

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 277—292.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):277—292.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.535.3(282.247.441.82)
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-277-292

Прогнозирование расходов воды р. Мармарик (Армения) по уравнению кинематической волны

***Екатерина Владимировна Гайдукова¹, Вардуи Гургеновна Маргарян²,
Игорь Олегович Винокуров¹, Амалия Эдвардовна Мисакян³,
Марта Александровна Кулешова¹***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
Санкт-Петербург, Россия, oderiut@mail.ru

² Ереванский государственный университет (ЕГУ), Ереван, Армения

³ «Центр гидрометеорологии и мониторинга» ГНО, Министерство окружающей среды
Республики Армения, Ереван, Армения

Аннотация. В статье приведен обзор методов краткосрочного прогнозирования расходов воды на горных реках, основанных на физико-статистических и регрессионных уравнениях. Отмечаются требования к прогнозным моделям для армянских рек, которым соответствует модель кинематической волны. Произведена апробация этой модели на реке Мармарик, которая является важным водным объектом Армении. Выявлено, что антропогенное воздействие должно вводиться дополнительным параметром в модель. Получены удовлетворительные результаты поверочных краткосрочных прогнозов по модели кинематической волны.

Ключевые слова: горные реки, математическая модель, параметризация, прогнозы расходов воды, критерии оценки

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке КНРА (Комитет науки Республики Армения) и РЦНИ (Российский центр научной информации) в рамках совместной научной темы «Краткосрочный вероятностный прогноз стока рек в период весеннего половодья» № 20RF-039 и № 20-55-05006\20 соответственно.

Для цитирования: Гайдукова Е. В., Маргарян В. Г., Винокуров И. О., Мисакян А. Э., Кулешова М. А. Прогнозирование расходов воды р. Мармарик (Армения) по уравнению кинематической волны // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 277—292. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-277-292.

Original article

Forecasting water discharges of the river Marmarik (Armenia) according to the kinematic wave equation

*Ekaterina V. Gaidukova¹, Varduhi G. Margaryan²,
Igor O. Vinokurov¹, Amalia E. Misakyan³, Marta A. Kuleshova¹*

¹ Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia, oderiut@mail.ru

² Yerevan State University (YSU), Yerevan, Armenia

³ «Hydrometeorology and Monitoring Center» SNCO, Ministry of Environment of the Republic of Armenia, Yerevan, Armenia

Summary. The article provides an overview of methods for short-term forecasting of water flow in mountain rivers based on physical-statistical and regression equations, conceptual approaches. Requirements for forecast models for the Armenian rivers are noted, which correspond to the kinematic wave model, but so far there are no forecast results for the Armenian rivers using this model. The purpose of the study was to test a mathematical model of a kinematic wave for a short-term forecast of water discharges on the mountainous Armenian river Marmarik. The model of a kinematic wave can be obtained after simplifying the model of channel runoff in a general form, i.e., after excluding from consideration deformations, local constant and variable backwaters from narrowing of channels, confluence of rivers, surge phenomena, and also after excluding the influence of the lower boundary condition, which is responsible for the characteristic of the diffusion spreading of the flood wave.

A kinematic wave model was tested on the Marmarik River, which is an important water body in Armenia. We used series of observations of urgent water discharges during the spring flood from April 1 to June 30 for 2015—2018 at the top of the river Marmarik — Hankavan settlement, lower alignment — Aghavnadzor settlement and at the alignment on the main tributary of the river Gomraget — Meghradzor village. It was found that in the dynamic parametrization of the model, the anthropogenic impact should be introduced as an additional parameter. The obtained values of water discharges when making verification forecasts in the aggregate characterize the kinematic wave model as an effective approach according to the criteria for assessing the quality of forecast methods of the Hydrometeorological Center and Nash—Sutcliffe. The kinematic wave model is easy to use with a small amount of initial information without meteorological data, which will facilitate its implementation for practical applications.

Keywords: mountain rivers, mathematical model, parametrization, water discharges forecasts, evaluation criteria

Acknowledgments: The study was supported by SCRA (Science Committee of the Republic of Armenia) and RCNI (Russian Center for Scientific Information) within the framework of the joint scientific topic “Short-term probabilistic forecast of river flow during the spring flood” No. 20RF-039 and No. 20-55-05006\20, respectively.

For citation: Gaidukova E. V., Margaryan V. G., Vinokurov I. O., Misakyan A. E., Kuleshova M. A. Forecasting water discharges of the river Marmarik (Armenia) according to the kinematic wave equation. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):277—292. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-277-292.

Введение

На формирование стока горных и предгорных рек оказывают влияние особенности соответствующих водосборов, связанные с высотной поясностью,

свойствами подстилающей поверхности, возможным питанием рек водами ледников, поэтому при моделировании (прогнозировании) процессов стокообразования с горных водосборов с любой заблаговременностью должны учитываться перечисленные факторы.

При краткосрочных прогнозах расходов воды широко используются физико-статистические уравнения, которые рассчитываются по данным стокоформирующих факторов и их распределения по высоте гор и в пределах высотной зоны. Такой подход апробирован на р. Кубани и ее притоках, реках Ингури, Терек, реках Сибири и Средней Азии [1].

В Гидрометцентре России для рек Мзымта, Сочи, Западный Дагомыс, Куапсе, Туапсе и Вулан используется методика определения вероятности опасных наводнений в течение следующих суток в зависимости от гидрометеорологической информации на дату составления прогноза. Эта методика учитывает природные особенности региона и практически всю доступную гидрометеорологическую информацию по водосборам указанных рек и основывается на региональных моделях формирования талого и дождевого стока [2].

Также в Гидрометцентре России разработана прогнозная система для рек бассейна Кубани, вычислительной основой которой являются физико-статистические методы прогноза, учитывающие атмосферные процессы и гидрологическую обстановку в речной сети, а также концептуальная модель формирования тало-дождевого стока [3].

