

УДК [556.16.06+556.16.072]:556.535.3
(282.256.164.6+282.256.166)

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-41-50

Применение метода стохастического фоновго прогноза к речным бассейнам Казахстана

А.Е. Баймаганбетов, Е.В. Гайдукова

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
oderiut@mail.ru

Рассматривается метод стохастического фоновго прогноза, основанный на решении системы дифференциальных уравнений для начальных статистических моментов. Метод применяется к рекам бассейна рек Есиль и 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.

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

Application of the method of stochastic background forecast to Kazakhstan's river basins

A.E. Baimaganbetov, E.V. Gaidukova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The production functions of water-dependent sectors of the economy along with labor and capital investments include natural resources, in particular, the hydrological characteristics (norm, variation and skewness coefficients) determining the river flow dynamics.

The purpose of the study is to test the method of stochastic forecasting of hydrological characteristics with lead time of 24 hours for the catchments of Northern Kazakhstan during the spring flood, which is characterized by a sharp rise and fall.

The stochastic background forecasting method is based on solving a system of differential equations for initial statistical moments. Only average daily values of water discharge, which does change during the day but is not measured and recorded, are usually taken into account, making a statistical generalization of intraday variations in water discharges. The solution of simultaneous equations for the initial moments with daily resolution is the predicted values of the first three moments, characterizing the average daily value, the variation of water flow within a day and the deviation of the average value from the modal one (coefficient of skewness).

Verification forecasts of the first and second initial moments have been made for the flood period with lead time of 24 hours. Optimization of the forecast system parameters has been carried out on 30 days preceding the forecast release date. It has been found that the first moment is predicted more reliably rather than the second one.

The forecast of such statistical characteristics allows to obtain the frequency curve necessary for the production functions of the Kazakhstan economical sectors.

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

For citation: A.E. Baimaganbetov, E.V. Gaidukova. Application of the method of stochastic background forecast to Kazakhstan's river basins. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 41—50. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-41-50

Введение

Многие отрасли экономики, деятельность которых тесно связана с использованием водных ресурсов, нуждаются в гидрологических прогнозах. Надежный прогноз позволяет оптимизировать хозяйственную деятельность с учетом потребностей производства.

Производственные функции водозависимых отраслей экономики, отдельных предприятий и водопотребителей включают в себя трудовые ресурсы, капиталовложения и природные ресурсы [1], от которых зависит выпуск продукции, безопасность эксплуатации сооружений, экологическая безопасность и т. п. (в зависимости от характера водопользования). Самым динамичным компонентом природных ресурсов является вода, точнее так называемые расчетные гидрологические характеристики (норма, коэффициенты вариации и асимметрии), определяющие изменения речного стока. Широко распространены модели, основанные на динамических закономерностях, но они не учитывают элементы случайности в формировании стока (см., например, [2]). Однако существуют методы, основанные на стохастических дифференциальных уравнениях, позволяющие моделировать и прогнозировать нестационарные гидрологические случайные процессы, включая внутригодовую динамику (см., например, [3]).

Цель исследования, представленного в статье, заключается в апробации метода стохастического фонового прогноза гидрологических характеристик с заблаговременностью сутки на водосборах Северного Казахстана в период весеннего половодья, которое характеризуется резкими подъемом и спадом.

Метод стохастического фонового прогноза стоковых характеристик

Динамический прогноз ограничивается указанием конкретных значений расходов (уровней) в узлах расчетной сетки. Такой строго детерминистический подход игнорирует случайные факторы формирования стока, а также погрешности задания начальных данных, параметров моделей и внешних воздействий (ход прогнозных осадков). В гидрологических расчетах, ориентирующихся на производственные функции водозависимых отраслей экономики, используются вероятностные оценки расходов и уровней воды. Знание кривых распределений плотности вероятности расходов $p(Q)$ или уровней $p(H)$ (или прогнозных распределений) позволяет приписывать любому прогнозному значению расхода (уровня) вероятность его появления. Это расширяет возможности оценки риска принятия ошибочных решений для экономики.

