

УДК 556.16.01

Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А.*Общество с ограниченной ответственностью
научно-производственное объединение «Гидротехпроект»
(г. Валдай, Новгородская область)*

АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА МАЛЫХ РЕК

Аннотация. В статье приведены результаты последовательных расчетов различных критериев качества моделирования, основанных на различных методах статистической обработки рядов наблюдений. Указанные критерии построены на сравнении расчетных и эмпирических величин стока. Для краткого анализа обоснованности применения тех или иных критериев рассматриваются результаты расчетов по предложенной авторами модели на конкретном водосборе. Рассмотренные примеры показывают ряд трудностей, возникающих при моделировании. Отмечается, что при неполноте и неточности исходной информации, вызывающей ошибки моделирования, применение формальных статистических методов может давать негативную оценку качества моделирования. Авторы приходят к выводу о необходимости выбора критерия качества моделирования в соответствии с задачей, для которой строится модель.

Ключевые слова: малые реки, сток, паводок, математическое моделирование, критерий оценки моделей, расчет стока.

A. Vinogradov, A. Nikiforovskiy*Gidrotehproekt Research and Development Association,
Valday, Novgorod Region*

QUALITY CONFORMITY ANALYSIS OF RUNOFF FORMATION MODELING CRITERIA FOR SMALL RIVERS

Abstract. The results of successive calculations of various modeling quality criteria based on different methods for statistical processing of observation series are discussed. Reducible criteria are built on a comparison of calculated and empirical values of the runoff. For a brief analysis of the reasonableness of use of the criteria, the results of calculations by the authors' model for a particular catchment are considered. The examples show a number of difficulties encountered in modeling. It is noted that in the case of incompleteness and inaccuracy of the initial information, which results in modeling errors, the use of formal statistical methods may give a negative assessment of the modeling quality. A conclusion is made about the need of selection of the modeling quality criterion in accordance with the task for which the model is constructed.

Key words: small rivers, runoff, flood, mathematical modeling, model evaluation criterion, runoff calculations.

Детерминированное моделирование стока малых рек является методом исследования, направленным на реализацию инженерных расчетов путем имитации упрощенных процессов формирования стока. Такое упрощение обусловлено недостаточностью данных натурных наблюдений. Процесс изучения какого-либо природного явления путем моделирования состоит из нескольких этапов [7]. Первый этап – формулирование физических взаимосвязей между основными частями изучаемого объекта и их описание в математических терминах. Второй этап – проведение собственно расчетов. Третий этап – сравнение результатов расчетов с эмпирическими данными.

Для проверки применимости той или иной разработанной модели используются данные наблюдений за моделируемым объектом. В качестве объекта исследования авторами был выбран водосбор р. Медвенка, правого притока р. Москвы, площадью 21,5 км². Ниже мы рассмотрим основные общепризнанные оценочные критерии результатов моделирования гидрографа. Используемая авторами расчетная методика оценки максимального стока малых рек была ранее изложена в работе [2]. Для примера рассматривался 1966 г., характеризующийся неудовлетворительным совпадением расчетного и измеренного пиков весеннего половодья по датам, составляющим 9 дней, и значительной систематической ошибкой в абсолютных значениях суточного меженного стока. Для анализа использовались фондовые данные Росгидромета по Подмосквовской стокосовой станции, расположенной на водосборе р. Медвенки.

Основные результаты расчетов и анализа сводятся к нижеследующему.

1. Вычисление среднего эмпирического и расчетного значений. Для любой выборки среднее значение является показателем, дающим о ней основное представление. Сравнение среднего эмпирического и расчетного значений представляет собой первоочередную информацию об адекватности предложенной модели. Однако для более глубокого анализа стока малых рек средняя величина мало информативна. В межень, на протяжении десяти месяцев в году, расход реки может быть весьма незначительным, а паводок, продолжающийся всего неделю, обеспечивает более или менее заметную среднегодовую величину стока.

В нашем конкретном случае $\bar{Q}_{набл} = 146.75$ л/с, а $\bar{Q}_{расч} = 146.40$ л/с, что указывает на превосходное совпадение.

