

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФА СТОКА РЕК (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ МЁША ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)**

Горбунова В.П., студент gvp7962@gmail.com

Институт экологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Горшкова А.Т., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрологии, agorshkova@gmail.com

Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан г. Казань, ул. Даурская, д.28

*Аннотация.* Методы математического моделирования применяются в гидрологии достаточно давно, но возможность создания комплексных моделей, которые могут быть реализованы в программном комплексе "Гидрограф" появилась достаточно недавно. Этот инструмент активно используется в научных исследованиях. Для подготовки входных данных используется стандартная метеорологическая информация, что упрощает процесс. Комплекс описывает все процессы формирования стока, включая все составляющие наземного гидрологического цикла.

*Ключевые слова:* моделирование, сток, гидрограф

## **MATHEMATICAL MODELING OF A HYDROGRAPH OF RIVER FLOW (BY THE EXAMPLE OF THE RIVER MOSHA IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN)**

Gorbunova V.P., gvp7962@gmail.com

Institute of Ecology and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Kremlevseaya str., 18

Gorshkova A.T., PhD in Geography, leading researcher, agorshkova@gmail.com

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences

Kazan, Daur'skaya st., 28

*Abstract.* Mathematical modeling methods have been applied in hydrology for quite some time, but the possibility of creating complex models that can be implemented in the "Hydrograph" software package has emerged relatively recently. This tool is actively used in scientific research. Standard meteorological information is used to prepare input data, which simplifies the process. The complex describes all the processes of runoff formation, including all components of the surface hydrological cycle.

*Keywords:* modeling, runoff, hydrograph

**Введение.** Работа посвящена моделированию формирования речного стока в бассейне реки Меша с помощью программного комплекса «Гидрограф». Рассматривается водосбор бассейна реки Меша до гидропоста с. Пестрецы (77197). Река Меша впадает в Камский залив Куйбышевского водохранилища. На территории моделируемого водосбора расположено около 150 населенных пунктов, в том числе 14 крупных (с. Пестрецы, пгт. Богатые Сабы и т.д.). Река активно используется в сельском хозяйстве.

Математическая система «Гидрограф» является детерминированной гидрологической моделью с распределенными параметрами, которая описывает процессы формирования стока в бассейнах с различными физико-географическими характеристиками [1]. Результатом

работы модели являются непрерывные гидрографы стока в замыкающем створе. Модель была разработана в Государственном гидрологическом институте (г. Санкт-Петербург) под руководством профессора Ю.Б. Виноградова в 70-х гг. прошлого века [1]. В данной работе был выбран бассейн реки Меша (правый приток Камы) в восточной части Европейской России с площадью водосбора 4180 км<sup>2</sup> [2].

**Материалы и методы.** Модель «Гидрограф» использует стандартную метеорологическую информацию, такую как суточные (часовые) значения температуры воздуха, дефицита влажности воздуха, слоя осадков, что позволяет использовать ее практически повсеместно [3]. В общем виде блок-схема детерминированной модели «Гидрограф» выглядит следующим образом (рис. 2).