Для перехода от динамического прогноза к стохастическому можно использовать уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК), стохастически обобщающего модель для речного стока $\tau dQ/dt + Q/k = \dot{X}$ [4]. В модель вводятся обозначения $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$, $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$, где k — коэффициент стока; τ — время релаксации речного бассейна; $\dot{X}$ — интенсивность осадков; $\tilde{c}$ и $\tilde{N}$ — белые гауссовские шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$.

Применив известную в теории случайных процессов процедуру стохастического обобщения [4], получим уравнение

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(A(Q,t)p(Q,t)) + 0,5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(B(Q,t)p(Q,t)), \quad (1)$$

где $A(Q,t)$ и $B(Q,t)$ — коэффициенты сноса и диффузии.

Это уравнение уже можно применить для решения поставленной задачи. Однако на практике достаточно ограничиться системой обыкновенных дифференциальных уравнений [5], аппроксимирующих уравнение (1):

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

где m_i — начальные статистические моменты i -го порядка. Первых трех уравнений достаточно для получения эволюции асимметричных вероятностных распределений.

Возможны различные варианты параметризации системы (2). С учетом того что $c = 1/k\tau$, $N = \dot{X}/\tau$ и при этом k и τ известны из оптимизации модели, а $\dot{X}$ — из метеопрогноза, необходимо определить только интенсивности $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ из первых трех уравнений системы (2) при известных m_1 , m_2 и m_3 . Они могут быть определены на основе 30-дневных наблюдений за стоком в створе, для которого дается прогноз.

В течение суток происходят изменения расходов воды, которые не измеряются и не фиксируются, — на практике используют только среднесуточные значения, делая как бы статистическое обобщение внутрисуточных вариаций расходов воды.

Решением системы уравнений для начальных моментов (2) являются прогнозные значения трех первых моментов, которые характеризуют среднесуточное значение, вариацию расходов воды внутри суток $(Cv = \sqrt{m_2 - m_1^2}/m_1)$ и отклонение среднего значения от модального $(Cs = (m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3)/(Cv^3m_1^3))$.

Апробация метода на речных бассейнах Казахстана

Объектами исследования было выбрано 11 гидрологических пунктов в бассейнах рек Есиль и Тобыл (табл. 1), расположенных на территории Казахстана. Водосборы не объединены, так как между ними находится бессточная область с многочисленными сезонными водоемами. Использовались следующие исходные данные за 60 суток периода половодья 2014 года: среднесуточные расходы воды, среднесуточная температура воздуха, сумма осадков за сутки и снегозапасы на дату начала половодья.

Таблица 1

Список гидрологических пунктов в бассейнах рек Есиль и Тобыл

List of hydrological stations in the Esil and Tobil river basins

Река — пункт	Площадь водосбора, км ²	Репрезентативная метеостанция
Жабай — с. Атбасар	8530	Атбасар
Калкутан — с. Калкутан	16500	Новомарковка
Есиль — с. Турген	3240	Акколь
Желкуар — с. Чайковский	4324	Жетыкара
Тобыл — с. Гришенка	13100	Тобыл
Аят — с. Варваринка	9020	Рудный
Тобыл — г. Костанай	28000	Костанай
Тобыл — с. Милютинка	32700	Жетыкара
Уй — с. Уйское	36752	Михайловка
Есиль — с. Токсан би	90000	Атбасар
Шагалалы — с. Павловка	1750	Акколь

Оптимизация параметров прогнозной системы производилась на предшествующих дате выпуска прогноза 30 сутках, позволяющих получать статистические моменты с меньшей погрешностью. Процедура динамической параметризации взята из работы [6, с. 9—11]. Поверочные прогнозы вероятностных моментов были сделаны на следующие тридцать суток с суточной заблаговременностью.

На рис. 1 для примера показаны фактические и прогнозные гидрографы за 30 суток. В табл. 2 представлена оценка поверочных прогнозов в виде соотношения S/σ_{Δ} (S — среднеквадратическая погрешность, σ_{Δ} — среднеквадратическое отклонение изменения фактического значения за период заблаговременности от среднего значения этих изменений).

