

УДК 556.06

АНАЛИЗ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА
МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ГОРНЫХ РЕК

А. А. БАТМАЗОВА *, В. А. ХАУСТОВ **

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрены различные методы прогноза максимального стока горных рек. Выполнен анализ и апробация методик, основанных на многомерном регрессионном анализе и математическом моделировании, также применялся графоаналитический подход. Для многомерного регрессионного анализа рассмотрены различные предикторы, взятые за период весеннего половодья и предшествующий зимний период. Некоторые из рассмотренных предикторов в дальнейшем были отобраны как потенциальные. Метод математического моделирования основан на моделировании процессов формирования снегозапасов и водоотдачи, а также формирования максимального стока. Графоаналитический подход включает в себя построение комплексных графиков, позволяющих наглядно представить закономерности и тенденции исследуемых характеристик. В качестве объектов для апробации исследуемых подходов выбраны бассейны следующих рек Самур и Андийское Койсу. На водосборах перечисленных рек были отобраны метеостанции с репрезентативным рядом наблюдений за метеорологическими характеристиками. Результаты исследования получились неоднозначные: метод многомерного регрессионного анализа позволил подобрать предикторы, дающие удовлетворительный прогноз только на зависимом материале; в результате применения динамической модели формирования стока были получены и оптимизированы параметры модели для месяцев половодья – проверка на оправдываемость отдельного прогноза и на обеспеченность методики показали, что обе методики эффективны более чем на 60%.

<https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2023.57.3.196>

Keywords: mountain rivers, prediction, maximum flow, mathematical modeling, regression analysis.

Введение. Потребность в прогнозе максимального стока горных рек возникает повсеместно, в связи с набирающими силу высокими паводками и селевыми потоками. Предсказать эти катастрофические явления сложно из-за трудности разработки методик прогноза, что объясняется ограниченностью или даже отсутствием необходимых данных наблюдений в высокогорных

* E-mail: batmazovaa@mail.ru

** E-mail: vitaly.khaustov3@mail.ru

частях бассейнов рек. Также немаловажную роль играет и сложность рельефа местности.

Актуальность работы связана с повышенной востребованностью расчета максимального стока с точки зрения безопасности, прогнозирования катастрофических паводков и наводнений на территории Северо-Кавказского федерального округа (СКФО). Объектом исследований в настоящей работе являются реки СКФО, а также такие метеопараметры, как характеристики снежного покрова, приземная температура воздуха и осадки. Для анализа использовались 10 метеостанций и гидрологических постов Северного Кавказа. Предметом исследований в данной работе выступает максимальный сток и факторы его формирования за счет водоотдачи.

Задачей работы была разработка прогностических уравнений путем подбора предикторов с помощью многомерного регрессионного анализа и верификация этих уравнений на независимом материале, а также разработка математической модели формирования максимального стока на основе дифференциальных уравнений 1-го и 2-го порядка [1].

Материалы и методы исследований. В работе проводился анализ и апробация следующих методов:

1. математическое моделирование процессов формирования снегозапасов и водоотдачи, а также максимального стока;
2. графоаналитический метод, позволяющий наглядно представить в виде графических изображений закономерности и тенденции исследуемых характеристик;
3. многомерный регрессионный анализ, используемый для определения значимости зависимых переменных на полученную функцию отклика.

На рис. 1 представлена схема гидрометеорологических станций и постов, данные которых использовались для апробации прогностических методов.

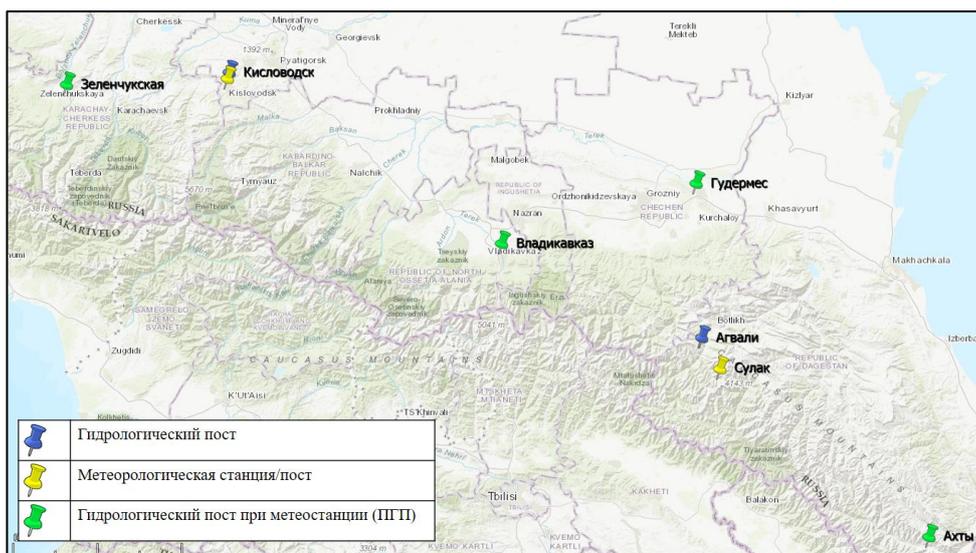


Рис. 1. Схема расположения гидрометеорологических станций и постов.