В последние годы в прогностических целях в гидрологических исследованиях все чаще используется спутниковая информация о снежном покрове. Например, в методике прогноза среднедекадного стока рек Варзоб и Тар (реки Центральной Азии, Республика Таджикистан и Киргизская Республика соответственно) учитывается индекс снежного покрова, который рассчитывается по данным спутниковых снимков для высотных зон с шагом 200 м [4].

Практическое распространение получили также модели, основанные на регрессионных уравнениях. Например, для прогноза уровня воды реки Мзымта (Краснодарский край) предложены методики, основанные на регрессионном анализе и нейросетевых технологиях [5], а также теории Марковских процессов с дискретным временем [6]. Использование множественной регрессии с двумя предикторами (расходом воды за предшествующий период и осадками) привело к улучшению прогнозов на реке Нарым (река в Восточно-Казахстанской области Казахстана, правый приток Иртыша) [7]. Для реки Амыл (горная река Красноярского края) сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней воды показал, что однофакторные зависимости имеют более высокие коэффициенты детерминации, чем модель множественной регрессии [8].

Правительством Армении [9] обозначены пожелания к методикам прогноза расходов воды рек Республики, которые должны основываться на доступных исходных данных, учитывать процесс формирования стока на горных водосборах и иметь возможности для развития. К таким подходам можно отнести модель кинематической волны, которая имеет широкую апробацию и высокую эффективность применения на реках всего мира, см. например, [10, 11, 12]. Но результаты

прогноза по этой модели на реках Армении отсутствуют. В настоящее время для армянских рек относительно успешно применяются регрессионные модели, которые имеют локальное применение, требуют значительный массив исходной информации и зачастую являются неэффективными при прогнозах катастрофических явлений на горных реках (см., например, [13]).

Цель исследования заключается в апробации математической модели кинематической волны для краткосрочного прогноза расходов воды на армянской реке Мармарик, бассейн которой является стратегически важным объектом с точки зрения содержащихся в реке водных запасов для использования их в сельскохозяйственном и энергетическом секторах [14]. К тому же долина р. Мармарик имеет большие рекреационные возможности, в ее долине находится месторождение минеральной воды «Анкаван» [15, 16].

Модель кинематической волны

Модель руслового стока в общем виде имеет следующий вид:

$$\begin{cases} -\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U^2}{C^2 h}; \\ b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q; \\ b \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = q_1, \end{cases} \quad (1)$$

где z — отметка дна; h — глубина; g — ускорение свободного падения; U — скорость потока; C — коэффициент Шези; b — ширина потока; Q — расход воды; G — расход наносов; q, q_1 — приток воды и наносов на участке реки; t — время; x — координата.

Первое уравнение системы — гидродинамическое уравнение равновесия, второе уравнение системы описывает закон сохранения массы воды, третье уравнение — закон сохранения количества наносов. Так как приведенная система незамкнутая, то необходимо четвертое уравнение для учета расходов наносов $G = f(h, U)$.

Чтобы решить систему уравнений (1), необходимо найти $h = f(x, t)$, $z = f(x, t)$, $U = f(x, t)$, что позволит давать прогноз водного режима и русловых деформаций. Кроме того, следует задать начальные и граничные условия.

В практике прогнозов используют упрощенные варианты общей модели руслового стока (1). При исключении деформаций не рассматривается изменение отметок дна, перемещение по длине русла твердых частиц. В системе (1) остаются два первых уравнения — это система Сен-Венана, которую можно использовать:

- если ложе русла устойчиво к деформациям;
- если деформации есть, но их скорость очень мала по сравнению со скоростью воды (изменение уровня воды происходит, в основном, только за счет наполнения русла водой);

— если деформации есть, но их прогноз, т.е. режим движения наносов и изменение отметок дна практически не важен (при прогнозах деформация рассматривается как некий мешающий процесс, который можно учесть через параметры уравнения).

При исключении локальных постоянных и переменных подпоров от сужений русел, впадения рек, сгонно-нагонных явлений игнорируется сила инерции, т.е. предполагается, что режим движения установившийся и равномерный. Система (1) сводится к уравнению диффузионной волны, содержащему диффузионный член, отвечающий за расплывание волны.

Пренебрегая диффузионным членом, получена модель кинематической волны:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c(Q) \frac{\partial Q}{\partial x} = c(Q)q, \quad (2)$$

где $c(Q)$ — скорость перемещения паводочной волны; q — величина притока на участке реки.

Чтобы решить уравнение (2), надо найти изменение расхода воды по времени и по координате (по расстоянию). При этом следует учитывать заданные граничные условия $Q_b = f(t)$, $t \in [t, t + \tau]$ и начальные условия $Q(t = 0) = Q(x)$, $x \in [x_b, x_n]$ (здесь Q_b — расход воды в верхнем створе; τ — время заблаговременности; x_b , x_n — координаты верхнего и нижнего створов).

Исходные данные

Река Мармарик (рис. 1) является основным и самым многоводным притоком р. Раздан. Длина реки составляет 37 км, площадь водосборного бассейна — 427 км², средняя высота бассейна — 2300 м, отметки истока и устья — 2520 и 1699 м соответственно. Средний уклон речного бассейна — 22 %. Питание реки снего-дождевое (74,8 %) и подземное (25,2 %) [17], половодье наблюдается весной и в начале лета — на этот период приходится 65—80 % годового стока.

Река течет в основном по направлению с северо-запада на юго-восток, русло выделяется извилистостью, в частности в верхнем течении. Рельеф бассейна р. Мармарик типично горный — он сильно расчленен долинами, оврагами и водотоками. С орографической точки зрения он находится в области Северо-Восточных складчато-глыбовых гор [18]. Гидрогеологические условия бассейна р. Мармарик неблагоприятны для инфильтрации поверхностных вод, и для него не характерно значительное накопление подземных вод.