В табл. 2 видно, что численные значения соотношения S/σ_{Δ} на гидрологических постах № 1, 3, 4, 5, 10, 11 не превышают 0,8 для первого начального момента m_1 , что является удовлетворительным результатом для 30 поверочных прогнозов. Для второго начального момента m_2 результат несколько хуже: только для четырех водосборов соотношение S/σ_{Δ} не превышает допустимого значения 0,8. Следует отметить, что m_1 , m_2 характеризуют слой стока в миллиметрах и мм² соответственно. При этом на большинстве гидропостов различия в миллиметрах фактических слоев стока и прогнозных значений невелики (см. рис. 1): не превышают нескольких миллиметров. Однако при оценке эффективности методики по

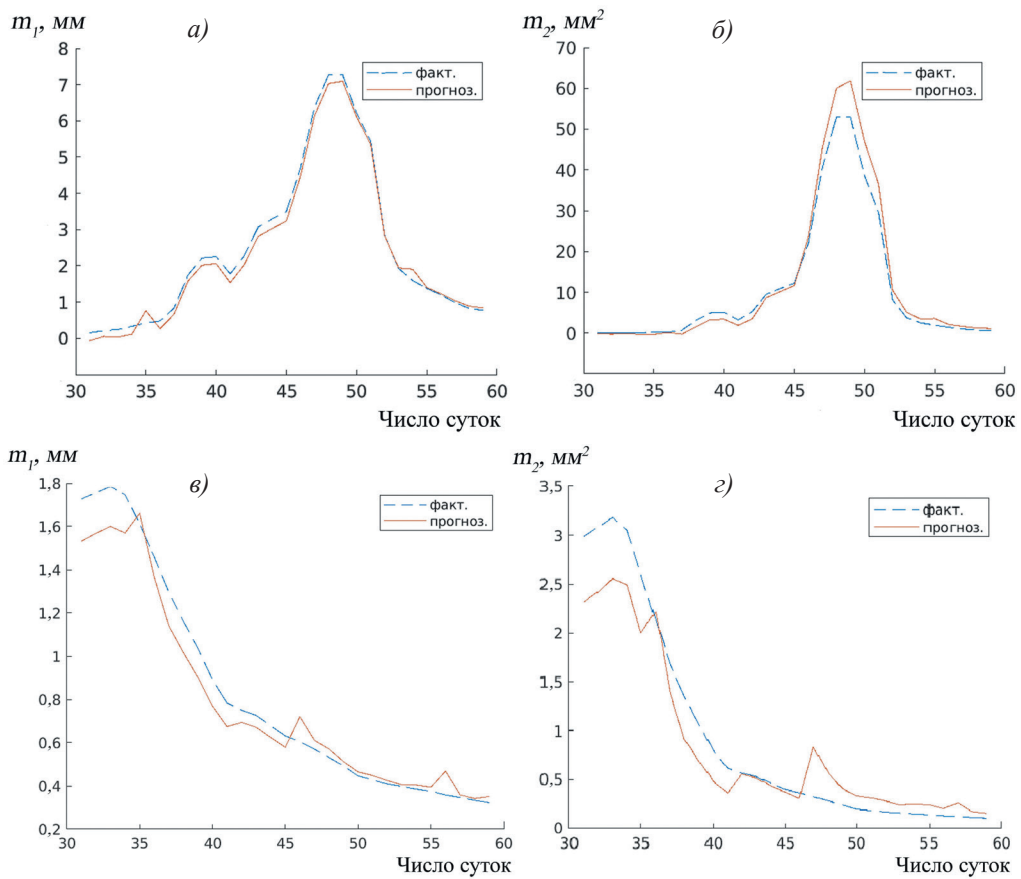


Рис. 1. Изменение фактических и прогнозных первого m_1 (а, в) и второго m_2 (б, г) начальных моментов.
а и б — р. Желкуар — с. Чайковский; в и г — р. Есиль — с. Токсан би.

Fig. 1. Charts of changes in the actual and forecasted first m_1 (а, в) and second m_2 (б, г) initial moments.

а, б — r. Zhelkuar — st. Chaikovsky; в, г — r. Yesil — st. Toxan bi.

