6
А-61 6

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР СССР

В.А. Бельчиков

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОВОДЬЯ ПО ДАННЫМ О ПОСТУПЛЕНИИ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ БАССЕЙНА

(Диссертация написана на русском языке)

278 - гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1971

1
Диссе

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР СССР

В. А. Бельчиков

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОВОДЬЯ ПО ДАННЫМ О ПОСТУПЛЕНИИ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ БАССЕЙНА

(Диссертация написана на русском языке)

278 - гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1971

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Узб. ССР

АБ1

Работа выполнена в Ордена Ленина Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре СССР.

Научный руководитель - член-корреспондент АН СССР
Г.П.Калинин

Официальные оппоненты:

доктор технических наук М.С.Грушевский
кандидат географических наук В.Г.Ходаков

Ведущее предприятие - Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт.

Автореферат разослан 5 ноября 1971 г.

Защита диссертации состоится 8 декабря 1971 г. на заседании гидрологической секции Ученого Совета Ордена Ленина Гидрометеорологического научно-исследовательского центра СССР.

Адрес: Москва, Большевистская улица, д.9-13, конференц-зал (6 этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Гидрометцентра СССР.

Ученый секретарь (А.А.Акулиничева)

Формирование весеннего половодья представляет собой взаимодействие сложных природных процессов. Главными из них являются: 1) процессы, определяющие подачу воды на поверхность бассейна - накопление и таяние снега, водоотдача снежного покрова и 2) процессы, определяющие преобразование поступившей на поверхность бассейна воды в гидрограф стока - впитывание воды почвой, аккумулирование талых вод, стекание их по склонам и руслу. Исследование этих процессов, включая их взаимодействие на водосборе, представляет большой теоретический и практический интерес.

Уровень развития теоретической и экспериментальной гидрологии позволяет в настоящее время переходить от качественных обобщений к количественному описанию основных процессов, происходящих на водосборе. Однако сложность процесса формирования стока и большая изменчивость по бассейну основных факторов стокообразования не позволяют построить практически реализуемую модель, не включающую эмпирических неизмеряемых параметров. Поэтому при построении математических моделей формирования стока, как правило, приходится прибегать к значительной схематизации этого процесса и,в частности,рассматривать бассейн (либо его части) как динамическую систему с сосредоточенными параметрами, у которой, вообще говоря, неизвестны как параметры, так и структура. Однако на класс уравнений, в котором ищется структура модели и величины параметров,накладываются ограничения. В качестве таких ограничений, уменьшающих неопределенность структуры и параметров, используются общие физические представления о процессах стокообразования, эмпирические зависимости, имеющиеся экспериментальные наблюдения.

В этом случае возникают две основные задачи: выбор структуры

этой системы и определение ее параметров. Обе эти задачи тесно связаны, так как усложнение модели неизбежно ведет к увеличению числа параметров, а это, в свою очередь, затрудняет их определение. Вследствие этого построение модели целесообразно производить следующим образом. Исходя из анализа экспериментальных данных и эмпирических зависимостей для различных локальных условий, а также существующих теоретических представлений о процессах стокообразования на водосборе можно задаться некоторой "общей" структурой модели. Затем для каждого конкретного водосбора должна искаться оптимальная (в смысле точности определения параметров) модель, путем постепенного усложнения схемы расчета в рамках "общей" модели.

В настоящей работе такой подход используется для построения математической модели формирования гидрографа талого стока.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (89 названий) и приложения.

В первой главе дан краткий обзор исследований по расчету гидрографа весеннего половодья на основе данных об интенсивности снеготаяния. Наибольшее внимание уделено схемам Е.Г.Попова и В.Д.Комарова. Эти модели достаточно полно соответствуют общим представлениям о процессах формирования половодья.

Обращается внимание на то, что расчет поступления воды на поверхность бассейна достаточно хорошо освещен во многих работах, но заметно меньше исследованы динамика потерь талого стока и регулирование его на поверхности бассейна.

Глава вторая посвящена выбору модели формирования весеннего половодья. Предложена математическая модель формирования половодья, которая включает модели поступления талой и дождевой воды на поверхность бассейна, формирования потерь талого стока, регулирования стока на поверхности бассейна и трансформации водоотдачи бассейна в гидрограф стока замыкающего створа. В процессе разработки модели формирования половодья поступление талой и дождевой воды считалось заданной величиной и основное внимание уделено количественному описанию процессов формирования потерь и регулирования стока на поверхности бассейна.

Используя эмпирические положения, полученные на основании полевых и лабораторных исследований, для расчета потерь на инфильтрацию воды в почву принята следующая зависимость

$$\mathcal{J}(t) = P(t)\, e^{-\left(\frac{K_3 \int_0^t P(\tau)\,d\tau}{f + \gamma} + \frac{K_4 S_{л.к.}}{\frac{1}{S}\int_0^t P(\tau)\,d\tau} \right)}, \qquad (I)$$

где

$$f = e^{-K_1\left[1-\lambda e^{-(K_2 L)^2}\right]U},$$

L – глубина промерзания почвы, U – характеристика увлажненности бассейна, $S_{л.к.}$ – запас воды в ледяной корке, S – максимальный запас воды в снежном покрове, K_1, K_2, K_3, K_4, γ, λ – эмпирические параметры. Соотношение (I) получено при следующих допущениях:

I. Интенсивность инфильтрации зависит от характеристик влажности и глубины промерзания почвы. При увеличении этих характеристик выше некоторых значений потери практически остаются пос-

тоянными.