В бассейне р. Мармарик гидрологические и метеорологические исследования проводились, начиная с 30-х годов XX века. Их результаты в виде книжек наблюдений и рабочих таблиц хранятся в гидрометеорологическом фонде Армгидромета.

В период 1930—2022 гг. в бассейне р. Мармарик в общей сложности действовало девять гидрометрических наблюдательных постов, из которых только один

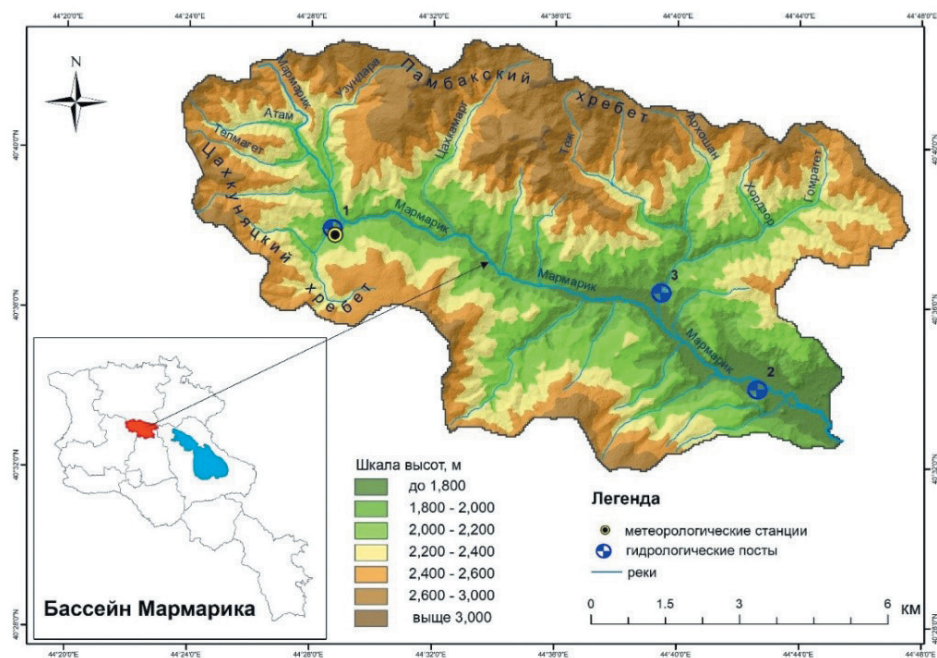


Рис. 1. Сеть метеорологических станций и гидрологических постов в бассейне р. Мармарик.

Гидрологические посты: 1 — р. Мармарик — п. Анкаван; 2 — р. Мармарик — п. Агавнадзор; 3 — р. Гомрагет — п. Меградзор. Метеорологическая станция: 1 — Анкаван [19].

Fig. 1. Network of meteorological stations and hydrological posts in the basin of the river. Marmarik.

Hydrological posts: 1 — r. Marmarik — Hankavan village; 2 — r. Marmarik — v. Aghavnadzor; 3 — r. Gomraget — village of Meghradzor. Meteorological station: 1 — Hankavan [19].

функционировал до 1958 г., а три — с 1958 до 1960 гг. Сравнительно длинный ряд наблюдений имеют четыре гидрометрических наблюдательных поста (р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Улашик — п. Артаваз, р. Гомрагет — п. Меградзор), а с 1 июня 1988 г. не действует также пост Артаваз на р. Улашик. В настоящее время в бассейне действуют только три наблюдательных поста, информация по которым и была использована для достижения цели исследования. Карта бассейна р. Мармарик представлена на рис. 1, основные характеристики подбассейнов показаны в табл. 1.

Результаты исследования

Модель кинематической волны апробировалась на рядах расходов воды весеннего половодья. Период исследования составлял с 1 апреля 2015 г. по 30 июня по 2018 г.

Таблица 1

Основные гидрометрические характеристики водосборов рек
до гидрометрических створов

Main hydrometric characteristics of river catchment areas up to hydrometric sites

Река — пост 1—3 — номера постов на рис. 1	Расстояние, км		Уклон реки, ‰				высота нуля графика, м БС	Основные характеристики водосбора			
	от устья	от истока	средний		средневзвешенный			пло- щадь, км ²	средняя высота, м	сред- ний уклон, ‰	леси- стость, %
			от удален- ной точки	от истока	от удален- ной точки	от истока					
1. Мармарик — Анкаван	30	7,4	86	77	72	70	1949,66	91,3	2430	316	6
2. Мармарик — Агавнадзор	8,0	29	37	27	22	16	1726,00	385	2350	338	13
3. Гомрагет — Меградзор	2,6	12	87	58	78	51	1764,18	101	2430	339	4

Хронологические графики среднесуточных расходов воды верхнего створа р. Мармарик — п. Анкаван, нижнего створа р. Мармарик — п. Агавнадзор и створа на главном притоке р. Гомрагет — п. Меградзор за 2015 год показаны на рис. 2. Видно, что пики на верхнем створе совпадают с пиками изменения расходов воды на нижнем створе, время добегания на рассматриваемом участке меньше суток, соответственно, заблаговременность прогноза тоже должна быть меньше суток.