критерию S/σ_Δ получается неудовлетворительный результат. Подобный результат можно объяснить малым значением σ_Δ , характеризующим малые односуточные изменения слоя стока.

Пример фоновое вероятностного прогноза в виде карт изолиний представлен на рис. 2 (значения даны в слоях). Первых двух начальных моментов достаточно для определения статистических гидрологических характеристик (нормы, коэффициентов вариации), а значит, и для нахождения в любой точке рассматриваемой территории кривой обеспеченности для суточного слоя стока, значения которой входят в производственные функции отраслей экономики Казахстана [7].

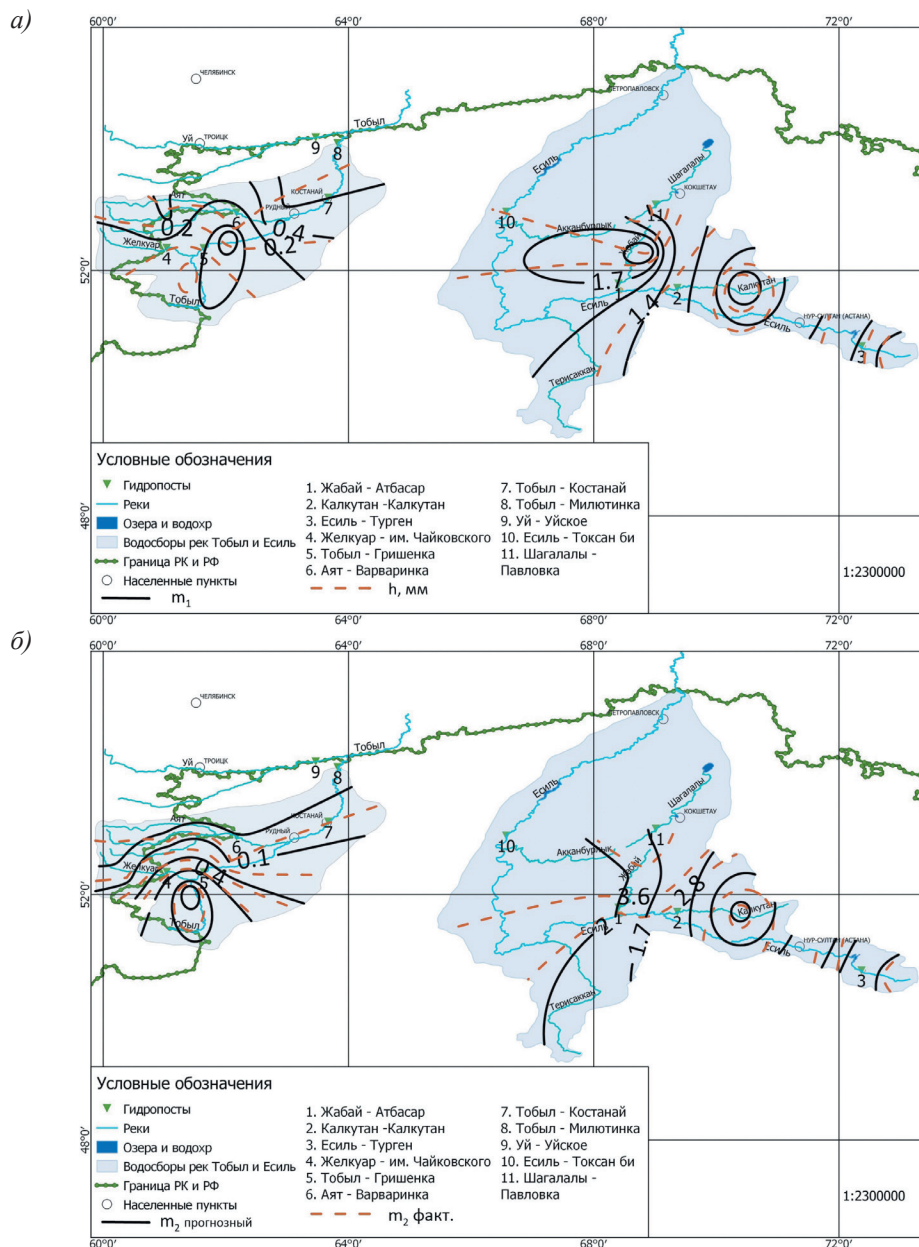


Рис. 2 (начало). Пример карт распределения фактических и прогнозных первого (а, в) и второго (б, г) статистических начальных моментов через 5 суток (а, б) и 25 суток (в, г) от даты начала прогноза (прогноз давался с суточным шагом).