2. Среднее абсолютное систематическое отклонение MAD (mean absolute deviation) рассчитанных величин от измеренных усредняет величину ошибки расчета. В нашем случае $\Delta_{MAD} = 164.99$. Обращаем внимание, что в данном случае систематическое отклонение превышает средние значения, то есть в среднем на каждые расчетные сутки ошибка больше, чем среднегодовое значение измеренной величины.

3. Относительная погрешность RE (relative error), характеризующая величину ошибок расчета в сравнении с действительными значениями ряда наблюдений, в представленном примере (RE) равна 0.92, то есть весьма значительна. Величины ошибок расчетного и измеряемого параметров практически совпадают.

4. Средняя процентная ошибка MPE (mean percentage error) опреде-

ляет среднюю смещенность расчетных значений от измеренных и составляет -0.7 или 70% (по абсолютной величине). Согласно [8], модель является несмещенной, если критерий *MPE* не превышает 5% . Следовательно, по второму, третьему и четвертому критериям используемая модель [2] бесперспективна.

5. Среднеквадратическая ошибка *MSE* (mean square error) составила 474081. Каждое значение ошибки расчета в этом критерии возводится в квадрат, что подчеркивает влияние больших ошибок. Считается, что это важно, так как позволяет подобрать модель, постоянно дающую средние по величине ошибки, в отличие от других моделей, периодически дающих большие [8].

Представляется, что рассматриваемый критерий не информативен. Среднеквадратическая ошибка, составляющая 474081: много это или мало? Рассмотрим два варианта. В первом расхождении между измеренной (1000 л/с) и расчетной (950 л/с) величинами среднесуточных расходов укладываются в точность измерения. А во втором расчетная величина (70 л/с) превышает измеренную (20 л/с) в $3,5$ раза. Среднеквадратическая ошибка в обоих случаях одинакова и составляет 2500 . Таким образом, для оценки качества моделирования критерий неприемлем.

6. Квадратичное отклонение *RMSE* (root mean square error). Как и в предыдущем случае, полученный результат (688.54) заводит в тупик. Очевидно, что значение *RMSE* довольно велико, но неизвестно насколько.

7. Следующий критерий, по крайней мере, имеет физический смысл.

Именно на такую величину ($\Delta = 36,04$) в среднем отличаются значения измеренного ряда от расчетного.

8. Критерий эффективности Нэша–Сатклиффа среди специалистов по математическому моделированию наиболее востребован. Однако и здесь существуют определенные широтности. Во-первых, не все знают пределы изменения этого критерия. Некоторые ошибочно считают, что критерий Нэша–Сатклиффа изменяется от 0 до 100% [7]. Во-вторых, неизвестны допустимые пределы этого критерия. В работе [12] отмечается, что значения критерия, превышающие 90% , указывают на очень хорошие характеристики модели, значения, находящиеся в диапазоне $80-90\%$, свидетельствуют об удовлетворительном качестве модели, а значения ниже 80% , – о неудовлетворительном соответствии результатов расчета и эмпирическими данными.

Авторы работы [12] отдают себе отчет в том, что критерий Нэша–Сатклиффа имеет ряд недостатков. В частности, они отмечают возможность ошибочных результатов в случаях, когда ряды наблюдений речного стока являются нестационарными. В то же время практически любой ряд наблюдений нестационарен [14]. Тем не менее, несмотря на свои недостатки, использование критерия рекомендовано Американской ассоциацией гражданских инженеров для оценки состоятельности моделей стока, а также используется Всемирной метеорологической организацией для сравнительного анализа моделей [12].

В работе [9] критерий Нэша–Сатклиффа интерпретируется как статистическая мера, отражающая долю

дисперсии наблюдаемых величин, обоснованная рассчитанными значениями. При $\Delta_{NS} > 0.5$ модель хорошо воспроизводит динамику моделируемой величины, при $\Delta_{NS} = 1$ модельный расчет признается полностью адекватным, а при $\Delta_{NS} < 0$ модель считается не состоятельной. К недостаткам критерия Нэша–Сатклиффа авторы работы [9] относят завышение эффективности моделирования в периоды паводковых пиков, а также слабую чувствительность к систематическим занижениям или завышениям стока.