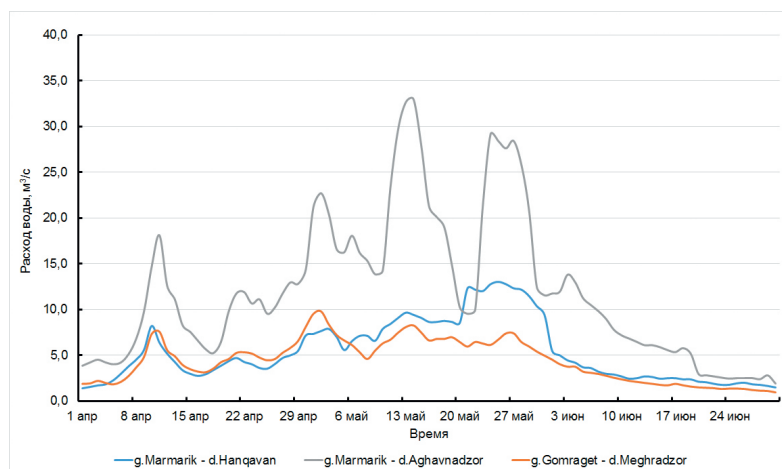


Рис. 2. Хронологические графики среднесуточных расходов воды р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Гомрагет — п. Меградзор.

Fig. 2. Chronological graphs of the average daily water consumption of the river. Marmarik — Hankavan village, r. Marmarik — Aghavnadzor village, r. Gomraget — village of Meghradzor.

ГНКО «Центр гидрометеорологии и мониторинга» Министерства окружающей среды Республики Армения предоставил информацию об измеренных срочных расходах воды. Графики изменения расходов воды, измеренных в 8 часов и в 20 часов, с 1 апреля по 30 июня показаны на рис. 3. Гидрографы имеют более изрезанный вид по сравнению графиком для среднесуточных значений, но появилось время добегания паводочных волн в пределах 12 часов.

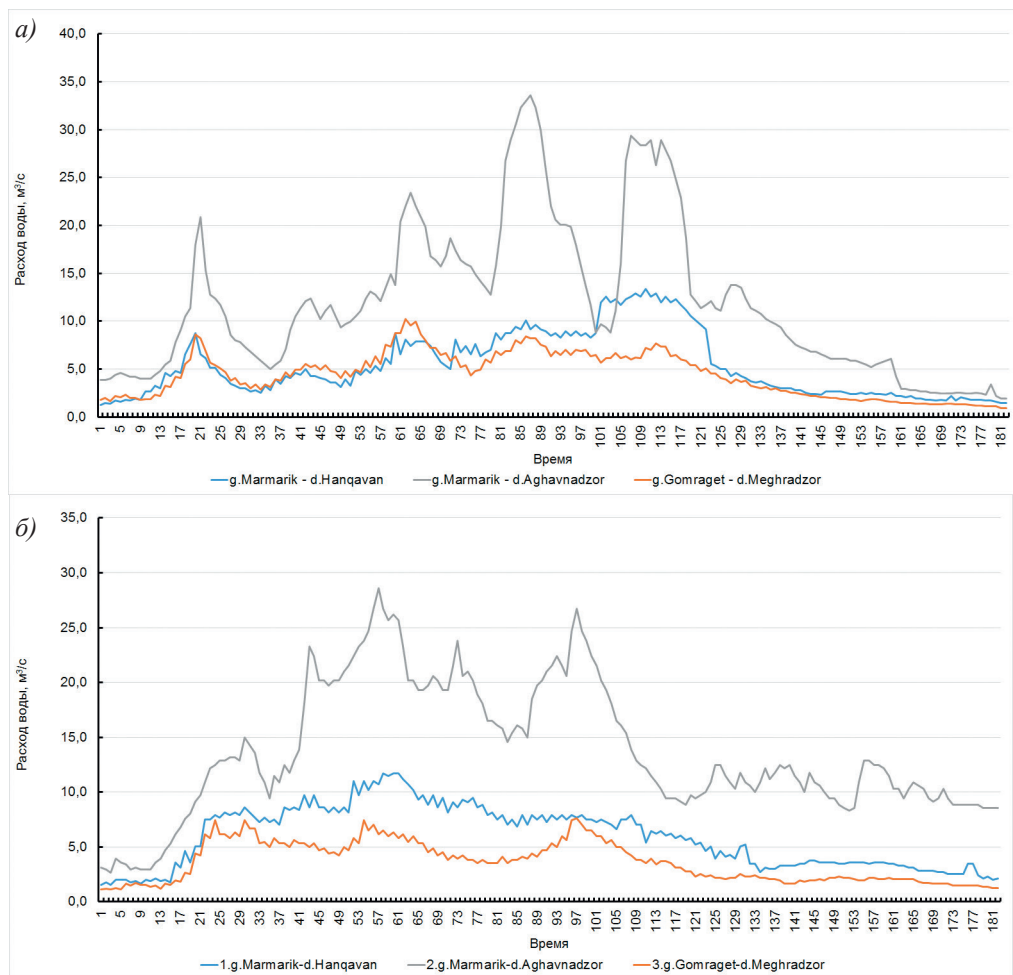


Рис. 3 (начало). Хронологические графики срочных расходов воды р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Гомрагет — п. Меградзор: а) 2015, б) 2016 годы.

Fig. 3. Chronological charts of urgent water flow of the river. Marmarik — Hankavan settlement, r. Marmarik — Aghavnadzor village, r. Gomraget — Meghradzor village: c) 2017, d) 2018.