Fig. 2. An example of maps of the distribution of actual and forecasted first (a, в) and second (б, г) statistical initial moments after 5 (a, б) and 25 (в, г) days from the start date of the forecast (the forecast was given in daily increments).

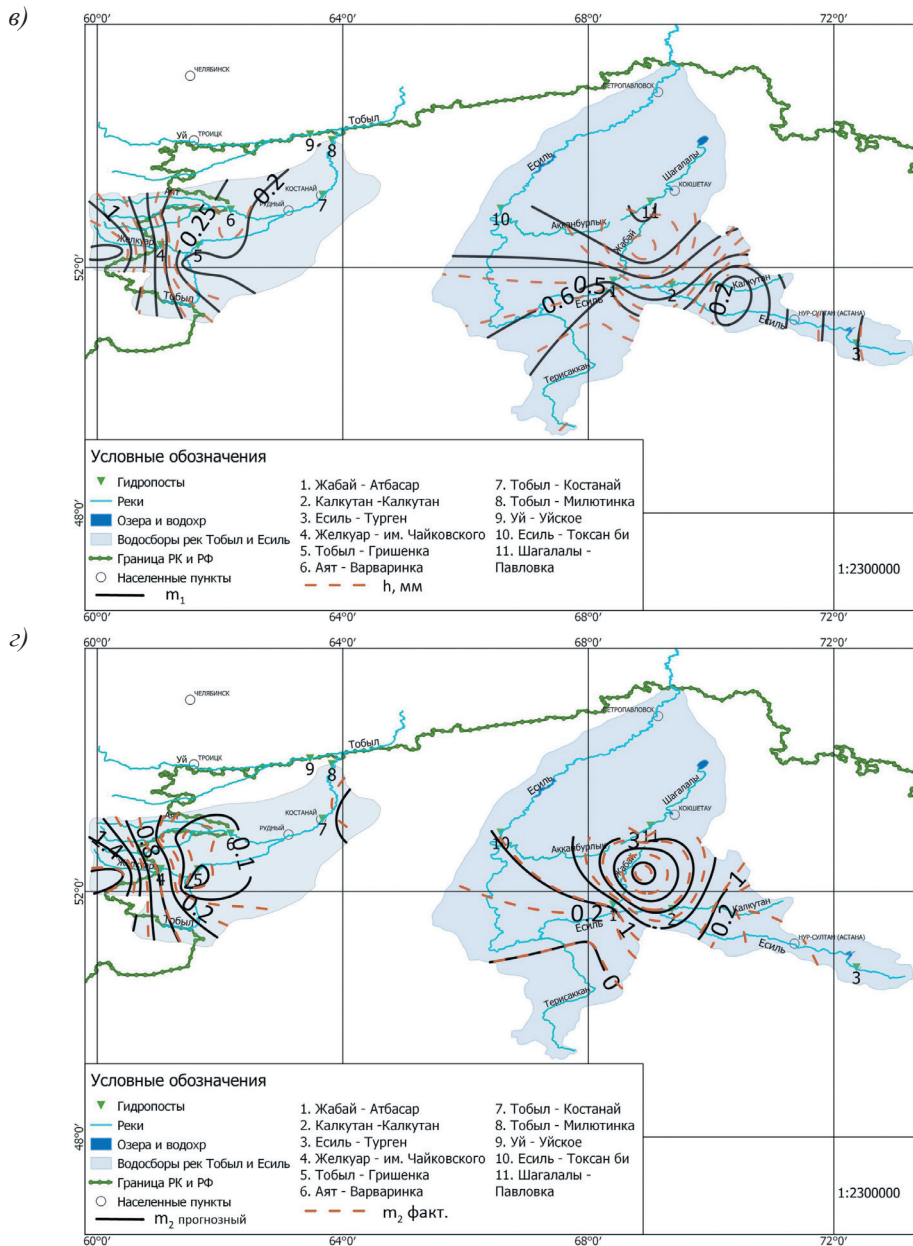


Рис. 2 (окончание). Пример карт распределения фактических и прогнозных первого (а, в) и второго (б, г) статистических начальных моментов через 5 суток (а, б) и 25 суток (в, г) от даты начала прогноза (прогноз давался с суточным шагом).

