

Мягков С.В., Гавриленко Н.Н., Мягков С.С.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
г.Ташкент, Узбекистан

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА В ОЦЕНКЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аннотация. Построены полиномиальные тренды по многолетнему гидрографу стока реки Чаткал. На трендах выявлены подъемы и спады, отражающие климатические изменения режима осадков и снеготаяния в связи с региональными изменениями климата. На основе анализа гидрографа стока реки Чаткал рассмотрено соотношение между максимальными расходами воды в период половодья. Выявлено, что соотношение среднемесячных значений стока за май и июнь отражают водность года реки Чаткал. Построены полиномиальные тренды соотношения май/июнь, которые показывают, что происходит снижение значений стока реки за многолетний период в результате изменения климата и сокращения оледенения в верховьях бассейна реки Чаткал. В связи с недостатком наземных измерений гидрометеорологических параметров в бассейне реки Чаткал и сокращении наблюдений за режимом снегонакопления и снеготаяния, данное соотношение может быть использовано при построении прогностических зависимостей.

Ключевые слова: изменение климата, гидрологический режим, гидрологические расчеты, водосбор, бассейн реки, снежный покров, полиномиальный тренд, годовой расход.

Myagkov S.V., Gavrilenko N.N., Myagkov S.S.

Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan

GRAPHOANALYTIC METHOD FOR ANALYSIS OF RUNOFF FORMATION IN THE ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS

Abstract. Polynomial trends were constructed for the long-term hydrograph of the Chatkal river runoff. The trends revealed ups and downs, reflecting climatic changes in precipitation and snow melting due to regional climate changes. Based on the analysis of the Chatkal river runoff hydrograph the relationship between the maximum water discharge during the flood period is considered. It was revealed that the ratio of the monthly mean runoff values for May and June reflects the water content of the year in the Chatkal River. The polynomial trends of the May / June ratio were constructed, which show that there is a decrease in river runoff values over a long-term period as a result of climate change and a decrease in glaciation in the upper reaches of the Chatkal river basin. Due to the lack of ground measurements of hydrometeorological parameters in the Chatkal river basin and the reduction in observations of the regime of snow accumulation and snow melting, this ratio can be used to construct prognostic dependencies.

Key words: climate change, hydrological regime, hydrological calculations, catchment area, river basin, snow cover, polynomial trend, annual discharge.

Введение и постановка проблемы. В настоящее время совершенно недостаточно гидрометеорологических наблюдений за накоплением и таянием снежного покрова в горах Центральной Азии, что значительно затрудняет прогнозирование стока, особенно на трансграничных реках. В данной работе предлагается графоаналитический метод анализа формирования стока рек, который позволит разработать методы долгосрочного прогноза стока на период вегетации при

недостатке наземных измерений гидрометеорологического режима осадков и снеготаяния в бассейне реки.

Изученность проблемы показывает, что изменение климата непосредственно влияет на изменение гидрологических параметров формирующих сток горных рек. Изменение режима осадков приводит к изменению количества накопленного сезонного снега в бассейне реки. Изменение температурного режима воздуха приводит к изменению количества талого ледникового стока. Сток рек Центральной Азии формируется в основном за счет таяния сезонного снега, выпадающего в зимний период и таяния ледников в верховьях рек.

Река Чаткал является трансграничной рекой Киргизии и Узбекистана. Сток формируется на территории Киргизии и далее река впадает в Чарвакское водохранилище в Узбекистане. Максимум стока приходится на период вегетации, меженный период с октября по март [8].

Река Чаткал относится к снегово-ледниковому типу питания, что означает значительный вклад талого снега в общий объем годового и вегетационного стока. По многочисленным исследованиям горной территории водосборного бассейна Аральского моря (бассейны рек Сырдарья и Амударья) отмечается, что за период 1980-2010 годы значительно сократилась площадь оледенения, что в свою очередь может привести к сокращению объема ледникового стока [10,15].

В работе [9] написано, что нынешнее глобальное потепление, воздействия изменения климата и их будущие модели приведут к увеличению уровня эвапотранспирации и, следовательно, к сокращению пополнения запасов подземных вод. В таких обстоятельствах любое простое, но эффективное средство увеличения запасов воды, такое как искусственное пополнение запасов подземных вод, приобретает жизненно важное значение для устойчивости водоснабжения и выживания в пустынных экосистемах. Рост плотности населения и экономической активности, особенно в городских районах, а также изменение моделей водопользования бросают вызов ограниченным водным ресурсам, доступным для людей.