В действительности данный критерий малопригоден, ибо в период паводка он будет завышать оценку модели только в случае совпадения расчетного и измеренного пиков или в случае продолжительного и слабо интенсивного паводка на больших реках. Если же паводок на малой реке проходит за день и несовпадение модельного и измеренного результатов по хронологии составит всего сутки, то значение критерия Δ_{NS} будет иметь очень малое или отрицательное значение. Некоторые авторы, например автор работы [6], при моделировании гидрографа для всего периода наблюдений признают полученные результаты согласно значениям критерия. В указанной работе в процессе моделирования гидрографа для всего периода наблюдений на р. Неве значение критерия Δ_{NS} составило 0.15.

В отдельных случаях расчеты критерия, вероятно, могут оказаться искусственно завышенными. Так, например, в работе [11] сообщается, что при анализе результатов расчетов по модели SWAT (soil and water assessment tool) по двум створам – на реках Кабул (Наушера) и Инд (Калабах) значение критерия Нэша–Сатклиффа составляет

0.98. Авторы настоящей статьи позволили себе усомниться в этом результате и пересчитали показатели критерия Нэша–Сатклиффа по представленным в работе [11] эмпирическим и расчетным данным. Уточненные расчеты показали, что $\Delta_{NS} = -0.03$ для створа Кабул (Наушера) и $\Delta_{NS} = -0.70$ для створа Инд (Калабах).

9. Систематическая ошибка расчета стока *Bias*. Считается, что *Bias* (смещение – англ.) не должно по абсолютной величине превышать 5 % [1]. В нашем случае $\Delta_{Bias} = -0.24$ %, что указывает на привлекательность модели.

10. Коэффициент корреляции – еще один критерий достоверности, который характеризует тесноту и направление статистической связи между фактическими и модельными величинами [5]. Обычно коэффициент корреляции обозначается через *R*. Пределы изменения *R*: от –1 до +1. Чем ближе коэффициент корреляции к +1 или к –1, тем теснее прямая или обратная линейная корреляционная связь. Считается, что при $R < 0.3$ корреляционная зависимость слабая, при 0.3–0.7 – средняя, при $R > 0.7$ – сильная. Результаты наших расчетов – средние ($R = 0.51$).

В работе [10] отмечается, что «одним из недостатков использования коэффициента корреляции, как измерителя точности расчетов, является то, что полная положительная корреляция лишь указывает на наличие линейной зависимости между рядами рассчитанных и фактических величин». Но такая зависимость должна появляться при использовании любой модели, учитывающей климатические факторы. Еще В.Г. Глушков [4] сформулировал теперь уже хорошо известную

закономерность: «реки – продукт климата». То есть: есть дождь – есть паводок. Нет дождя – нет паводка.

11. Квадрат коэффициента корреляции (коэффициент детерминации). Обычно он обозначается посредством CD (coefficient of determination). Чем ближе значение CD к единице, тем лучше модель описывает реальные данные. Модель считается адекватной, если $CD > 0.75$ [11]. В нашем случае $CD = 0.258$, то есть гораздо ниже этого порога.

12. Индекс Тейла T [13], который изменяется от нуля до единицы, принято использовать, кроме перечисленных выше критериев, для оценки расхождения реальных и модельных значений. Он равен нулю в случае полного совпадения реальных и модельных значений и приближается к единице при очень большом их расхождении. Как и в случае с коэффициентом корреляции, мы находимся где-то в середине: $T = 0.50$.

13. Относительный критерий качества KK [3] – следующий рассмотренный нами критерий. Чем меньше различия между значениями измеренного и рассчитанного рядов, тем меньше значение критерия. У нас $KK = 91.6\%$, то есть качество модели весьма низкое.

14. Коэффициент несоответствия KN определяется как отношение среднеквадратической ошибки расчета к аналогичной ошибке, которая имела бы место, если для каждого суток принимать в расчете значение переменной, равной ее среднему значению за весь рассматриваемый период. Если $KN = 1$, то расчет на уровне среднего значения дает более реалистичный результат, чем результаты мо-

делирования. В нашем же случае $KN = 1.17$. Кроме того, средние значения совпадают лучше.