Для реализации вышеперечисленных методов потребовались характеристики как фактические, непосредственно с гидрометеорологических станций, так и преобразованные.

Например, для разработки прогностических уравнений методом многомерного регрессионного анализа были выведены следующие характеристики: осадки зимнего периода [2], модульный коэффициент осадков за прогнозируемый месяц, водность предшествующего периода, температура воздуха или ее отклонение от средних многолетних величин, модульный коэффициент максимального стока по вышележащему посту, сумма высоты снежного покрова, а также характеристика оставшихся снегозапасов (\bar{Q}/t) [3]. Для реализации прогноза по динамическим моделям формирования стока 1-го и 2-го порядка понадобились данные о температуре воздуха, количестве осадков, характеристиках снежного покрова и максимальных расходах воды за период 2008–2018 гг. В работе представлены результаты по метеостанции (МС) “Сулак высокогорная” и гидрологическим постам р. Андийское Койсу – с. Агвали и р. Самур – с. Ахты. Взяты именно эти объекты, как наиболее показательные ввиду своей труднодоступности и высокого расположения относительно уровня моря.

Результаты исследований. Многомерный регрессионный анализ проводился по данным р. Самур в створе с. Ахты. В результате корреляционного анализа последовательно осуществлялся отбор переменных. Регрессионный анализ проводился с поэтапным исключением предикторов, имеющих небольшую степень влияния на анализируемый параметр, т. е. на максимальный расход воды [4].

Опираясь на фактор, определяющий величину стока, осуществлялся подбор и анализ предикторов за месяцы половодья – с марта по август. В качестве показательного месяца был выбран апрель, так как прогноз по регрессионным уравнениям на независимом материале именно за этот период дал наименьшую погрешность.

При составлении регрессионного уравнения для прогноза максимального стока за апрель месяц использовались такие предикторы, как: максимальный сток за предшествующий месяц половодья; модульный коэффициент осадков за апрель по МС “Ахты”; сумма осадков за период с декабря по март; отклонение от нормы температуры воздуха в апреле по МС “Ахты”; сумма высоты снежного покрова за период с октября по апрель по МС “Ахты”.

Получено следующее уравнение регрессии:

$$Q_{\max 04} = 0,02Q_{\max 03} + 66,5K_{x04} - 0,61\Delta t_{04} - 0,2\sum x_{12-03} + 0,2\sum h_{10-04} + 7,21 \quad (1)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0,83$ и $S/\sigma = 0,59$, где $Q_{\max 04}$ – максимальный расход воды (m^3/c) р. Самур – с. Ахты за апрель; $Q_{\max 03}$ – максимальный расход воды за предшествующий месяц половодья – март; K_{x04} – модульный коэффициент осадков за апрель по метеостанции “Ахты”; Δt_{04} – отклонение от нормы температуры воздуха в апреле по метеостанции “Ахты”; $\sum x_{12-03}$ – сумма осадков за период с декабря по март; $\sum h_{10-04}$ – сумма высоты снежного покрова за период с октября по апрель по метеостанции “Ахты”.

Точность регрессионного уравнения увеличивается, если в качестве предиктора использовать модульный коэффициент максимального стока за апрель по гидрологическому посту “Лучек”, но тогда необходима прогнозная информация по метеорологическому предиктору.

Регрессионное уравнение будет иметь вид:

$$Q_{\max04} = 31,5K_{x04} + 1,3\Delta t_{04} + 104,9K_{04} - 42,44 \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0,84$ и $S/\sigma = 0,58$, где $Q_{\max04}$ – максимальный расход воды (m^3/c) р. Самур – с. Ахты за апрель; K_{x04} – модульный коэффициент осадков за апрель по метеостанции “Ахты”; Δt_{04} – отклонение от нормы температуры воздуха в апреле по метеостанции “Ахты”; K_{04} – модульный коэффициент максимального стока за апрель по гидрологическому посту “Лучек”.

График связи прогнозных и фактических значений, полученных по регрессионному уравнению (2), представлен на рис. 2.