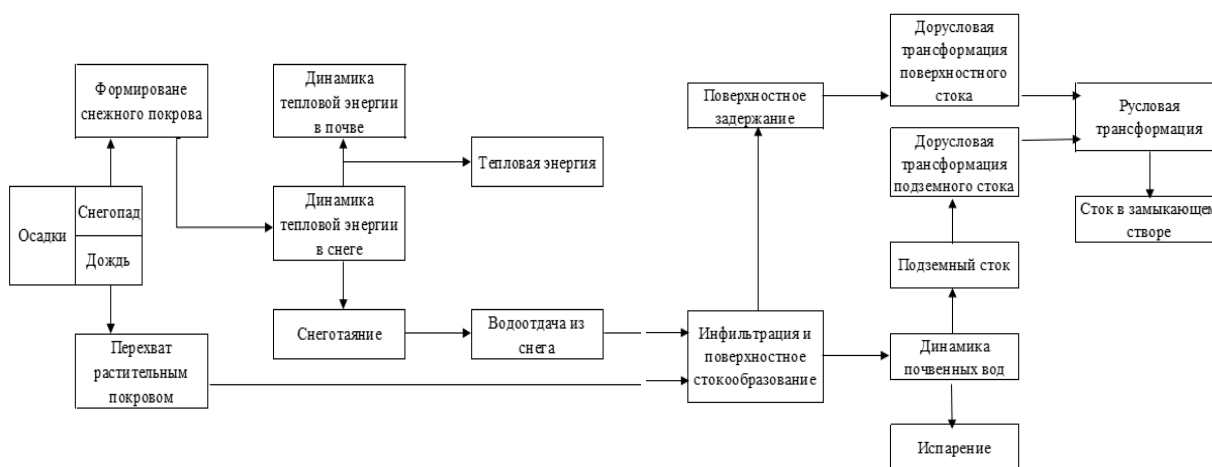


Рис. 1. Блок-схема детерминированной модели «Гидрограф».

Для представления речного бассейна в модели «Гидрограф» используется набор регулярных репрезентативных точек (РТ), расположенных в пределах водораздела реки и упорядоченных в виде гексагональной сети.

Следующим этапом подготовки к моделированию является сбор данных для репрезентативных точек. Для каждой репрезентативной точки описывается прилегающей к ней площадью гексагона, в пределах которой характеристики, отражающие свойства рельефа, принимаются как неизменные.

До начала моделирования процессов формирования стока необходимо также выделить на территории водосбора однородные по типу формирования стока области – стокоформирующие комплексы (СФК).

Разнообразие почвенно-растительного покрова в сочетании с рельефом создают условия формирования стока воды. Для выделения СФК производится анализ сочетаний различных типов почвы, растительности и топографических условий. В процессе были

использованы топографические карты, карты почвенно-растительного покрова, ландшафтные карты.

В качестве входной информации для модели были использованы суточные значения температуры воздуха, относительной влажности воздуха, количество осадков и продолжительность выпадения осадков (при наличии) для каждой метеорологической станции в пределах или вблизи речного бассейна [3]. Для моделирования стока в бассейне реки Меша были выбраны четыре метеостанции: Арск 27593, Казань 27595, Вятские Поляны 28502, Чистополь 28602. В качестве проверочных данных использовались данные о ежесуточных расходах на посту Пестрицы за период с 2001 по 2018 гг., полученные из автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [4].

**Результаты исследования.** Моделирование стока в бассейне реки Меша было произведено за период с 2011 по 2018 гг. с помощью модели «Гидрограф». Посредством калибровки коэффициентов модели были рассчитаны два варианта суточных гидрографов стока (рис. 1, 2).

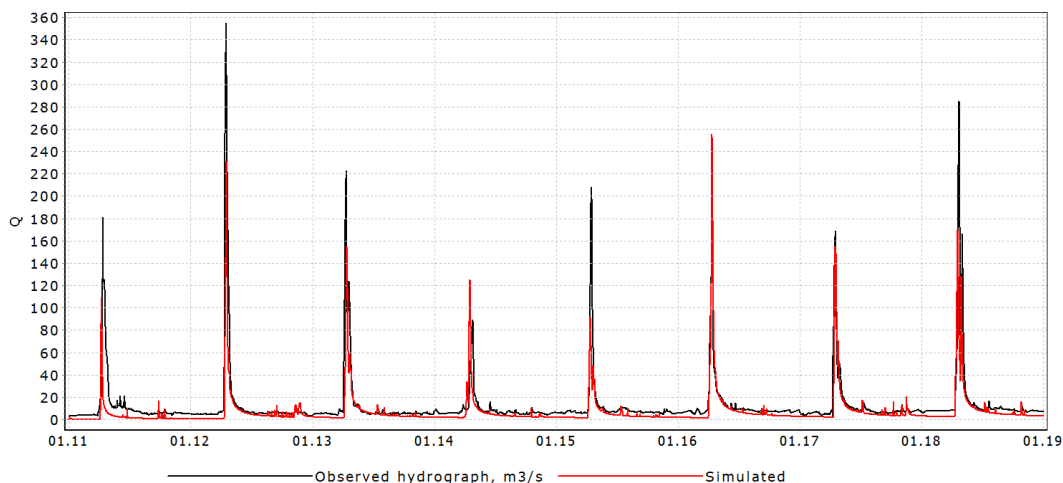


Рис. 2. Первый вариант рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока.

