

МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ ЛЕСОСТЕПНЫХ И ГОРНО-ЛЕСНЫХ РЕК СРЕДНЕЙ СИБИРИ

В инфильтрационно-емкостных моделях прогноза речного стока учтены потери на испарение в период снеготаяния и потери на испарение и впитывание в период истощения склонового притока в русловую сеть. Приводятся уравнения для прогноза стока весеннего половодья лесостепных и горно-лесных рек Средней Сибири, учитывающие таяние почвенной мерзлоты. Реализована концептуальная модель прогноза ежедневных расходов (уровней) воды.

Ключевые слова: модели гидрологических прогнозов; водный баланс; сток весеннего половодья; расходы (уровни) воды.

В основу математического описания весеннего и дождевого стока положен подход Е.Г. Попова [1], описывающий инфильтрационно-емкостное поглощение воды бассейном. В этом случае склоновый сток формируется после заполнения водоудерживающей емкости при условии, что поступление воды в период снеготаяния на поверхность бассейна превышает инфильтрацию воды в почву:

$$Y = (1-w) \left(\int_0^{X-J} \varphi(h) dh \right), \quad (1)$$

где $X = S+x$ – слой поступившей воды в период снеготаяния, равный сумме запаса воды в снежном покрове (S) и осадков периода снеготаяния (x); J – инфильтрация воды в почву в период снеготаяния; $\varphi(h)$ – доля действующей (дающей сток) площади; $w = F/F_0$ – доля постоянно бессточной площади; F_0 – бессточная площадь; F – площадь бассейна.

Уравнения для расчета и прогноза стока получают путем интегрирования (1) после подстановки различных аппроксимаций функции $\varphi(h)$. В работах Д.А. Буракова [2–3] в интеграл (1) дополнительно вводится испарение (Z) в период снеготаяния, а также учитываются испарение и инфильтрация талой и дождевой воды на спаде половодья:

$$Y = K_c(1-w) \left(\int_0^{X-J-Z} \varphi(h) dh \right), \quad (2)$$

где K_c – коэффициент потерь стока на спаде половодья (оценка K_c дана в [3. С. 6]).

Уравнения для прогноза стока получают путем интегрирования (2) после подстановки различных аппроксимаций функции $\varphi(h)$. Решение имеет следующий вид:

$$Y = K_c(1-w) \left[H - P_0 f\left(\frac{H}{P_0}\right) \right], \quad (3)$$

где $H = X-J-Z$; P_0 – величина водоудерживающей емкости на водосборе; $f\left(\frac{H}{P_0}\right)$ – функция потерь стока, зависящая от принятого вида уравнения для действующей площади $\varphi(h)$.

Известны *гиперболическая, экспоненциальная и степенная* аппроксимации этого уравнения [1, 3–4], позволяющие получить соответствующие выражения для функции потерь:

$$f\left(\frac{H}{P_0}\right) = th\left(\frac{H}{P_0}\right),$$

$$f\left(\frac{H}{P_0}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{H}{P_0}\right), \quad f\left(\frac{H}{P_0}\right) = \left[1 + \left(\frac{X}{P_0}\right)^{-n} \right]^{-1/n}, \quad (4)$$

где n – показатель степени, характеризующий особенности территориального распределения водоудерживающей емкости водосбора, определяется на основе данных наблюдений (об этом – ниже).

Подставляя в (3) любое из записанных выражений (4), получим соответствующее расчетное уравнение для прогноза стока весеннего половодья или дождевого паводка. Выбор подходящего уравнения производится по данным наблюдений из условия получения наименьшей ошибки аппроксимации. В связи с трудностями, связанными с оценкой испарения и инфильтрации в период снеготаяния, эти факторы учитываются косвенно. Рассмотрим подходы к решению этой задачи.

Подход 1. В работе [2] величина $H = X-J-Z$ представляется в виде

$$H = X \left(1 - \frac{J+Z}{X} \right) = \eta X, \quad (5)$$

где $\eta = \left(1 - \frac{J+Z}{X} \right)$ – инфильтрация и испарение в долях поступления воды на водосбор в период снеготаяния.

Подставляя (5) в уравнение (3), получим

$$Y = a \left[X - P f\left(\frac{X}{P}\right) \right], \quad (6)$$

где $a = \eta K_c(1-w)$ – сборный коэффициент потерь стока, учитывающий долю постоянно бессточной площади и потери на инфильтрацию и испарение; $P = \frac{P_0}{\eta}$ – параметр потерь на инфильтрационно-емкостное задержание.