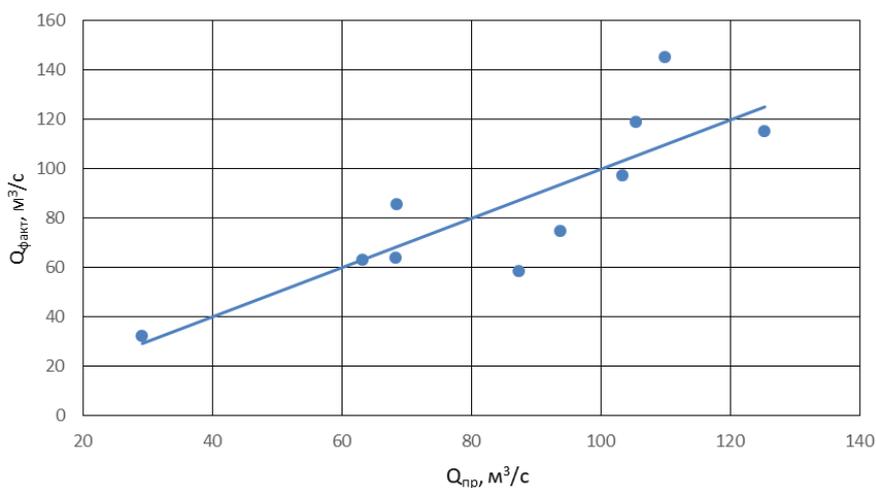


Рис. 2. График функции $Q_{пр} = f(Q_{факт})$ по уравнению (2).

Таблица 1

Прогнозные значения максимальных расходов воды за месяцы половодья за 2019–2020 гг.

Год	Месяц	$Q_{факт}, m^3/c$	$Q_{пр}, m^3/c$	Δ
2019	III	37,5	49,0	-11,5
	IV	93,4	88,3	5,1
	V	143,0	127,0	16,0
	VI	189,0	211,0	-22,0
	VII	180,0	169,0	11,0
	VIII	95,4	87,4	8,0
2020	III	44,8	73,4	-28,6
	IV	90,8	90,5	0,3
	V	124,0	140,0	-16,0
	VI	229,0	240,0	-11,0
	VII	144,0	158,0	-14,0
	VIII	86,3	79,3	7,0

Для каждого месяца половодья за период 2008–2018 гг. составлены уравнения регрессии, проверка которых осуществлялась на независимом материале 2019–2020 гг. Результаты приведены в табл. 1.

Эффективность методики оценивалась по критерию S/σ , который составил 0,65 на зависимом и 0,71 на независимом материале, что в целом говорит об эффективности методики.

Для вывода прогностического уравнения с помощью динамической модели формирования стока использовались данные высокогорной МС “Сулак” и данные р. Андийское Койсу в створе с. Агвали [1]. В качестве визуализации хода всех гидрометеорологических элементов применялся графоаналитический подход (рис. 3).

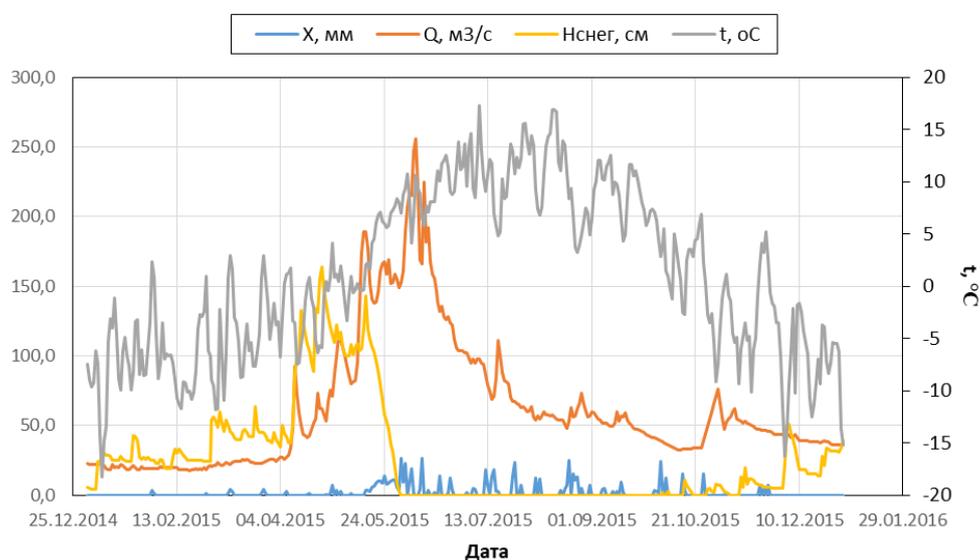


Рис. 3. Хронологический график гидрометеорологических параметров за 2014 г.