Итак, по большинству рассмотренных критериев предложенная в работе методика [2] неудовлетворительна. Лишь по некоторым критериям она обеспечивает более или менее приемлемые результаты.

В действительности модель строилась для расчетов максимального стока. И на десятикратное несоответствие межлетнего стока мы просто не обращаем внимания. Калибровку модели мы сознательно не проводили, а критерий оценки очень прост – максимальный измеренный расход составляет 6650 л/с, а расчетный – 6880. Относительная погрешность измерений при детальном способе составляет 5 %, при основном – 10 %. В нашем случае совпадение максимумов на 20-й расчетный год без калибровки параметров лежит в пределах 3,5 %. Кроме того, дополнительным источником ошибок моделирования может являться неполнота исходной информации. В рассматриваемой модели применительно к расходу весеннего половодья оцениваются величины снеготаяния и теплового потока, определяющего снеготаяние. В ней также рассчитываются потери на увлажнение почвенного слоя и испарение. Рассчитанный слой стока весеннего половодья, как и тип гидрографа, имеют высокую степень совпадения с натурными данными. Именно такие величины, имеющие физический смысл и менее чувствительные к ошибкам исходных данных, и должны, на наш взгляд, лежать в основе верификации моделей подобного рода.

Итак, примеры расчетов показывают ряд трудностей, возникающих

при моделировании. Анализ различных критериев качества моделирования речного стока, построенных на сравнении расчетных и эмпирических величинах стока на водосборе р. Медвенки, протекающей в Московской области, указывает, что при неполноте и неточности исходных данных, обуславливающих ошибки моделирования, применение формальных статистических методов может приводить к неудовлетворительному качеству моделирования. Анализ результатов также показывает, что выбор критериев качества моделирования должен производиться в соответствии с задачей, для которой строится модель, а также с учетом физического смысла процессов формирования речного стока.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ:

1. Айзель Г.В. Расчеты речного стока на основе модели SWAP для водосборов с недостаточным информационным обеспечением: дис ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 155 с.
2. Виноградов А.Ю. Методика расчета максимальных расходов для проектирования поперечного дорожного водотока // Известия СПбГЛТА. – 2010. – Вып. 191. – С. 95-103.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: Академия, 2010. – 3004 с.
4. Глушков В.Г. Географо-гидрологический метод // Известия ГГИ. – 1933. – № 57-58. – С. 5-10.
5. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
6. Журавлев С.А. Моделирование гидрографа стока рек с озерным регулированием (на примере бассейна р. Невы): автореф. дис ... канд. геогр. наук. – СПб., 2011. – 19 с.
7. Камышова Г.Н., Корсак В.В., Фалькович А.С. и др. Математическое моделирование в компонентах природы (интерактивный курс). – Саратов: СГАУ, 2012. – 161 с.
8. Льюис К.Д. Методы прогнозирования экономических показателей. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 133 с.
9. Сазонова Д.Г. Использование модели «Гидрограф ГГИ-2001» для оценки притока воды в Камское водохранилище // Географический вестник. – 2013. – № 1(24). – С. 52-71.
10. Гаркуша Н.М., Цуканова О.В., Горшаньска О.О. Моделі і методи прийняття рішень в аналізі та аудиті: навчальний посібник. – Київ: Знання, 2012. – 591 с.
11. Khan A.D. Hydrological Modeling of Upper Indus Basin and Assessment of Deltaic Ecology / A.D. Khan, S. Ghoraba, J.G. Arnold et al. // Journal of Modern Engineering Research. – 2014. – Vol. 4 (Iss. 1). – P. 73-85.
12. Shamseldin A.Y., O'Connor K.M. A Non-Linear Neural Network Technique for Updating of River Flow Forecasts // Hydrology and Earth System Sciences. – 2001. – Vol. 5 (№ 4). – P. 577-597.
13. Theil H. Economics and Information Theory. – Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1967. – 488 p.
14. Vinogradov, A. Yu. On the Conformity of the Regulatory Framework for Hydrological Calculations of Current Legislation // Materials of the 5-th International Research and Practice Conference «European Science and Technology». Vol. 1. Munich (Germany): Vela Verlag Waldkraiburg, 2013. – P. 345-350.