В исследовании [11] приводятся данные о том, что в северном полушарии происходит некоторое увеличение расходов воды в реках, обусловленное таянием ледников и общими процессами дегляциации, связанной с потеплением климата.

Исследования в работе [14] показывают, что процессы деградации ледяного щита в Азии продолжаются, но таяние ледяного щита не увязывается с гидрологическими показателями стока рек, расположенных ниже по течению, и не принимается во внимание величина сезонного снежного покрова в бассейнах рек, который оказывает непосредственное влияние на характеристики и объем речного стока.

В работе [1] указывается, что ритмичность многолетних колебаний стока рек является интегральным показателем изменчивости климата и показано на примере годовых и сезонных колебаний стока рек России.

В научной статье Кривенко В.Г. [3] излагается концепция многовековой и внутривековой циклической изменчивости климата материков Северного полушария, имеющая место в последние 12 тыс. лет и протекающая во временных интервалах 7-11, 32-45 и 70-80 лет. Изменчивость климата расценивается как составная часть единых природных циклов (гидроклиматических, геофизических, биологических). Это положение доказывается на материале по изменению гидрологического изменения озер засушливых территорий.

В работе Кузьменко Я.В., Лисецкого Ф.Н., Пичура В.И. [4] указывается, что малые реки особенно чутко реагируют на антропогенные воздействия и служат интегральным индикатором сложных природно-антропогенных процессов, происходящих на их водосборах. В современных исследованиях бассейновые

территориальные структуры рассматриваются как иерархические общности пространственных отношений, определяемых стоком воды.

Международными научными организациями [11,13] отмечается, что изменение климата проявляется, в частности, в изменении гидрологического режима рек, режима оледенения и других водных объектов. Климат Земли и земной водный цикл имеют очень тесную и сложную взаимосвязь [15]. Таким образом, динамика изменения климата будут влиять на водные ресурсы. Например, дефицит дождевых осадков снизит влажность почвы, речной сток и пополнение подземных вод, но величина этого эффекта перетока будут зависеть от местных условий, таких как свойства почвы, геология, растительность и водопользование.

Из-за различных временных масштабов вовлеченных процессов воздействие на дефицит грунтовых вод (хотя они обычно менее выражены, чем для поверхностных вод, и приходят с задержкой) могут длиться намного дольше, чем исходная метеорологическая засуха, вызвавшая их, таким образом иницируя «эффект памяти»).

С другой стороны, наводнения могут повлиять на доступность воды, санитарную и другие аспекты жизнеобеспечения людей через повреждение ключевой инфраструктуры и услуг.

В то же время гидрологический цикл сам по себе является важным компонентом климатической системы, контролирующим взаимодействие между атмосферой и земной поверхностью и обеспечение механизмов обратной связи в транспортировке, хранении и обмен массами и энергией.

На взаимосвязь между климатом и водными ресурсами влияет множество антропогенных факторов, включая, помимо прочего, землепользование и изменение земного покрова, системы регулирования и водозабора, а также загрязнение воды.

Изменение климата влияет на наземный водный цикл посредством множества различных процессов [15]. Отзывы и взаимодействия между этими процессами, которые не все полностью поняты или измеримы в соответствующих масштабах, очень затрудняют количественную оценку и прогноз последствий. Кроме того, водные ресурсы исторически сложились так, что разработка и управление производились в предположении стационарности.

Хотя гидрологические данные, собранные в прошлом, предоставляют ценную информацию о процессах и событиях, они не обязательно указывают на будущий гидрологический режим. Более того, даже при обнаружении гидрологических изменений объяснение причин, включая изменение климата, часто остается неопределенным [15].

Спекторман Т.Ю. в исследовании [7] утверждает, что оценка воздействия изменения климата на водные ресурсы бассейна позволит учитывать возможные изменения гидрологических характеристик при планировании развития сельскохозяйственного и других секторов экономики, а также для разработки адаптационных мероприятий.