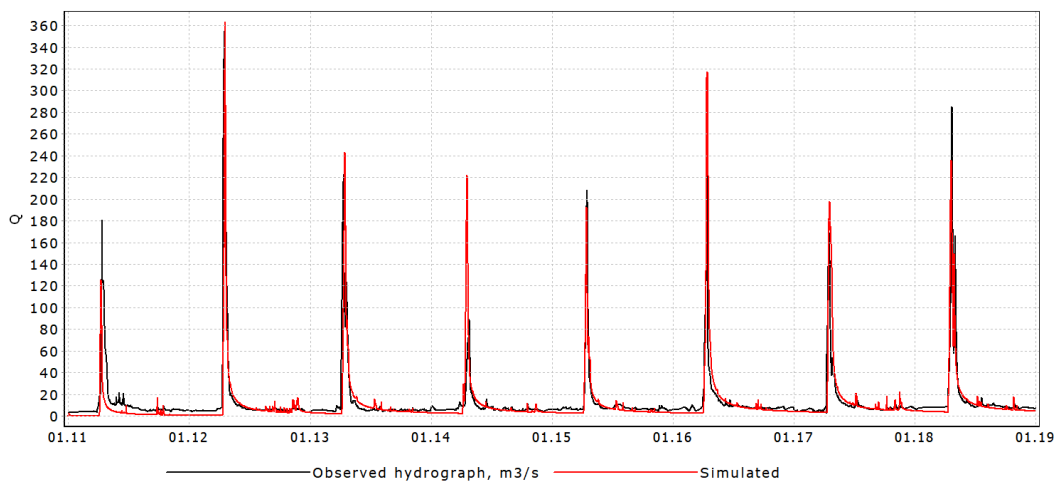


Рис. 3. Второй вариант рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока.

Для оценки качества расчетов использовался критерий Нэша-Сатклиффа, который позволяет оценить сходимость рассчитанных и наблюдаемых рядов стока [5].

Диапазон значений критерия в общем случае находится в пределах от  $-\infty$  до 1. Значения менее нуля показывают, что среднее арифметическое из выборки наблюдаемых величин стока обладает лучшей сходимостью (выступает как лучший предиктор), чем модель. В общем случае моделирование признается удовлетворительным при  $NS > 0.5$ .

Анализируя посуточные данные за весь период моделирования для двух вариантов модели, были получены критерии качества. Для первого варианта – 0,61, для второго – 0,59. В целом можно сказать, что различия моделей по критерию качества Нэша-Сатклиффа являются незначительными.

Для дополнительной оценки качества моделей были построены кривые обеспеченности максимальных расходов воды (рис. 3)