Fig. 2. An example of maps of the distribution of actual and forecasted first (a, в) and second (б, г) statistical initial moments after 5 (а, б) and 25 (в, г) days from the start date of the forecast (the forecast was given in daily increments).

Таблица 2

Численные значения критериев оценки эффективности прогнозного метода

Numerical values of the criterion
for evaluating the effectiveness of the forecast method

Номер поста	Река — пункт	S/σ_{Δ}	
		m_1	m_2
1	Жабай — с. Атбасар	0,31	0,19
2	Калкутан — с. Калкутан	1,74	0,20
3	Есиль — с. Турген	0,68	1,67
4	Желкуар — с. Чайковский	0,14	0,46
5	Тобыл — с. Гришенка	0,75	0,42
6	Аят — с. Варваринка	1,27	1,68
7	Тобыл — г. Костанай	6,03	2,05
8	Тобыл — с. Милютинка	3,06	1,43
9	Уй — с. Уйское	1,16	0,91
10	Есиль — с. Токсан би	0,47	1,26
11	Шагалалы — с. Павловка	0,83	2,15

Полученные карты распределения вероятностных характеристик оценивались по критерию β [8], который характеризует степень неустойчивости решения системы для начальных моментов. Было получено, что при прогнозе речного стока с водосборов р. Тобыл решение оказывается неустойчивым, что также подтверждается высокими показателями S/σ_{Δ} . При этом неустойчивость проявляется в основном в начальный период прогнозов. Для улучшения результатов прогноза для таких водосборов планируется использовать методологию частично инфинитной гидрологии, позволяющей получать устойчивые решения путем привлечения дополнительных фазовых переменных для математического описания и прогнозирования стока. В контексте вероятностного прогнозирования это означает переход к n -мерному распределению плотности вероятности (см., например, [9]). Для ответа на вопрос, сколько дополнительных фазовых переменных надо привлекать, используется метод фрактальной диагностики [10].

В заключение следует отметить, что в Казгидромете основными методами прогноза погоды являются статистический, физико-статистический и водно-балансовый [11]. Все эти методы были разработаны в XX веке, и на настоящий момент минусом этих методов является то, что не все составляющие могут быть непосредственно измерены или определены. Это связано, прежде всего, с ограниченностью исходной информации и с невысокой ее точностью. Отдельные параметры, такие как инфильтрация воды в почву, поверхностное задержание, суммарное испарение, оцениваются или определяются весьма приближенно. В статистическом методе, который в настоящее время наиболее широко используется для прогноза стока рек Северного Казахстана, учитывается осенняя увлажненность как один из основных параметров. Однако коэффициент осенней увлажненности не измеряется, а определяется по методике, учитывающей

осадки за длительный период. В результате в случае если в расчете осенней увлажненности происходит ошибка, это существенно влияет на качество прогноза. Рассматриваемый стохастический метод позволяет параметризовать осеннюю увлажненность и другие трудно определяемые параметры как задаваемые параметры и внешнее воздействие.

Выводы

В статье была показана возможность применения метода стохастического прогноза к речным бассейнам Казахстана. Метод основан на решении системы дифференциальных уравнений для начальных статистических моментов. Реки Казахстана характеризуются быстрым подъемом и спадом половодья, а также значительными снегозапасами на водосборе.

Были произведены поверочные прогнозы с суточной заблаговременностью первого и второго начальных моментов, показывающих среднее значение и вариацию слоя речного стока за сутки. Получено, что первый начальный момент прогнозируется надежнее, чем второй, причем отклонения прогнозных значений от фактических достигали для некоторых водосборов всего нескольких миллиметров. Планируется оценка устойчивости решений расчетной системы при использовании в качестве внешнего воздействия прогнозных метеорологических характеристик.

