
11. Сатенбаев Е.Н., Ибатуллин С.Р., Балгабаев Н.Н. Водопотребление отраслей экономики Казахстана: оценка и прогноз. – Алматы, 2012. – 262 с.
12. Kovalenko V.V., Gaidukova E.V. Influence of climatological norms of the surface air temperature on the fractal dimensionality of the series of long-term river discharge // Doklady Earth Sciences. – 2011. – V. 439. – № 2. – P. 1183-1185.

Қабылданды 18.11.2020

Канд. техн. наук, доцент
Канд. техн. наук, доцент

А.Е. Баймаганбетов
Е.В. Гайдукова
Г.И. Сұлтамұрат

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТОХАСТИЧЕСКОГО ФОНОВОГО ПРОГНОЗА К РЕЧНЫМ БАССЕЙНАМ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Ключевые слова: стохастическое моделирование, гидрологический прогноз, суточные слои стока, статистические характеристики, реки Казахстана

Рассматривается метод стохастического фонового прогноза, основанный на решении системы дифференциальных уравнений для начальных статистических моментов. Метод применяется к рекам бассейнов р. Есиль и р. Тобыл, которые протекают на территории Республики Казахстан. Делаются поверочные прогнозы первого и второго начальных моментов для периода половодья с суточной заблаговременностью. Получено, что первый момент прогнозируется более надежно, чем второй. Прогноз подобных статистических характеристик позволяет получить кривые обеспеченности, необходимые для производственных функций отраслей экономики Казахстана.

A.E. Baimaganbetov, E.V. Gaidukova, G.I. Sultamurat

APPLICATION OF THE METHOD OF STOCHASTIC BACKGROUND FORECAST TO NORTH KAZAKHSTAN'S RIVER BASINS

Keywords: stochastic modeling, hydrological forecast, daily runoff layers, statistical characteristics, rivers of Kazakhstan

The method of stochastic background forecast, based on solving a system of differential equations for the initial statistical moments, is considered. The method is applied to the rivers of the river basins. Esil and Tobyl rivers, which flow on the territory of the Republic of Kazakhstan. Verification forecasts of the first and second initial moments are made for the flood period with a daily advance. It was found that the first moment is predicted more reliably than the second. The forecast of such statistical characteristics allows obtaining the supply curves necessary for the production functions of the sectors of the economy of Kazakhstan.