В данной работе рассматривается динамика изменения стока реки Чаткал в формировании которого принимает участие сток талого сезонного снега, сток ледников в летний период, осадки и меженный базис притока грунтовых вод.

Цель и задачи работы. На основе модели формирования стока горной реки найти статистические зависимости для анализа характеристик стока и определить возможные доли различных типов поступлений воды в основной ствол реки. На основе анализа гидрографов стока в замыкающем створе определить основные тренды изменения гидрологических характеристик.

В работе решена задача по установлению зависимости стока реки Чаткал в период вегетации (апрель-сентябрь) в створе Худайдотсай, от отношения многоводных и маловодных лет в бассейне реки.

Построены полиномиальные тренды гидрографов и на их основе получены уравнения для определения статистических характеристик. Выявлены некоторые проблемы при построении прогностических зависимостей для стока реки Чаткал.

Материалы и методы. При выполнении данной работы были использованы опубликованные гидрометеорологические материалы наблюдений на пунктах Центра гидрометеорологической службы при Кабинете Министров Республики Узбекистан (Узгидромета). В основу теоретических методов положены математические модели, опубликованные в научных работах, представленных в списке использованной литературы. Статистическая обработка данных и построение графиков проведены методами общедоступной программы MS EXCEL.

Основная часть. Для анализа выбран водосборный бассейн реки Чаткал с замыкающим створом пост Худайдотсай. Чаткал - горная река в Киргизии и Узбекистане, до строительства Чарвакского водохранилища являлась левой составляющей реки Чирчик (бассейн Сырдарьи).

Длина реки Чаткал 217 км, площадь бассейна 7110 км². Чаткал берёт начало на юго-западных склонах хребта Таласский Алатау. Течет в западном направлении между Сандалашским и Коксуйским хребтами на севере и Чаткальским на юге. В верхнем течении протекает в широкой долине с крутыми склонами, ниже впадения реки Терс — в глубоком ущелье. Гидропост Худайдотсай расположен на абсолютной высоте 940 м на расстоянии около 4 км до впадения в Чарвакское водохранилище [8].

Ранее нами рассматривался гидрологический режим реки во взаимосвязи с грунтовыми водами [12], грунтовые воды в бассейне реки формируют сток во время межени, даже при отрицательных температурах воздуха.

На горных реках даже при значительных отрицательных температурах воздуха отсутствует ледяной покров, что объясняется большими скоростями течения потока, и так же внутренним теплом земли [16].

В качестве модели формирования стока используем модель горной реки, предложенную Денисовым Ю.М. [2].

Водный баланс запасов воды представляется в виде емкостной модели и записывается уравнением водного баланса в упрощенном виде:

$$dW/dt = X \cdot F + Q_{\text{лед}} + P_{\text{гр}} - E - Q_{\text{р}} \quad , \quad (1)$$

где X – слой осадков на территорию бассейна, F - площадь водосборного бассейна, $Q_{\text{лед}}$ – приток воды от таяния ледников, E – суммарное испарение и транспирация, $Q_{\text{р}}$ – сток в замыкающем створе, dW/dt – изменение количества в речном бассейне за время t .

Полагаем, что $Q_{\text{р}}$ – пропорционален объему воды в бассейне реки:

$$Q_{\text{р}} = C \cdot W \text{ или } W = 1/C \cdot Q_{\text{р}} \quad . \quad (2)$$

Используя метод конечных разностей для решения обыкновенного дифференциального уравнения, как указано в [5,6], применив неявную схему и после соответствующих преобразований запишем:

$$Q_{\text{р}}^{t+1} = \varphi Q_{\text{р}}^t + \alpha (X^{t+1} + X^t) + \beta (T^{t+1} + T^t) + \gamma \quad , \quad (3)$$

Таким образом получено некоторое уравнение с коэффициентами - φ , α , β , γ , численные значения которых могут быть получены методом наименьших квадратов, при решении многофакторного уравнения регрессии, t -шаг по времени, для статистических расчетов принимаем $t =$ один месяц.