2. Уменьшение инфильтрации со временем принято пропорциональным интегральной величине водоподачи $k_3 \int_0^t \rho(\tau)\,d\tau$. При этом считается, что существуют такие участки на водосборе, которые инфильтрируют всю поступающую воду и сокращение их идет пропорционально поступлению воды на водосбор, причем скорость уменьшения зависит от промерзания и увлажненности почвы.

3. Наличие ледяной корки снижает величину потерь на инфильтрацию пропорционально относительной величине водоподачи на бассейн ($\frac{\int_0^t \rho(\tau)\,d\tau}{S}$). Последняя учитывает изменение покрытости бассейна снегом и стаивание ледяной корки. Следует отметить, что такой характер зависимости инфильтрации от ледяной корки допускает возможность наступления максимальной инфильтрационной способности не в момент начала водоподачи, а несколько позже.

При описании процесса регулирования стока на поверхности бассейна исходили из следующих положений. Общий слой задержанной на бассейне воды за t единиц времени определяется величиной водоподачи за это же время

$$W(t) = e^{-m\int_0^t \rho(\tau)\,d\tau} \int_0^t \rho(\tau)\,d\tau \qquad (2)$$

здесь m – параметр. Полагая, что максимально возможное количество задерживаемой воды (W_m) пропорционально запасу воды в снежном покрове к началу снеготаяния, момент сработки временно аккумулированной под снегом воды будет соответствовать выполнению следующего равенства

$$W_m = W(T) = \alpha S \qquad (3)$$

где α – коэффициент пропорциональности, T – момент начала срабстки временно аккумулированной воды.

По исследованиям В.Д.Комарова процесс стекания временно аккумулированной воды хорошо описывается косинусгиперболической зависимостью. Поэтому мы использовали аналогичную зависимость с небольшими изменениями

$$W'(t) = \frac{W_a}{ch^2 z(t)} \qquad (4)$$

где $W'(t)$ – слой воды, оставшейся под снегом к моменту t, $W_a = W_m - \rho_3 - \int_T^t J(t)\,dt$ – слой временно аккумулированной воды к началу ее сработки, ρ_3 – потери воды на поверхностное задержание в бессточных углублениях,

$$z(t) = \frac{\int_T^t \rho(\tau)\,d\tau}{\beta\left[S - \int_0^t \rho(\tau)\,d\tau\right]},$$

где β – эмпирический коэффициент.

Водоотдача бассейна рассчитывается по соотношению

$$\gamma(t) = \rho(t) - J(t) - \Delta W(t) \qquad (5)$$

где

$$\Delta W(t) = \begin{cases} W(t) - W(t-1) - \mathcal{Y}(t) & \text{при } W(t) \le W_m \\ W'(t) - W'(t-1) & \text{при } W(t) > W_m \end{cases}$$

Для трансформации водоотдачи в гидрограф стока использовался интеграл Дюамеля, причем функция влияния аппроксимировалась двухпараметрическим (к , n) гамма-распределением.

Приведенная модель формирования половодья является достаточно общей и может быть применима к различным физико-географическим условиям. Для водосборов, закономерности формирования стока которых существенно отличаются, модель позволяет вводить дальнейшие уточнения и изменения в описание элементарных процессов стока.

Глава третья посвящена вопросу определения параметров модели формирования половодья. Для решения этой задачи использовалась методика оптимизации, разработанная в вычислительном центре МГУ, позволяющая найти такие значения параметров, при которых минимизируется некоторый функционал (критерий качества), характеризующий расхождение между фактическими и рассчитанными величинами (в нашем случае расходами воды в замыкающем створе). Достоинством этой методики является то, что она реализует несколько методов, целесообразно используя их на разных ступенях минимизации и учитывая ту информацию о поведении функционала, которую может дать каждый метод.

Критерий качества рассчитывался по следующему соотношению:

$$K = \sum_{i=1}^{n} \int_{0}^{T_i} \left[Q_{\phi i}(t) - Q_{pi}(X_j, t) \right]^2 dt \quad , \qquad (6)$$

где Q_ϕ , Q_p - фактические и рассчитанные расходы воды, X_j - вектор параметров, n - число реализаций (половодий), одновременно включенных в оптимизацию, T_i - длина i-ой реализации. Расчеты показали, что этот критерий качества хорошо учитывает сохранение объемов, а в силу включения в расчет n реализаций снижает чувствительность к ошибкам в отдельных реализациях.