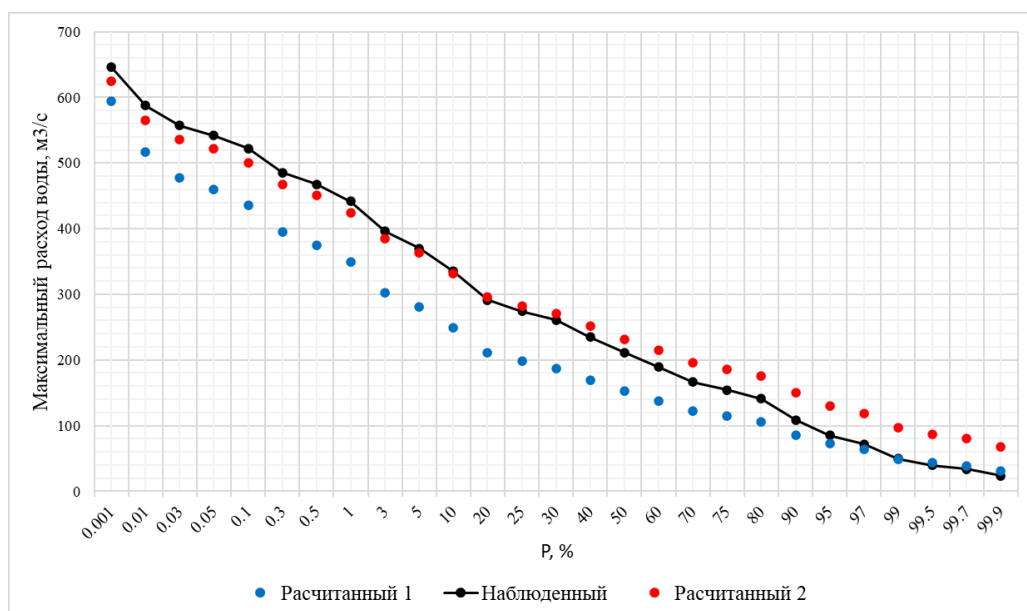


Рис. 4. Кривые обеспеченности.

Кривая обеспеченности отражает вероятность достижения или превышения гидрологической величины. В процессе исследования были построены кривые обеспеченности максимальных расходов на основе наблюдаемых данных и данных, рассчитанных с использованием двух вариантов калибровки корректирующих коэффициентов. Первый вариант моделирования показал значительные расхождения с наблюдаемой кривой обеспеченности, особенно на пиках.

Легко видеть, что кривая, рассчитанная на основе данных моделирования первого варианта корректировки коэффициентов (голубая), практически на всем графике не совпадает с наблюдаемой кривой обеспеченности. В некоторых случаях расхождения составляют более 100 м³/с. В свою очередь, вторая кривая обеспеченности отличается от наблюдаемой исключительно на «хвостах» графика.

Учитывая все выполненные анализы качества моделей, наиболее разумным решением будет отдать предпочтение гидрографу стока, построенному при втором варианте корректирующих коэффициентов.

Анализируя выбранный вариант модели, можно заметить некоторые несовпадения в пиках. В 2011 году наблюдается превышение наблюдаемого стока над рассчитанным на 36 м<sup>3</sup>/с, в свою очередь в 2014 году обратная картина.

В эти же годы наблюдается самый низкий показатель качества Нэша-Сатклиффа. Для 2011 года показатель равен 0,4. Это можно объяснить тем, что это первый год модельного периода с 2011 по 2018 год. Не учитываются данные, предшествующие 2011 году, однако их учет при калибровке модели (то есть расширение периода моделирования) улучшило бы результаты моделирования за 2011 год. В 2014 году показатель качества равен -0,3. В этот период наблюдалась достаточно теплая и малоснежная зима, что снизило и сгладило наблюдаемый сток, что не нашло должного отражения в результатах моделирования за этот год, поскольку числовые параметры модели (кроме температуры воздуха, слоя атмосферных осадков, относительной влажности воздуха) одинаковы для всех лет моделирования, носят усредненный характер.

Анализ качества моделей показал, что наиболее разумным выбором будет гидрограф стока, построенный при втором варианте корректировки коэффициентов.

Практически каждая река в Татарстане обладает зарегулированным стоком. Этот процесс обусловлен созданием плотин и водохранилищ, что влечет за собой сезонное, суточное или многолетнее перераспределение стока. Модель «Гидрограф» изначально рассчитана на моделирование природных процессов, когда человек не влияет на объемы стока. Если сток зарегулирован, необходимо экспертно подкорректировать параметры модели с учетом стратегии регулирования. В целом критерий Нэша-Сатклиффа и сходимость кривых обеспеченности указывают на высокое качество построенной модели.

### **Библиографический список**

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: Академия, 2010. – С. 255-287.

2. Горшкова А.Т., Урбанова О.Н., Валетдинов А.Р., Минуллина А.А., Ионова Ю.С. Выявление тренда изменения количественных показателей водных ресурсов малых рек (на примере бассейна реки Меша) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. III. Управление водными ресурсами речных водосборов: труды Междунар. Научн.-практ. Конф. 17-20 мая 2011, - Перм. гос. ун-т. - Пермь, 2011. - С.55-60.

3. Горбунова Ю.В., Урбанова О.Н., Горшкова А.Т. Зависимость стока реки Актай от изменения температуры воздуха // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 7-2. – С. 18-22.

4. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru/>, свободный. – Дата обращения: 06.08.2022.

5. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – V. 10. – Pp. 282-290.