Нами построен гидрограф среднегодовых значений стока реки Чаткал за период 1933-2014 годы (рис. 1), на котором был построен полиномиальный тренд и получено уравнение:

$$y = 2E-08x^6 - 5E-06x^5 + 0.0007x^4 - 0.0395x^3 + 1.0281x^2 - 10.158x + 126.26 \quad (4)$$

На тренде заметны периоды роста стока (1939-1959, 1983-2007) и периоды спада (1959-1982, 2007-2014). Можно предположить, что формирование стока реки имеет многолетние периоды, связанные с климатическими изменениями.

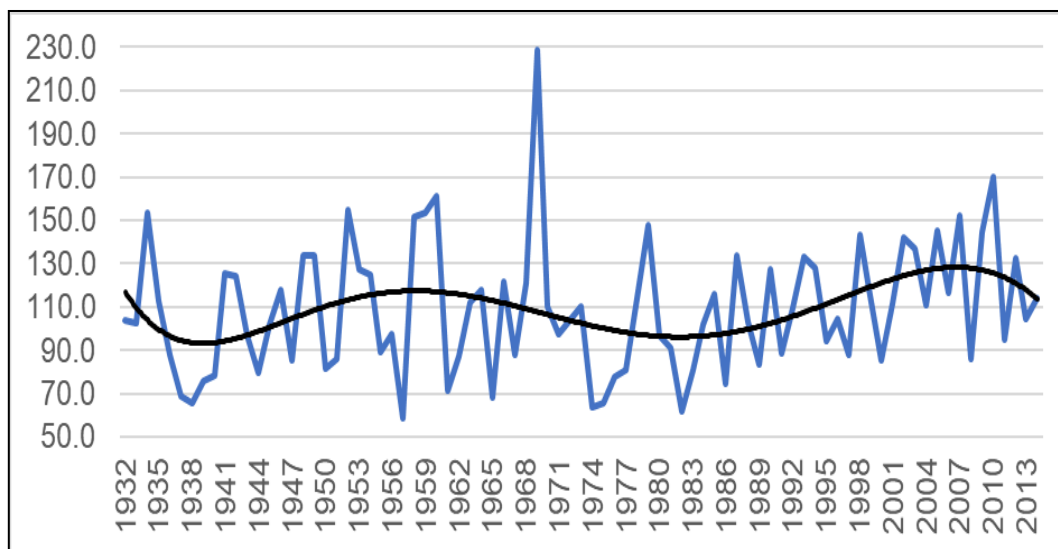


Рис. 1. Гидрограф среднегодового стока реки Чаткал (пост Худайдотсай) и линия полиномиального тренда

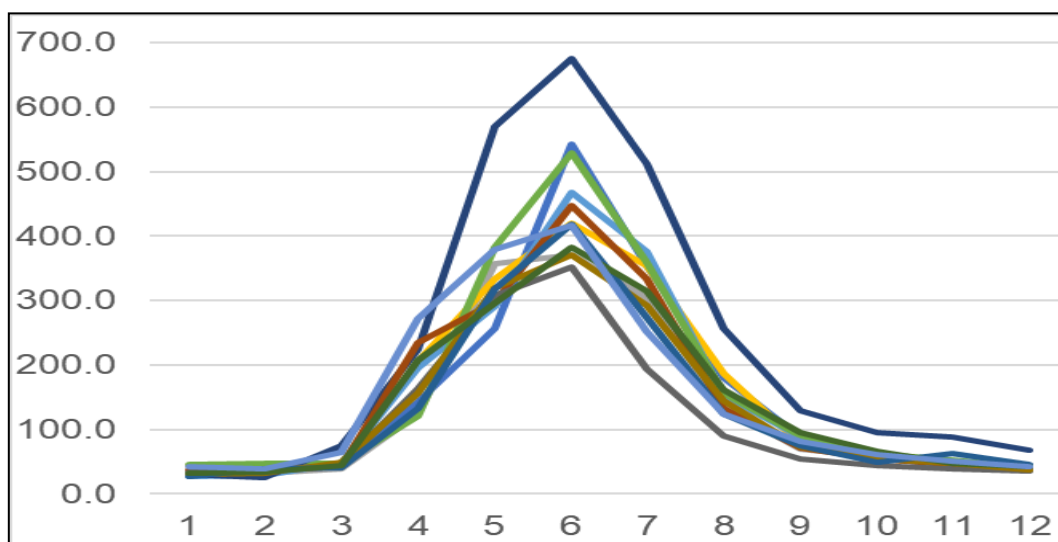


Рис. 2. Гидрографы среднемесячных расходов воды реки Чаткал (пост Худайдотсай) за многоводные годы (максимум в июне)