Список литературы

1. Кротов В.Ф. Основы теории оптимального управления. М.: Высшая школа, 1990. 431 с.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М: Академия, 2010. 298 с.
3. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Девятков В.С. Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С. 10—20.
4. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Учебник. Изд. 2-е, испр. и доп. СПб: изд-во РГГМУ, 2006. 559 с.
5. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В.В. Коваленко. СПб: изд-во РГГМУ, 2010. 51 с.
6. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В., Громова М.Н., Шевнина Е.В., Девятков В.С. Методика фонового краткосрочного прогнозирования изменения водности // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 65—70.
7. Сатенбаев Е.Н., Ибатуллин С.Р., Балгабаев Н.Н. Водопотребление отраслей экономики Казахстана: оценка и прогноз. Алматы, 2012. 262 с.
8. Коваленко В.В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии. СПб: изд-во РГГМУ, 2011. 107 с.
9. Гайдукова Е.В., Шаночкин С.В., Москалюк М.А. Учет испарения при математическом моделировании речного стока // Ученые записки РГГМУ. № 52. 2018. С. 79—87.
10. 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. No. 2. P. 1183—1185.
11. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. СПб: изд-во РГГМУ, 2007. С. 190—191.

References

1. Krotov V.F. *Osnovy teorii optimal'nogo upravleniya*. Fundamentals of the theory of optimal control. Moscow: Vysshaya shkola, 1990: 431 p. [In Russian].
2. Vinogradov YU.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoye modelirovaniye v gidrologii*. Mathematical modeling in hydrology. Moscow: Academy, 2010: 298 p. [In Russian].
3. Kovalenko V.V., Gaydukova Ye.V., Devyatov V.S. Background forecasting of the formation of daily probabilistic runoff characteristics. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2011, 18: 10—20. [In Russian].
4. Kovalenko V.V., Viktorova N.V., Gaidukova E.V. *Modelirovaniye gidrologicheskikh protsessov*. Modeling hydrological processes. Textbook. St. Petersburg: RSHU. 2006: 555 p. [In Russian].
5. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke obespechennykh raskhodov proyektiruyemykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy pri neustanovivshemsya klimate*. Guidelines for assessing the secured costs of designed hydraulic structures in an unsteady climate / Ed. V.V. Kovalenko. St. Petersburg: RSHU. 2010: 51 p. [In Russian].
6. Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Viktorova N.V., Gromova M.N., Shevnina E.V., Devyatov V.S. Background short-term forecasting methodology for changes in water discharge. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2012, 10: 65—70. [In Russian].
7. Satenbaev E.N., Ibatullin S.R., Balgabaev N.N. *Vodopotrebleniye otrasley ekonomiki Kazakhstana: otsenka i prognoz*. Water Consumption in Kazakhstan: Estimation and Forecast. Almaty. 2012: 262 p. [In Russian].
8. Kovalenko V.V. *Obespecheniye ustoychivosti modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka metodami chastichno infinitnoy gidrologii*. Ensuring the sustainability of modeling and forecasting river flow using partially infinite hydrology methods. St. Petersburg: RSHU. 2011: 107 p. [In Russian].
9. Gaidukova E.V., Shanochkin S.V., Moskalyuk M.A. Accounting for evaporation in the mathematical modeling of river flow. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2018. 52: 79—87. [In Russian].
10. 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, 439 (2): 1183—1185.
11. Georgievsky Yu.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskiye prognozy*. Hydrological forecasts. St. Petersburg: RSHU. 2007: 190—191. [In Russian].

Статья поступила 08.05.2020

Принята к публикации 15.06.2020

Сведения об авторах

Баймаганбетов Азамат Ергалиевич, аспирант, кафедра инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, azamat.baima@gmail.com

Гайдукова Екатерина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, oderiut@mail.ru

Information about authors

Baymaganbetov Azamat Ergalievich, graduate student, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University

Gaidukova Ekaterina Vladimirovna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University