При использовании модели кинематической волны необходима параметризация величин скорости передвижения паводочной волны и притока в русло на рассматриваемом участке реки. Известны линейные размеры русла и значение главного притока на участке от верхнего до нижнего створа (река Гомрагет), которые

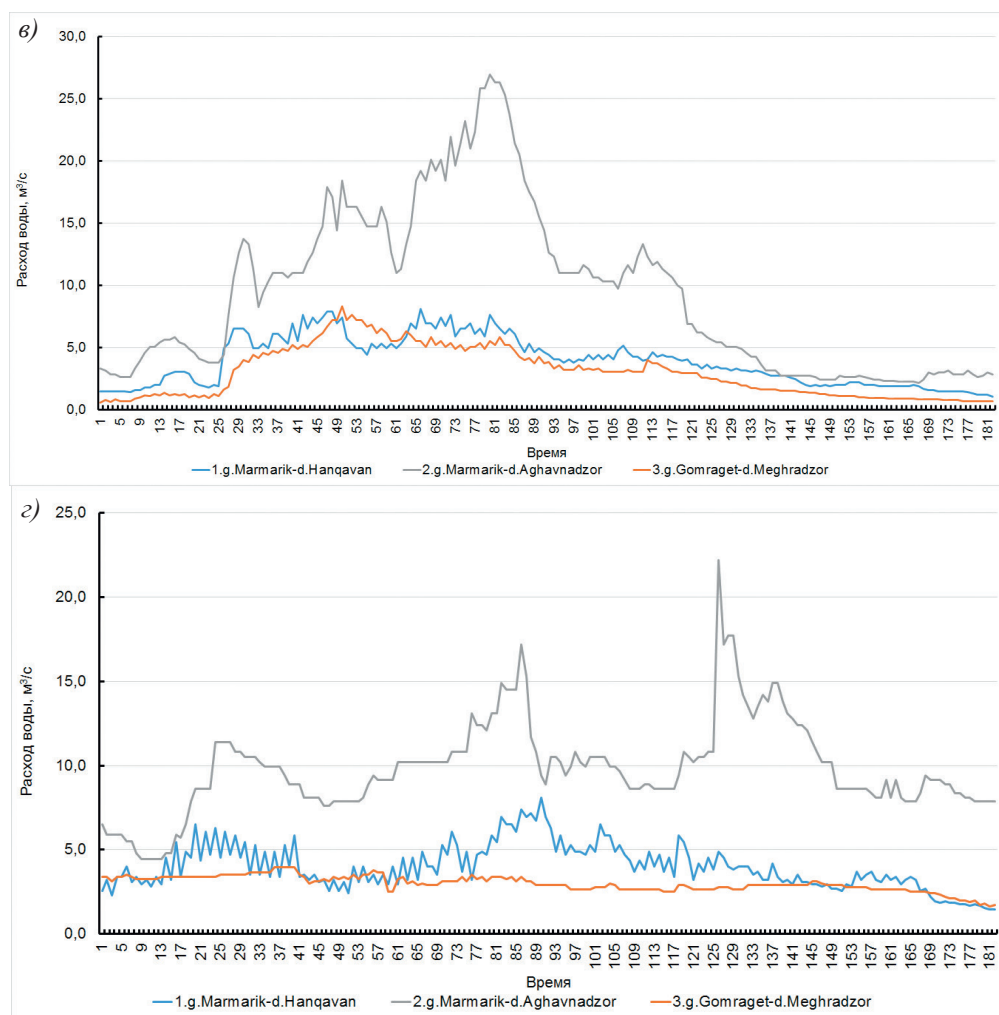


Рис. 3 (окончание). Хронологические графики срочных расходов воды
 р. Мармарик — п. Анкаван, р. Мармарик — п. Агавнадзор, р. Гомрагет — п. Меградзор:
 б) 2017, в) 2018 годы.

Fig. 3. Chronological charts of urgent water flow of the river. Marmarik — Hankavan
 settlement, r. Marmarik — Aghavnadzor village, r. Gomraget — Meghradzor village:
 б) 2017, в) 2018.

являются ориентировочными при параметризации модели для прогноза с заблаговременностью 12 часов.

Модель кинематической волны решалась численным методом, в основе которого конечно-разностная аппроксимация и явная схема с разностью «вперед» [20]. Применялась динамическая параметризация, т.е. параметризация модели производилась по предшествующим дате выпуска прогноза пятнадцати значениям, соответствующим 8-часовым и 20-часовым измерениям за сутки, а период параметризации сдвигался к сроку выпуска прогноза. Поверочные прогнозы оценивались по двум критериям (метод ГМЦ и ГГИ): соотношению среднеквадратической погрешности к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины за период заблаговременности (S/σ_{Δ}) и числу оправдавшихся прогнозов (P , %). За оптимальные значения параметров принимаются те значения, с которыми при поверочном прогнозе получены минимальное соотношение S/σ_{Δ} и максимальная величина P .

Следует отметить, что при прохождении наибольшего объема паводочных вод наблюдается антропогенное влияние, выражающееся в отсутствии соответствия характерных точек гидрографов верхнего и нижнего створов, которое учитывалось в модели еще одним параметром совместно с величиной притока на участке реки q . Значение этого параметра оптимизировалось только на предыдущем шаге от даты выпуска прогноза и предполагалось, что за период заблаговременности это влияние останется неизменным.

На рис. 4 показаны фактические и прогнозные гидрографы в створе п. Агавнадзор (р. Мармарик) за рассматриваемые годы.