Для дальнейшего анализа были построены гидрографы внутригодовой изменчивости для маловодных лет (рис. 2) и многоводных лет (рис. 3). Анализ показал, что в маловодные годы пик паводка приходится на июнь, а в маловодные годы на май. Можно предположить, что в маловодные годы зимние снегозапасы незначительны и в

большей мере определяют объемы стока, а в многоводные годы значительная часть стока формируется за счет снега высокогорья и таяния ледников.

Повышение полиномиального тренда вегетационного стока реки Чаткал начиная с 1982 года можно трактовать повышением температуры воздуха в высокогорной зоне и происходящим таянием ледников в летний период. Так же на повышение тренда оказывает влияние изменение режима выпадения осадков, особенно в виде ливневых дождей весенне-летнего периода.

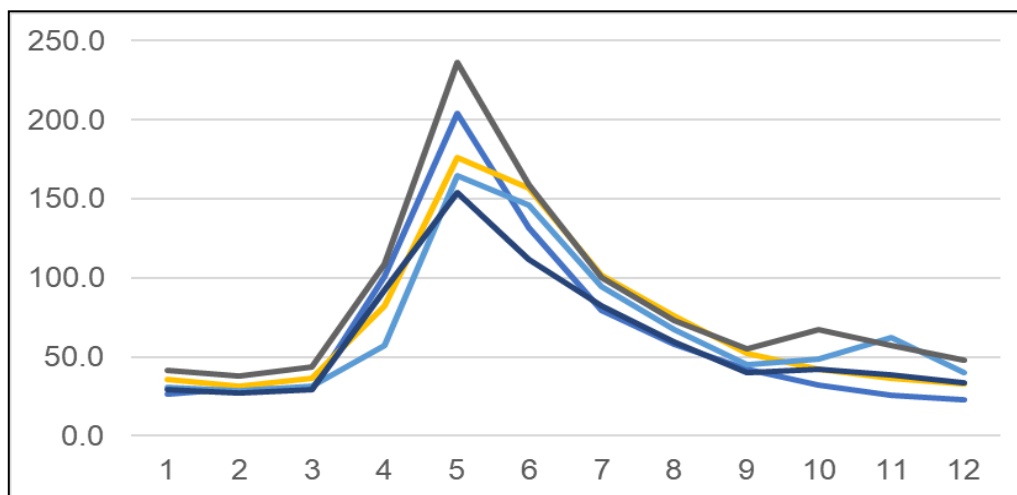


Рис. 3. Гидрографы среднемесячных расходов воды реки Чаткал (пост Худайдотсай) за маловодные годы (максимум в мае)

На рис. 4 заметен рост тренда начиная с 1974 года, что можно трактовать как снижение стока реки и максимум наблюдается в июне, предположительно из-за снижения площади оледенения в верховьях бассейна реки Чаткал.

Получено уравнение полиномиального тренда для линии приведенной на рис. 4.:

