

ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Кучмент Л.С.
Институт водных проблем РАН, г. Москва
kuchment@mail.ru

Расширение наземной сети гидрометеорологический наблюдений, совершенствование методов измерения пространственно-временных метеорологических воздействий на водосбор (радарные измерения интенсивности осадков, аэрокосмическая съемка полей снеготаяния и влажности почвы, спутниковые методы измерения эвапотранспирации) и создание геоинформационных систем открывают широкие возможности для разработки моделей формирования стока с распределенными параметрами, позволяющих воспроизводить пространственную картину составляющих гидрологического цикла в речном бассейне и рассчитывать их в тех точках, где нет измерений этих составляющих.

Детальные физико-математические модели процессов гидрологического цикла позволяют описывать пространственные процессы формирования снежного покрова и снеготаяния, вертикального влагопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера», промерзания почвы и впитывания талых вод, взаимодействие поверхностных и подземных вод, стекание воды по поверхности водосбора, подповерхностный и грунтовый сток, движения воды в речных системах, формирования и развития опасных гидрологических явлений в реальном времени. Большая часть физических констант и параметров физико-математических моделей может быть задана по данным прямых измерений. При наличии наблюдений за составляющими гидрологического цикла остальные параметры находятся путем подбора (калибровки). Физико-математические модели формирования стока с распределенными параметрами играют важную роль при качественном исследовании гидрологических процессов и организации экспериментальных наблюдений; они стали использоваться для расчетов неустановившегося движения в крупных речных системах, предвычисления возможных катастрофических наводнений, оценки влияния деятельности человека на гидрологический цикл и управление им, описания формирования качества воды на водосборе и во многих других гидрологических задачах, где необ-

ходимо пространственное воспроизведение основных физических процессов. Однако пространственная неоднородность условий на речном водосборе, отсутствие достаточной информации об этих характеристиках и внешних воздействиях на гидрологические системы, разнообразие гидрологических процессов и их недостаточная изученность значительно затрудняют построение физико-математических моделей формирования стока и отражаются на их точности. Чем более детальной является физико-математическая модель, тем более трудной становится задача задания ее параметров и, таким образом, уточнение описания физических процессов, происходящих на водосборе, необязательно должно вести к повышению точности моделирования стока.

При практическом применении моделей формирования стока с распределенными параметрами приходится выбирать структуру модели оптимальной сложности, которая при имеющейся обеспеченности исходной информации может гарантировать наибольшую точность расчетов. В связи с этим для многих практических расчетов и прогнозов характеристик речного стока в настоящее время в основном применяются модели формирования стока с сосредоточенными параметрами, где водосбор рассматривается как система, сосредоточенная в одной точке, и используются осредненные по водосбору метеорологические воздействия на водосбор и характеристики водосбора. Структура таких моделей может выбираться на основе эмпирических зависимостей и общих априорных представлений (концепций) (такие модели часто принято называть концептуальными). Параметры концептуальных моделей являются агрегированными константами, которые варьируют в больших диапазонах и не могут быть определены путем непосредственных измерений. Число калибруемых параметров в этих моделях может быть весьма значительным, что отражается на точности и надежности определения параметров и самих моделей.

Все это делает весьма естественной гипотезу о том, что физико-математические модели формирования стока с распределенными параметрами при их должном использовании могут обеспечивать большую точность, чем модели с сосредоточенными параметрами. Следует признать, что до сих пор разработка моделей формирования стока для решения тех или иных гидрологических задач велась без исследования возможностей выбора оптимальной структуры модели и эффективного способа определения параметров.

С позиций этой гипотезы большой интерес имеет уникальные экспериментальные исследования, которые были проведены под эгидой Национальной службы погоды США (НСП США) [1-5]. НСП США в течение нескольких десятилетий выпускает с помощью унифицированной модели с сосредоточенными параметрами ежедневные краткосрочные прогнозы стока более чем по 4000 речных створов. Успехи в разработке моделей с распределенными параметрами, а также внедрение в оперативную практику по всей территории США метеорологических радаров нового поколения NEXRAD, позволяющих измерять дождевые осадки по часовым интервалам с пространственным разрешением 4 км, сделали актуальными исследования возможностей повышения на этой основе точности и надежности гидрологических прогнозов, а также выбора наиболее подходящей для краткосрочных прогнозов модели с распределенными параметрами. В связи с этим НСП США организовала в 2002 г. международный проект по сравнению эффективности моделей стока с сосредоточенными и распределенными параметрами при использовании их в оперативных краткосрочных гидрологических прогнозах (DMIP 1) [1,2]. Наблюдаемые гидрографы в замыкающих створах 8 речных бассейнов площадью от 65 до 2484 кв. километров, расположенных в штатах Оклахома (7) и Миссури (1), сравнивались с гидрографами, рассчитанными по 12 моделям с распределенными параметрами и по модели с сосредоточенными параметрами НСП США. Среди моделей с распределенными параметрами были как развитые физико-математические модели с детальным описанием процессов формирования стока, так и модели, где физико-математическое моделирование применяется только для описания горизонтального движения между частными водосборами, а для описания вертикального движения на частных водосборах применялись концептуальные модели. Участникам проекта были предоставлены следующие исходные данные:

- 1) данные о измерениях расходов воды по часовым интервалам;
- 2) радарные измерения осадков по часовым интервалам по квадратам 4 на 4 км;
- 3) два комплекта 6-часовых метеорологических наблюдений – по данным измерений наземных метеорологических станций и по результатам реанализа данных численного прогноза погоды;
- 4) месячные данные о суммарно испаряемости;
- 5) компьютерные данные о рельефе с 30-метровым разрешением;

- 5) данные о текстуре почв;
- 6) карты растительности с разрешением 1 км.

Калибровка моделей в основном производилась их авторами по наблюдениям в замыкающих створах. Результаты сравнения рассчитанных и наблюдаемых гидрографов не выявили модель, которая была заметно лучше для всех водосборов. Некоторые модели оказывались лучшими для одного или двух бассейнов. Однако статистические оценки по всем водосборам неожиданно показали, что средним модели с распределенными параметрами дали улучшение точности расчета объемов стока по сравнению с моделью НСП США в 14% случаев, улучшение точности расчета максимального расхода в 33% случаев и времени наступления пика гидрографов в 22% случаев. В связи с этим НСП США приняла решение провести вторую фазу проекта на большом числе водосборов и с более качественными данными наблюдений.[3-5]. Было добавлено два небольших водосбора и увеличено количество створов для того, чтобы лучше оценивать расчеты стока во внутренних точках речных бассейнов. Добавлены также наблюдения за влажностью почвы и снегом. Удлинены периоды наблюдений, и увеличено число рассчитываемых паводков.

В новых экспериментах участвовали 14 моделей с распределенными параметрами и 2 модели с сосредоточенными параметрами (кроме модели НСП США использовалась концептуальная французская модель SEMAGREF). Десять из этих моделей не использовалась в первой фазе проекта. Исследования проводились по данным наблюдений на 16 расположенных в Оклахоме равнинных водосборах с площадями от 37 до 2484 кв. километров и на 2 горных водосборах с площадями 922 и 826 кв. километров, расположенных в штате Сьерра-Неваде. Кроме сопоставления гидрографов в замыкающих створах речных бассейнов, сравнивались гидрографы, полученные по калиброванным и некалиброванным моделям, гидрографы во внутренних створах водосборов, составляющие водного баланса за заданные периоды, рассчитанные и измеренные значения почвенной влаги. Выявить модель, которая бы давала наилучшие результаты для всех водосборов, и в этом случае не удалось. Из моделей с распределенными параметрами лучшие результаты дали модели, в которых объединялись концептуальные модели формирования стока на водосборе с физико-математическими моделями стекания воды по водосбору (применялись главным образом уравнения

кинематической волны). Две модели дали удовлетворительное совпадение рассчитанных значений влажности почвы на разных глубинах с данными измерений, несмотря на то, измерения включали два засушливых периода. Если модели с сосредоточенными параметрами обеспечивали необходимую точность расчета гидрографа стока в замыкающем створе, то модели с распределенными параметрами позволили с удовлетворительной точностью рассчитать гидрографы и в промежуточных створах. Калибровка моделей в целом заметно улучшала качество расчетов, однако при использовании априорных значений параметров во многих случаях были получены вполне удовлетворительные результаты. Несколько моделей с распределенными параметрами без калибровки дали лучшие результаты, чем другие модели с калибровкой.

Статистические оценки экспериментов DMIP 2 оказались близкими к тем, которые были получены в первой фазе проекта. Модели с распределенными параметрами позволили улучшить расчеты: объема стока равнинных рек – для 18% гидрографов, максимального расхода – для 24% и времени наступления пика – для 28%. Для горных рек получено улучшение результатов расчетов объема стока – для 24%, максимального расхода – для 12% и времени наступления пика – для 41%. Предполагается, что физическая обоснованность модели, определения параметров и опыт модельера сыграли большую роль в определении точности моделей, чем зависимость от того, являются ли модели с сосредоточенными или распределенными параметрами [4].

По мнению [4], несмотря на то, что улучшение качества расчетов, которые дали модели с распределенными параметрами, оказалось заметно меньше, чем можно было ожидать, тот факт, что во многих случаях, эти расчеты близки к тому, что дают модели с сосредоточенными параметрами, можно считать обнадеживающим, и накопление опыта работы с моделями с распределенными параметрами позволит повысить точность гидрологических прогнозов. Однако пока нет оснований для массового перехода от выпуска краткосрочных гидрологических прогнозов по моделям с сосредоточенными параметрами к прогнозам по моделям с распределенными параметрами [4,5] В то же время модели с распределенными параметрами дают ценную информацию, которая может быть дополнением к прогнозам по моделям с сосредоточенными параметрами.