Несмотря на относительную схожесть, с небольшими различиями, фактических и прогнозных гидрографов, критерии оценки эффективности прогностических подходов (методы ГМЦ (S/σ_{Δ}) и ГГИ (P)) показывают пограничные значения, но все же относящиеся метод к категории удовлетворительных. Исключение составляют 2018 год и показатели критерия Нэша—Сатклиффа (NSE), которые подтверждают эффективность метода кинематической волны для моделирования стока горной реки Мармарик. Численные значения критериев оценки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения критериев оценки эффективности прогностического подхода
Numerical values of the criteria for evaluating the effectiveness of the prognostic approach

Год	Критерий		
	S/σ_{Δ}	P , %	NSE
2015	0,79	74	0,96
2016	0,84	59	0,95
2017	0,78	70	0,97
2018	0,64	79	0,89

Поверочные прогнозы выполнялись по достаточно длинному ряду расходов воды. При этом происходило накопление погрешности прогнозов при малых

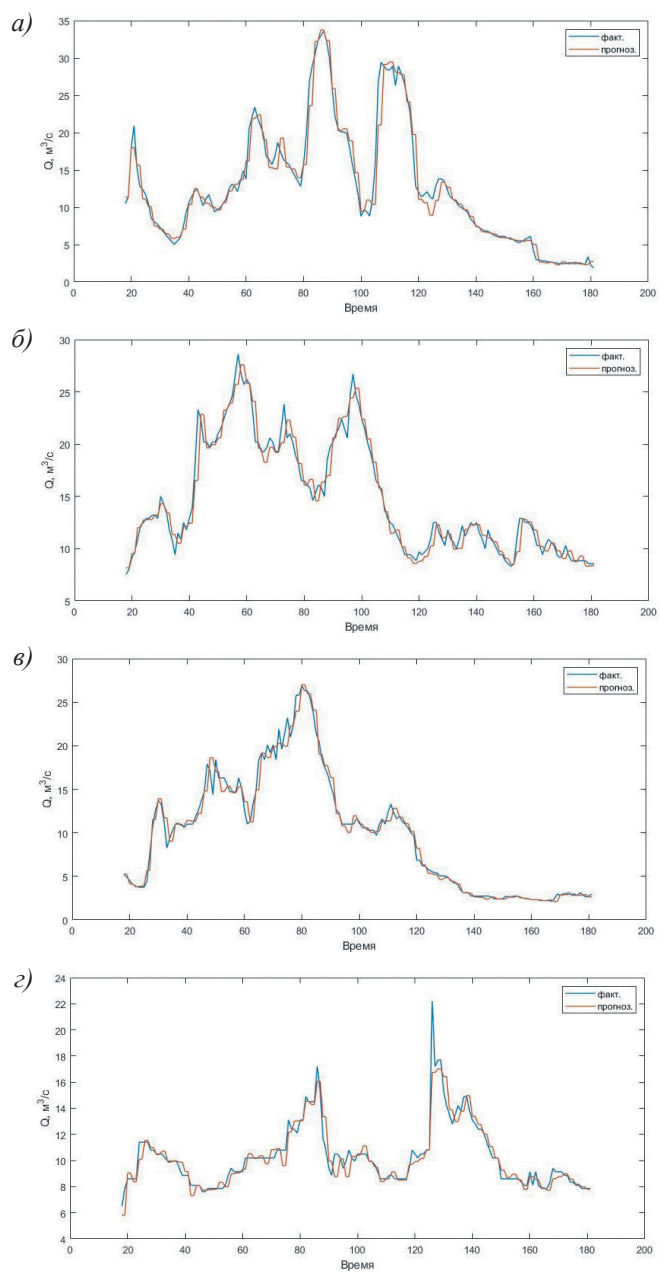


Рис. 4. Фактический и прогнозный гидрограф р. Мармарик — п. Агавнадзор:

а) 2015, б) 2016, в) 2017, г) 2018 годы.

Fig. 4. Actual and forecast hydrograph of the river. Marmarik — Aghavnadzor settlement:

a) 2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

междусрочных изменениях речного стока, что привело к завышенным оценкам критерия ГМЦ. Критерий *NSE* соотносит погрешности прогнозов со среднеквадратическим отклонением от среднего значения фактической величины расхода воды, получаются гораздо большие значения, чем при оценке среднеквадратических отклонений изменений фактической величины за период заблаговременности (σ_{Δ}). В таком случае критерий *NSE* можно отнести к «мягким» методам оценки эффективности прогностических подходов.

Неудовлетворительные результаты получены за 2016 г. Наблюдаются несоответствия максимальных значений по времени, что может быть связано с относительно более быстрой скоростью процесса в указанный год, т.е. время добега было меньше 12 часов. Наилучшие результаты получены за 2018 г., хотя максимальное значение не удалось спрогнозировать методом кинематической волны.

К общим недостаткам рассмотренной модели можно отнести невозможность прогнозировать трансформацию паводочной волны при движении по руслу, поскольку она не заложена в модели. Поскольку для горных рек характерны устойчивые и малоизменяющиеся формы русел в верхнем и нижнем створах, а также относительно быстрые течения из-за уклона и отсутствие развитой поймы, недоучет трансформации паводочной волны не вносит существенной погрешности в прогнозные значения. К недостаткам также можно отнести малую заблаговременность прогноза, но при катастрофических явлениях даже малая заблаговременность при эффективном прогностическом методе позволит избежать больших потерь и жертв в бассейне нижнего течения р. Мармарик, который отличается урбанизированностью территорий.

К положительным сторонам метода относится независимость от прогнозной метеорологической информации, которая может добавлять существенные погрешности в расчетные составляющие, относительная простота метода и малый объем исходной информации.

Выводы

В исследовании выполнена апробация использования модели кинематической волны к стоку горной реки Мармарик. Получены следующие результаты:

— модель кинематической волны является простой, использующей относительно небольшой объем информации, что облегчает возможность внедрения в практику;

— время добега паводочной волны от верхнего створа до нижнего рассматриваемого участка на р. Мармарик составляет 12 часов, соответственно заблаговременность прогноза соответствует этому временному интервалу;

— динамическая параметризация параметров модели кинематической волны дает удовлетворительные результаты;

— антропогенное воздействие (изъятие вод на орошение и водоснабжение промышленных предприятий) должно вводиться дополнительным параметром в модель совместно с величиной притока на рассматриваемом участке реки;

— полученные значения расходов воды при проведении поверочных прогнозов в совокупности характеризуют модель кинематической волны как эффективный подход по критериям оценки качества прогнозных методик ГМЦ и Нэша—Сатклиффа.