$$y = 3E-09x^5 - 8E-07x^4 + 8E-05x^3 - 0.0032x^2 + 0.0518x + 0.6003 \quad (5)$$

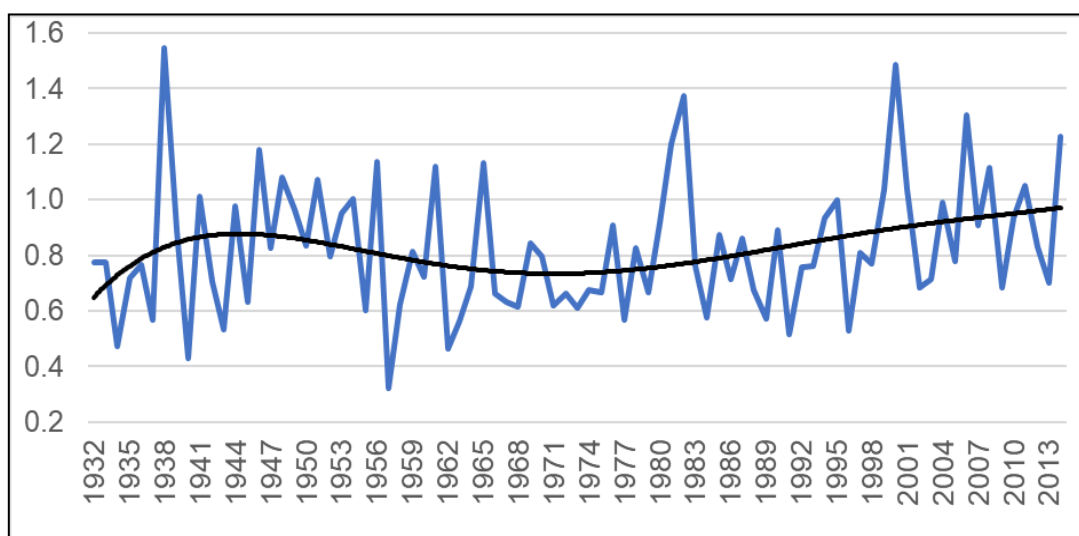


Рис. 4. Гидрограф отношения стока реки Чаткал за май к июню. Приведена линия полиномиального тренда за период 1932-2014 годы.

На рис. 4 заметно, что начиная с 1949 года начинается снижение отношения стока май-июнь до 1974 года, которое можно трактовать как период таяния ледников в бассейне реки Чаткал и увеличение ледниковой составляющей в формировании стока реки Чаткал.

Выводы. Анализ полиномиального тренда гидрографа стока реки Чаткал за многолетний период показывает на влияние климатических изменений на гидрологический режим.

Анализируя тренд отношения расходов за май и июнь, можно говорить о том, что сокращение высокогорного оледенения в верховьях бассейна реки Чаткал привело к превышению среднемесячных расходов за май над июньскими и связано с сокращением самого оледенения.

При разработке методов гидрологических прогнозов для реки Чаткал необходимо учитывать, что максимум половодья приходится на май, и сток реки в большей мере определяется сезонными снегозапасами, чем наличием оледенения.

Для повышения оправдываемости разрабатываемых прогнозов стока реки Чаткал необходимо развитие сети метеорологических наблюдений в высокогорной зоне бассейна реки.

Развитие системы долгосрочного прогнозирования метеорологических характеристик с использованием современных методов численного моделирования позволит повысить оправдываемость гидрологических прогнозов.

Использованная литература:

1. Бубин М.Н. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 279 с.
2. Денисов Ю.М. Математическое моделирование процесса стока горных рек. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1972. 150 с.
3. Кривенко В.Г. Концепция внутривековой и многовековой изменчивости климата как предпосылка прогноза // Климаты прошлого и климатический прогноз. Москва, 1992. С. 39-40.
4. Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Пичура В.И. Оценка и прогнозирование стока малых рек в условиях антропогенных воздействий и изменений климата // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6.
5. Меркулова Н.Н., Михайлов М.Д. Разностные схемы для обыкновенных дифференциальных уравнений. Томск, 2014. 122 с.
6. Мягков С.В., Гавриленко Н.Н., Мягков С.С., Гофуров Т.К. Оценка ледникового стока в бассейне реки Сох графо-статистическим методом // Известия Географического общества Узбекистана. 2020. Том 58. С. 225-231.
7. Спекторман Т.Ю. Сценарии изменения климата для территории Узбекистана и зоны формирования стока рек Сырдарья и Амударья // Изменение климата, причины, последствия и меры реагирования. Бюллетень № 9. Ташкент, 2015. С. 29-39.
8. Чаткал // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. М. : Советская энциклопедия, 1969—1978.
9. Arnell N. (1999), *Climate change and global water resources. Global Environmental Change*. Washington, 1999. pp. 31-49.
10. Fillon R.H., Williams D.F. (1984), Dynamics of meltwater discharge from Northern Hemisphere ice sheets during the last deglaciation, *Nature*, No 310. pp. 674-677.
11. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007.
12. Myagkov S.V. (1995), A model of water and salt exchange between a river and groundwater. IAHS Publ. No. 229, pp. 249-254.
13. Rodriguez-Iturbe, I. and Eagleson P.S. (1987), Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time, *Water Resources Research*, No 23, pp. 181-190.
14. Teller J. (2017), *Volume and Routing of Late-Glacial Runoff from the Southern Laurentide Ice Sheet*. Published online by Cambridge University Press.