Методика расчета включает в себя 4 этапа:

1) определение даты начала снегонакопления на водосборе путем нахождения даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C к отрицательным температурам [5].

2) Расчет ежедневных запасов воды в снеге (S) как суммы выпавших твердых осадков (X , снега) с учетом водоотдачи в период оттепелей по формуле (3):

$$S_i = \sum_{i=1}^m kf \cdot X_i - kt \cdot t_i^+ \quad (3)$$

где kf – коэффициент соотношения запасов воды в снеге по данным маршрутных снегосъемок к сумме твердых осадков на метеостанции; kt – температурный коэффициент, соответствующий слою водоотдачи (мм) на 1°C положительной температуры воздуха; t^+ – положительная температура воздуха.

3) Расчет водоотдачи из снежного покрова как разницы между предыдущим и последующим значением запасов воды в снеге при условии, что последующее значение меньше предыдущего и оптимизация параметров модели kf и kt .

4) Расчет максимальных расходов воды по динамическим моделям 1-го и 2-го порядка, оптимизация параметров и оценка эффективности методики.

Для наглядности полученных результатов ниже представлен график хода фактических и прогнозных максимальных расходов воды за все месяцы половодья, полученных на независимом материале (рис. 4).

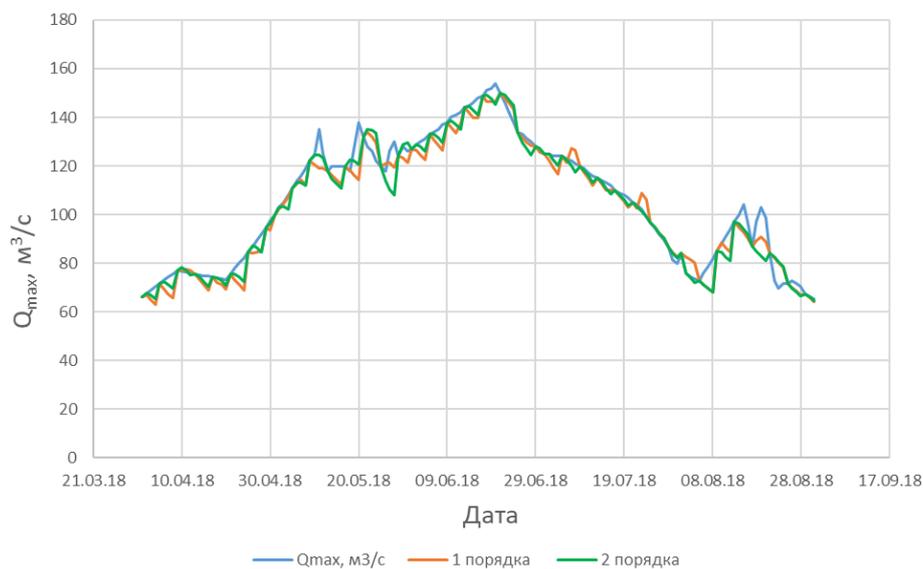


Рис. 4. Хронологический график максимальных расходов воды за месяцы половодья в 2018 г.

Заключение. В исследовании были апробированы такие методы прогноза максимального стока, как многомерный регрессионный анализ и динамические модели формирования стока 1-го и 2-го порядка. Полученные прогностические уравнения обеих методик были апробированы на независимом материале, после чего была оценена эффективность методики прогноза.

Итоги оценки эффективности уравнений регрессии следующие: поскольку допустимым критерием для рядов длиной $n \leq 15$ является отношение $S/\sigma \leq 0,7$, то можно сделать вывод, что на независимом материале прогнозная методика оказалась не совсем эффективной, а для зависимого материала – эффективной.

После ряда преобразований метеоданных выполнялась параметризация динамических моделей 1-го и 2-го порядка путем подбора параметров коэффициента стока k и времени релаксации τ .

В результате проверки была оценена оправдываемость отдельного прогноза и обеспеченность методики: в среднем, по модели 1-го порядка

оправдываемость отдельного прогноза составляет 66%, а по модели 2-го порядка – 75%. То есть, обеспеченность методики по модели 1-го порядка составляет 66%, а по модели 2-го порядка – 75%.