Дальнейшие исследования предполагают апробацию модели кинематической волны на армянской р. Дебед, которая отличается наличием многочисленных притоков и существенной водохозяйственной нагрузкой.

Список литературы

1. Мухин В. М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 5—46.
2. Христофоров А. В., Юмина Н. М., Белякова П. А. Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 3. С. 50—57.
3. Борщ С. В., Симонов Ю. А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 63—87.
4. Ниязов Дж. Б., Калашникова О. Ю., Гафуров А. А. Методика прогноза водности высокогорных рек Центральной Азии на основе снимков MODIS // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. 2020. Т. 6. № 2-2. С. 26—37. doi: 10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-2/26-37.rus.
5. Семенчин Е. А., Титов Н. Г., Кузякина М. В., Лебедев К. А. Сравнительный анализ методов математического моделирования уровня воды в реке горного типа (на примере реки Мзымта) // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-5. С. 952—957.
6. Титов Н. Г., Кузякина М. В., Лебедев К. А. Применение равенства Маркова для прогнозирования уровня воды в реке с крутым падением водотока // Научный альманах. 2015. № 9(11). С. 1126—1129. doi: 10.17117/na.2015.09.1126.
7. Карамолдоев Ж. Ж., Калашникова О. Ю. Прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период // Бишкек: Вестник БГУ. 2012. № 3 (23). С. 146—150.
8. Галахов В. П., Ловцкая О. В., Самойлова С. Ю., Мардасова Е. В. Сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней и объема стока периода половодья горной реки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринггеоресурсов. 2022. Т. 333. № 2. С. 193—203. doi: 10.18799/24131830/2022/2/3438.
9. Modernizing Weather, Climate and Hydrological Services: A Road Map for Armenia // Government of Armenia and the World Bank Group, 2018 Режим доступа: https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Hydrometeorological%20Report%20Armenia_September2018_Final.pdf (дата обращения 21.11.2022).
10. Motovilov Y. G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Institute Report Series No: 105 ISBN 82-91885-04-4. Department of Geophysics, University of Oslo, 1999. Режим доступа: <https://studylib.net/doc/> (дата обращения 25.11.2022).
11. Tung-Lin Tsai, Jinn-Chuang Yang. Kinematic wave modeling of overland flow using characteristics method with cubic-spline interpolation // Advances in Water Resources, 28, 2005, 661—670 doi:10.1016/j.advwatres.2005.01.005
12. Крутов А. Н., Школьников С. Я. Уравнения кинематической волны для размываемых русел // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 43—54. doi: 10.52002/0130-2906-2021-6-43-54.
13. Маргарян В. Г., Гайдукова Е. В., Азизян Л. В., Хаустов В. А. О прогнозе максимальных расходов весеннего половодья реки Арпа // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 3. С. 75—87. doi: 10.35567/19994508_2022_3_6.
14. National Adaptation Plan to Advance Medium and Long-Term Adaptation Planning in Armenia Project “Development of Water Sector Adaptation plan in Armenia” // UNDP/GCF, Ministry of the Environment

- of Armenia, 2021. Режим доступа: http://www.nature-ic.am/Content/announcements/12796/WSAP_draft_report_eng.pdf (дата обращения 27.11.2022).
15. Маргарян В. Г. К оценке многолетних колебаний максимального стока реки Мармарик // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 57. С. 22—31. doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-22-31.
 16. Маргарян В. Г. Прогноз максимального стока реки Мармарик и оценка его реакции на глобальное изменение климата (Армения) // Геосферные исследования. 2019. № 4. С. 35—45. doi: 10.17223/25421379/13/4.
 17. Гидрография Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1981. 177 с. (на армянском яз.).
 18. Физическая география Армянской ССР. Ереван: изд-во АН Арм. ССР, 1971. 470 с. (на армянском яз.).
 19. Маргарян В. Г., Гайдукова Е. В., Седракян А. М., Винокуров И. О. Оценка особенности распределения максимального стока весенних половодий в современных условиях изменения климата в бассейне реки Мармарик // Ученые записки ЕГУ. Геология и география. 2022. № 56(2). С. 102—113. <https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2022.56.2.102>.
 20. Гайдукова Е. В., Викторова Н. В. Численные методы в гидрологии. СПб.: изд-во РГГМУ, 2019. 112 с.

References

1. Mukhin V. M. Methodical foundations of physical and statistical types of short-term forecasts of mountain river runoff. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Federatsii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2013; (349): 5—46. (In Russ.).
2. Khristoforov A. V., Yumina N. M., Belyakova P. A. Forecast of the flood runoff of the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus with a lead time of one day. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. = Bulletin of the Moscow University. Series 5: Geography*. 2015; (3): 50—57. (In Russ.).
3. Borshch S. V., Simonov Yu. A. Operational system of short-term hydrological forecasts of water flow on the rivers of the Kuban basin. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Federatsii = Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2013; (349): 63—87. (In Russ.).
4. Niyazov J.B., Kalashnikova O. Yu., Gafurov A. A. Methodology for predicting the water content of high-mountain rivers in Central Asia based on MODIS images. *Tsentral'noaziatskiy zhurnal vodnykh issledovaniy = Central Asian Journal of Water Resources Research*. 2020; 6 (2-2): 26—37. (In Russ.). doi: 10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-2/26-37.rus.
5. Semenchin E. A., Titov N. G., Kuzyakina M. V., Lebedev K. A. Comparative analysis of methods of mathematical modeling of the water level in a mountain-type river (on the example of the Mzymta River). *Fundamental'nyye issledovaniya = Fundamental Research*. 2014; (12—5): 952—957. (In Russ.).
6. Titov N. G., Kuzyakina M. V., and Lebedev K. A. Application of the Markov Equation for Predicting the Water Level in a River with a Steep Dip. *Nauchnyy al'manakh = Nauchny Almanakh*. 2015; 9(11): 1126—1129. (In Russ.). doi: 10.17117/na.2015.09.1126.
7. Karamoldoev Zh. Zh., Kalashnikova O. Yu. Forecast of water inflow into the Toktogul reservoir for the growing season. *Bishkek: Vestnik BGU = Bishkek: Bulletin of BSU*. 2012; 3 (23): 146—150. (In Russ.).
8. Galakhov V. P., Lovtskaya O. V., Samoilova S. Yu., Mardasova E. V. Comparative analysis of methods for predicting the maximum levels and volume of runoff during the high water period of a mountain river. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2022; 333 (2): 193—203. (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2022/2/3438.
9. Modernizing Weather, Climate and Hydrological Services: A Road Map for Armenia // Government of Armenia and the World Bank Group, 2018. Available at: https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Hydrometeorological%20Report%20Armenia_September2018_Final.pdf (accessed on: 21.11.2022).
10. Motovilov Y. G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Institute Report Series No: 105 ISBN 82-91885-04-4.