15. *Water and Climate Change* (2020), UNESCO, 236 p.
16. Wigley T. (2008), MAGICC/SCENGEN 5.3: Technical Manual, *National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307*. June.

References:

1. Bubin M.N. (2013), *The rhythm of long-term fluctuations in river runoff as an integral indicator of climate variability*, Tomsk 2013, 279 p. (In Russ.).
2. Denisov Yu.M. (1972), *Mathematical modeling of the flow of mountain rivers*, Leningrad, 150 p. (In Russ.).
3. Krivenko V.G. (1992), The concept of intrasecular and centuries-old climate variability as a prerequisite for forecasting, *Climates of the past and climatic forecast*, Moscow, pp. 39-40. (In Russ.).
4. Kuzmenko Ya.V., Lisetskiy F.N., Pichura V.I. (2012), Assessment and forecasting of runoff of small rivers under conditions of anthropogenic impacts and climate change, *Modern problems of science and education*, 2012. No. 6. (In Russ.).
5. Merkulova N.N., Mikhailov M.D. (2014), *Difference schemes for ordinary differential equations*. Tomsk, 122 p. (In Russ.).
6. Myagkov S.V., Gavrilenko N.N., Myagkov S.S., Gofurov T.K. (2020), Estimation of glacial runoff in the Sokh river basin by graph-statistical method, *Annales of the Geographical Society of Uzbekistan*. Volume 58, pp. 225-231.
7. Spektorman T.Yu. (2015), Climate change scenarios for the territory of Uzbekistan and the zone of flow formation of the Syr-Darya and Amu Darya rivers, *Climate change, causes, consequences and response measures*. Bulletin No. 9. Tashkent, pp. 29-39. (In Russ.).
8. Chatkal (1969-1978) // *Great Soviet Encyclopedia*: [in 30 volumes] / Ch. ed. A.M. Prokhorov. – 3rd ed. Moscow. (In Russ.).
9. Arnell N. (1999), *Climate change and global water resources*. *Global Environmental Change*. Washington, 1999. pp. 31-49.
10. Fillon R.H., Williams D.F. (1984), Dynamics of meltwater discharge from Northern Hemisphere ice sheets during the last deglaciation, *Nature*, No 310. pp. 674–677.
11. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007.
12. Myagkov S.V. (1995), A model of water and salt exchange between a river and groundwater. IAHS Publ. No. 229, pp. 249-254.
13. Rodriguez-Iturbe, I. and Eagleson P.S. (1987), Mathematical Models of Rainstorm Events in Space and Time, *Water Resources Research*, No 23, pp. 181–190.
14. Teller J. (2017), *Volume and Routing of Late-Glacial Runoff from the Southern Laurentide Ice Sheet*. Published online by Cambridge University Press.
15. *Water and Climate Change* (2020), UNESCO, 236 p.
16. Wigley T. (2008), MAGICC/SCENGEN 5.3: Technical Manual, *National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307*. June.

Сведения об авторах:

Мягков Сергей Владимирович – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, зав. отделом гидрологии, доктор технических наук. E-mail: sergik1961@yahoo.com;

Гавриленко Надежда Николаевна – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, младший научный сотрудник;

Мягков Сергей Сергеевич – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, младший научный сотрудник.

Information about authors:

Myagkov Sergey V. - Hydrometeorological Research Institute, Head of the Department of Hydrology, Doctor of Technical Sciences. E-mail: sergik1961@yahoo.com;

Gavrilenko Nadezhda – Hydrometeorological Research Institute, Junior Researcher;

Myagkov Sergey S. – Hydrometeorological Research Institute, Junior Researcher.

Для цитирования:

Мягков С.В., Гавриленко Н.Н., Мягков С.С. Графоаналитический метод анализа формирования стока в оценке гидрологических характеристик // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2021. № 1-2. С. 61-68.

For citation:

Myagkov S.V., Gavrilenko N.N., Myagkov S.S. (2021), Graphoanalytic method for analysis of runoff formation in the assessment of hydrological characteristics, *Central Asian journal of the geographical researches*, No 1-2, pp. 61-68. (In Russ.).