Поступила 18.10.2023

Получена с рецензии 16.11.2023

Утверждена 15.12.2023

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. *Моделирование гидрологических процессов*. Санкт-Петербург (2006), 559.
2. Агасиев Д.Я. Определение снеготопливных запасов по осадкам за холодный период в целях прогноза весеннего стока. *Труды ЗапНИГМИ* **45** (1970), 213–217.
3. Борщ С.В. Отчет о НИР “Разработка методов долгосрочных прогнозов стока р. Самур”. Москва (2009), 50.
4. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. *Гидрологические прогнозы*. Санкт-Петербург, РГГМУ (2007), 436.
5. Хаустов В.А., Ромашова К.В., Хренов А.А. Оценка многолетних изменений максимальных снеготопливных запасов и водоотдачи Северного края России. Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации. *Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции* (2019), 295–297.

Ա. Ա. ԲԱԹՄԱԶՈՎԱ, Ո. Ա. ԽԱՈՒՍՏՈՎ

ԼԵՆՆԱՅԻՆ ԳԵՏԵՐԻ ԱՌԱՎԵԼԱԳՈՒՅՆ ՀՈՍՔԻ ԿԱՆԽԱՏԵՍՍԱՆ
ՄԵԹՈԴԻԿԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Դիտարկվում են լեռնային գետերի առավելագույն հոսքի կանխատեսման տարբեր մեթոդներ: Կատարվել են մեթոդիկայի վերլուծություն և փորձարկում, հիմնված բազմազործոն ռեգրեսիոն վերլուծության և մաթեմատիկական մոդելավորման վրա, կիրառվել է նաև գրաֆո-անալիտիկ մոտեցում: Բազմազործոն ռեգրեսիոն վերլուծության համար դիտարկվել են զարնանային վարարումների և դրան նախորդող ձմեռային շրջանների տարբեր պրեդիկտորներ: Դիտարկված պրեդիկտորներից մի քանիսը հետազայում ընտրվել են որպես պոտենցիալ: Մաթեմատիկական մոդելավորման մեթոդը հիմնված է ձյան մեջ եղած պաշարների և ջրի կորստի, ինչպես նաև առավելագույն հոսքի ձևավորման վրա գործընթացների մոդելավորման վրա: Գրաֆո-անալիտիկ մոտեցումը ներառում է բարդ գրաֆիկների կառուցում, որոնք հնարավորություն են տալիս պատկերավոր ներկայացնել ուսումնասիրվող բնութագրերի օրինաչափություններն ու միտումները: Ուսումնասիրվող մոտեցումների փորձարկման օրյեկտներ են ընտրվել Սամուր և Ռ. Անդյան Կոյսու գետերի ավազանները: Թվարկած գետերի ջրհավաք ավազաններում օդերևութաբա-

նական բնութագրերի համար ընտրվել են դիտարկումների ներկայացուցչական շարքերով օդերևութաբանական կայաններ: Հետազոտության արդյունքները ստացվել են ոչ միանշանակ: Բազմազործոն ռեգրեսիոն վերլուծության մեթոդը հնարավորություն տվեց ընտրել պրեդիկտորներ, որոնք տալիս են բավարար կանխատեսում՝ կախված միայն նյութից, հոսքի ձևավորման դինամիկ մոդելի կիրառման արդյունքում ստացվել և օպտիմալացվել են մոդելի պարամետրերը վարարումների ամիսների համար, առանձին կանխատեսումների ճշգրտության և մեթոդիկայի ապահովվածության ստուգումը ցույց է տալիս, որ երկու մեթոդիկաներն էլ արդյունավետ են ավելի քան 60%-ով:

A. A. BATMAZOVA, V. A. KHAUSTOV

ANALYSIS AND TESTING OF METHODS FOR FORECASTING MAXIMUM MOUNTAIN RIVERS FLOW

Summary

The article discusses various methods for predicting the maximum flow of mountain rivers. Analysis and testing of techniques based on multivariate regression analysis and mathematical modeling were carried out, and a graphic-analytical approach was also used. For multivariate regression analysis, various predictors taken for the period of spring flood and for the previous winter period were considered. Some of the considered predictors were further selected as potential ones. The mathematical modeling method is based on modeling the processes of formation of snow reserves and water yield, as well as the formation of maximum flow. The graphic-analytical approach includes the construction of complex graphs that make it possible to visualize the patterns and trends of the characteristics under study. The basins of River Samur and River Andi Koysu were selected as objects for testing the approaches under study. Weather stations with a representative series of observations of meteorological characteristics were selected in the catchments of the listed rivers. The results of the study were mixed: the method of multivariate regression analysis made it possible to select predictors that give a satisfactory forecast only on dependent material; as a result of using a dynamic model of runoff formation, model parameters for flood months were obtained and optimized – testing for the feasibility of a separate forecast and the reliability of the methodology showed that both methods are more than 60% effective.