- Department of Geophysics, University of Oslo, 1999. Available at: <https://studylib.net/doc/> (accessed on: 25.11.2022).
11. Tung-Lin Tsai, Jinn-Chuang Yang. Kinematic wave modeling of overland flow using characteristics method with cubic-spline interpolation. *Advances in Water Resources*. 2005; (28): 661—670. doi:10.1016/j.advwatres.2005.01.005
 12. Krutov A. N., Shkolnikov S. Ya. Equations of a kinematic wave for eroded channels. *Meteorologiya i gidrologiya*. = *Meteorology and Hydrology*. 2021; (6): 43—54. (In Russ.). doi: 10.52002/0130-2906-2021-6-43-54.
 13. Margaryan V. G., Gaidukova E. V., Azizyan L. V., Khaustov V. A. On the forecast of the maximum flow rates of the spring flood of the Arpa River. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*. = *Water industry of Russia: problems, technologies, management*. 2022; (3): 75—87. (In Russ.). doi: 10.35567/19994508_2022_3_6.
 14. National Adaptation Plan to Advance Medium and Long-Term Adaptation Planning in Armenia Project “Development of Water Sector Adaptation plan in Armenia”. UNDP/GCF, Ministry of the Environment of Armenia, 2021. Available at: http://www.nature-ic.am/Content/announcements/12796/WSAP_draft_report_eng.pdf (accessed on: 27.11.2022).
 15. Margaryan V. G. On the assessment of long-term fluctuations in the maximum flow of the Marmarik River. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019; (57): 22—31. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2019-57-22-31.
 16. Margaryan V. G. Forecast of the maximum flow of the Marmarik River and assessment of its response to global climate change (Armenia). *Geosfernyye issledovaniya = Geospheric Research*. 2019; (4): 35—45. (In Russ.). doi: 10.17223/25421379/13/4.
 17. *Gidrografiya Armyanskoy SSR = Hydrography of the Armenian SSR*. Yerevan: Publishing House of the Academy of Sciences of Arm. SSR, 1981: 177 p. (In Armenian).
 18. *Fizicheskaya geografiya Armyanskoy SSR = Physical geography of the Armenian SSR*. Yerevan: Publishing House of the Academy of Sciences of Arm. SSR, 1971: 470 p. (In Armenian).
 19. Margaryan V. G., Gaidukova E. V., Sedrakyan A. M., Vinokurov I. O. Evaluation of the features of the distribution of the maximum runoff of spring floods in the current conditions of climate change in the Marmarik River basin. *Uchenye zapiski YSU. Geologiya i geografiya = Scientific Notes of YSU. Geology and Geography*. 2022; 56(2): 102—113. (In Russ.). <https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2022.56.2.102>
 20. Gaidukova E. V., Victorova N. V. *Chislennyye metody v gidrologii = Numerical methods in hydrology*. St. Petersburg: Russian State Humanitarian University, 2019: 112 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Гайдукова Екатерина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии РГГМУ, oderiut@mail.ru.

Маргарян Вардуи Гургеновна, канд. геогр. наук, доцент, Ереванский государственный университет, географический и геологический факультет, кафедра физической географии и гидрометеорологии, vmargaryan@ysu.am.

Винокуров Игорь Олегович, старший преподаватель кафедры инженерной гидрологии РГГМУ, igor.o.vinokurov@yandex.ru.

Мисакян Амалия Эдвардовна, канд. техн. наук, руководитель отдела гидрологических прогнозов, Служба Гидрологии «Центр гидрометеорологии и мониторинга» ГНО, Министерство окружающей среды Республика Армения, miamalya@yandex.ru.

Кулешова Марта Александровна, студент РГГМУ, martaklshv@gmail.com.

Information about authors

Gaidukova Ekaterina Vladimirovna, Ph.D. tech. Sci., Associate Professor, Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, RSHU.

Margaryan Varduhi Gurgeni, Ph.D geogr. Sci., Associate Professor of the Department of Physical Geography and Hydrometeorology, Yerevan State University, Faculty of Geography and Geology, Department of Physical Geography and Hydrometeorology.

Vinokurov Igor Olegovich, senior lecturer. Department of Engineering Hydrology, RSHU.

Misakyan Amalya Edvardi, Ph.D. tech. Sci., Head of Hydrological Forecasts Division of Hydrology Service, «Hydrometeorology and Monitoring Center» SNCO, Ministry of Environment Republic of Armenia.

Kuleshova Marta Alexandrovna, student of the Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 27.04.2023

Принята в печать 23.05.2023

The article was received on 27.04.2023

The article was accepted 23.05.2023