Проведенные эксперименты указывают на то, что при выборе модели для практических расчетов необходимо учитывать такие факторы как наиболее важные для решаемой задачи характеристики стока, которые предстоит рассчитывать, имеющиеся исходные данные наблюдений, интервалы времени, по которым они заданы, и размеры водосбора. Во многих случаях детальные физико-математические модели процессов гидрологического цикла оказываются избыточными и недостаточно обеспеченными исходной информацией. В качестве примера, где видна необходимость выбора модели, соответствующей решаемой задаче и исходным данным, можно привести такую часто решаемую задачу как расчет неустановившегося движения в речном русле.

Как показал наш опыт расчетов по данным специальных наблюдений в нижнем бьефе Ново-Тверецкой ГЭС [7], применение уравнений Сен-Венана с использованием детальных топографических измерений речного русла без соответствующих измерений его шероховатости приводит к значительным ошибкам в расчетах расходов и уровней в замыкающих створах выбранных участков реки. И в этом случае лучшие результаты дают модели с сосредоточенными параметрами типа Калинина-Милюкова или Кюнжа-Маскинга [7, 8]

Из рассмотренного выше следует, что разработка моделей стока для прикладных задач (гидрологических прогнозов, динамико-стохастических расчетов, оценки влияния деятельности человека на сток и др.) требует дополнительной работы по выбору оптимальных структуры и метода задания параметров. Наиболее полная физико-математическая модель с априорным приближенным заданием параметров может быть применена для оценки влияния различных составляющих водного баланса на рассчитываемые для практического использования величины. Результаты таких исследований могут привести к необходимости сравнения нескольких моделей по имеющимся данным наблюдений. Такое сравнение должно производиться одновременно с процессом калибровки параметров. Оценку моделей и их калибровку желательно проводить путем усложнения моделей. Важную роль при калибровке должны играть априорные значения параметров. Оптимизация параметров по обычно принятым критериям качества моделей может приводить к тому, что находятся параметры, которые дают хорошие результаты для гидрометеорологических условий, близких к средним, и при этом

плохо воспроизводятся редкие гидрологические события. В связи с этим оптимизацию параметров желательно проводить по нескольким критериям.

Литература

1. *Smith, M.B., Seo, D.-J., Koren, V.I., Reed, S., Zhang, Z., Duan, Q.-Y., Moreda, F., Cong, S.* The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *J. Hydrol.* 2004. 298 (1–4), 4–26.
2. *Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F., Seo, D.-J.* DMIP, Participants, Overall distributed model intercomparison project results. *J. Hydrol.* 2004. 298 (1–4), 27–60.
3. *Smith, M.B., Koren, V., Reed, S., Zhang, Z., Zhang, Yu., Moreda, F., Cui, Z., Mizukami, N., Anderson, E.A., Cosgrove, B.A.* The distributed model intercomparison project – Phase 2: motivation and design of the Oklahoma experiments. *J. Hydrol.* 2012. 418–419, 3–16.
4. *Smith, M., Koren, V., Zhang, Z., Zhang, Y., Reed, S., Cui, Z., Moreda, F., Anderson, E., Cosgrove, B., Mizukami, N.* DMIP 2 Participants, Overall results of the DMIP 2 Oklahoma experiments. *J. Hydrol.* 2012. 418–419, 17–48.
5. *Smith, M., V. Koren, Z. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, B. Cosgrove, N. Mizukami, D. Kitzmiller, F. Ding, S. Reed, E. Anderson, J. Schaake, Y. Zhang, V. Andréassiane, C. Perrine, L. Coron, A. Valéry, B. Khakbaz, S. Sorooshian, A. Behrangi, B. Imam, K.-L. Hsu, E. Todini, G. Coccia, C. Mazzetti, E.O. Andres, F. Francés, I. Orozco, R. Hartman, A. Henkel, P. Fickenscher, and S. Staggs,* The distributed model intercomparison project – Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments. *Journal of Hydrology*, 2013. 507, 300-329.
6. *Калинин Г.П., Кучмент Л.С.* О численных методах решения уравнений Сен-Венана для расчета неустановившегося движения воды в реках. //Метеорология и гидрология, № 6, 1963.
7. *Кучмент Л.С.* Математическое моделирование речного стока. – Л.: Гидрометеиздат. 1972 191 с.
8. *Исследование неустановившегося движения воды на реках Тверце и Оредеж.* – Л.: Гидрометеиздат. 1961. 287с.