Проведено сравнение двух подходов определения постоянной системы параметров на примере бассейна р.Оки до г.Орла. Оптимизация параметров для выбранных лет была произведена в двух вариантах: I) оптимизация отдельно по каждому паводку и 2) оптимизация одновременно по ряду паводков. Для определения оптимальных параметров было взято пять лет, характеризующихся большим разнообразием увлажненности почвы, глубины промерзания, запасов воды в снеге и коэффициента стока. Показано, что для модели, включающей большое число параметров, оптимизация одновременно по нескольким реализациям дает более устойчивые значения параметров, чем при оптимизации по каждой реализации отдельно с последующим осреднением параметров, полученных для нескольких реализаций.

В этой же главе рассматривается также выбор оптимальной структуры модели. При этом за основу принималась "общая" модель формирования половодья и затем искалась оптимальная модель путем

последовательного усложнения схемы расчета в рамках "общей" модели. Структура модели усложнялась путем подключения новых параметров и элементарных процессов. Наиболее простая модель включала три параметра k_1, k, n, то есть принимался постоянный для всех лет коэффициент стока. Далее для учета динамики этого коэффициента вводилась величина $\int_0^t \rho(\tau)\,d\tau$. В дальнейшем учитывались характеристики влажности (параметр k_1), глубины промерзания (параметр k_2) и ледяной корки (параметр k_4). Последующее усложнение модели достигается за счет учета регулирования временно задержанной на бассейне воды (параметры m, α, β) и воды, аккумулированной в бессточных углублениях (ρ_3). Усложнение модели продолжалось до тех пор, пока наблюдалось заметное уменьшение расхождений между фактическими и вычисленными гидрографами как для паводков, которые использовались для определения параметров, так и для проверочных.

В последнем параграфе этой главы обсуждаются возможности выбора начального приближения параметров. Отмечается, что выбор начальных значений параметров не является однозначным процессом. Он требует индивидуального подхода к конкретным водосборам и должен опираться на результаты физических проработок материалов наблюдений, а также на результаты наблюдений в лабораторных и полевых условиях. Последовательное усложнение модели позволяет несколько уменьшить неопределенность при выборе начальных значений параметров.

В четвертой главе приводятся результаты испытания полученной модели формирования половодья и их анализ. Расчеты велись для трех небольших водосборов, расположенных в лесостепной и лесной

зонах ЕТС: р.Ока - г.Орел (площадь водосбора $F = 4900$ км^2); р.Сейм - с.Лебяжье ($F = 4870$ км^2), р.Нея - д.Буслаево ($F = 5700$ км^2). По бассейну р.Оки были использованы данные наблюдений с 1947 по 1965 г., по бассейну р.Сейм - с 1956 по 1965 г. и по бассейну р.Неи - с 1948 по 1965 г. Для рек Оки и Сейма использовались данные о поступлении воды на поверхность бассейна, рассчитанные по схеме В.Д.Комарова. Подача воды на бассейн р.Неи определялась как среднее взвешенное от подачи на полевой и лесной частях водосбора, причем интенсивность снеготаяния рассчитывалась по коэффициенту стаивания для поля равному 4 мм/град а для леса - 2 мм/град. Для расчета водоотдачи использовалась методика, предложенная Е.Г.Поповым.

В работе приведены основные характеристики (количество воды, поступившей на поверхность бассейна за период снеготаяния, запас воды в ледяной корке, характеристика увлажненности и глубина промерзания почвы), необходимые для определения параметров.

Оптимизация параметров для всех бассейнов проводилась по данным пяти характерных паводков, остальные (для р.Оки 14 лет, для р.Сейм 5 лет, для р.Неи 13 лет) использовались для контроля. Параметры определялись для 6-ти последовательно усложняющихся моделей. Полученные в результате оптимизации параметры и критерии качества для этих моделей приводятся в работе.

Анализ результатов оптимизации показал, что для бассейна реки Оки можно принять оптимальную модель, включающую 9 параметров, для бассейна р.Сейма - 10 параметров и для бассейна р.Неи - 5 параметров. Достаточность такой простой модели для р.Неи, по сравнению с моделью для р.Оки, соответствует физическим представлениям об условиях формирования талого стока на этих бассейнах. Сравнение

фактических и рассчитанных гидрографов показывает, что точность расчетов вполне удовлетворительная.

Анализ промежуточных результатов (величин потерь талого стока, аккумуляции воды на поверхности бассейна, времени добегания стока до замыкающего створа) дает основание считать, что параметры определены с достаточной степенью надежности и не противоречат нашим представлениям о характере протекающих в бассейне процессов.

Доказательством надежности и устойчивости параметров модели является также то, что точность расчетов для проверочных паводков примерно такая же, как точность расчетов для паводков, по которым производилась оптимизация.

Основные положения диссертации доложены на конференциях молодых ученых Гидрометцентра СССР (I970-I97I гг.) и на УI-ой конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам (I97I г.) и изложены в статьях:

I. Учет динамики потерь при расчете гидрографа весеннего половодья. Метеорология и гидрология, № II, I970 (в соавторстве с В.И.Корнем).

2. Расчет гидрографа половодья с учетом динамики потерь стока. Труды ГМЦ, вып.72, I97I.

3. Модель преобразования водоотдачи снежного покрова в сток и оптимизация ее параметров. УI-ая конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Киев, I97I (в соавторстве с В.И.Корнем).