Как показано в [2], коэффициент a может приниматься постоянным из года в год, а параметр потерь $P = \frac{P_0}{\eta}$ определяется по эмпирическим зависимостям от косвенных характеристик предшествующего (осеннего) увлажнения и промерзания бассейна, т.е. величина P изменяется от года к году. В работе [2. С. 10] P определяется по следующей эмпирической зависимости:

$$P = d - c \lg(m - m_{min} + 1), \quad (7)$$

где m – комплексный показатель увлажнения и промерзания бассейна; m_{min} – минимальная его величина за период наблюдений; d и c – эмпирические константы.

Формулы (6) и (7) – основа рассматриваемого первого подхода с переменным параметром инфильтрационно-емкостного задержания P .

Подход 2 состоит в том, что используется постоянное распределение поверхностного задержания, отвечающее случаю *наиболее низкого* предшествующего увлажнения бассейна, когда его водоудерживающая емкость принимает максимальное значение (P_{max}). Изменение предшествующего увлажнения за счет выпадения летне-осенних дождей и миграции влаги в зимний период к фронту промерзания учитывается некоторым слоем воды U , который в [2] назван слоем начального заполнения водоудерживающей емкости. Перед началом снеготаяния этот слой находится в замерзшем состоянии. Он участвует в формировании весеннего стока по мере оттаивания почв и грунтов после схода снега на тех участках бассейна, в пределах которых слой воды U превышает емкостное задержание.

При таком подходе параметр потерь $P = \frac{P_{max}}{\eta}$

задается постоянным (соответствует наиболее низкому увлажнению бассейна), а слой начального заполнения почвенно-грунтовой емкости U изменяется по годам в зависимости от показателей предшествующего увлажнения и промерзания. Формула для параметра η имеет вид $\eta = 1 - \frac{J+Z}{X+U}$. Как и ранее, считаем, что $(J+Z)$

возрастает с увеличением поступления воды $(X+U)$, т.е. допускаем $\eta \approx const$. Рассмотренной схеме отвечают уравнения, учитывающие почвенную мерзлоту через слой начального заполнения водоудерживающей емкости:

$$Y = a \left[(X+U) - P f \left(\frac{(X+U)}{P} \right) \right], \quad (8)$$

$$P = \frac{P_{max}}{\eta} = const, \quad (9)$$

$$U = d - c \lg(m - m_{min} + 1). \quad (10)$$

Комплексный анализ факторов стока весеннего половодья выполнен на примере небольших бассейнов: р. Большая Уря – п. Малая Уря ($F = 1150 \text{ км}^2$), р. Кача – п. Емельяново ($F = 561 \text{ км}^2$) и р. Кача – г. Красноярск ($F = 1250 \text{ км}^2$). Рассматриваемые реки характеризуются ярко выраженным весенним половодьем, продолжительность которого в среднем около 60 дней. Половодье наступает в середине апреля.

Река Кача берет свое начало на северном склоне Бирюсинского кряжа на высоте 550 м над уровнем моря. Она впадает в р. Енисей с левого берега в центральной части г. Красноярска. Общее падение реки составляет 415 м. Условия формирования стока в верхней (таежной) и нижней (лесостепной и степной) частях бассейна существенно различаются. Верхняя часть (до п. Емельяново) относится к зоне избыточного увлажнения, средняя и нижняя (п. Емельяново – г. Красноярск) – к зонам неустойчивого и недостаточного увлажнения. В результате половодье в нижнем течении Качи имеет две волны – «степную» во второй половине апреля и «таежную» в мае, на которые могут накладываться волны от выпадения весенних дождей.

Бассейн р. Большая Уря, впадающей в р. Кан (правобережный приток Енисея), расположен на территории Канско-Рыбинской котловины. Высота его изменя-

ется от 200 до 600 м. Район бассейна засушливый, малоснежный, преобладает степной ландшафт, лесистость всего около 24%. Половодье формируется в виде одной волны.

Поступление воды ($X = S + x$) вносит основной вклад в корреляционную зависимость стока талых вод (Y) от прогностических факторов. Так, для рр. Большая Уря – с. Малая Уря, Кача – п. Емельяново и Кача – г. Красноярск теснота связи между X и Y характеризуется коэффициентами парной корреляции соответственно 0,64; 0,72 и 0,81.

В условиях, когда информация о глубине промерзания, температуре и влажности почвы ограничена и не всегда достаточно надежна, что особенно справедливо для азиатской территории России, весьма важное место в практике прогнозов занимают косвенные характеристики (предикторы) водопоглотительной способности бассейнов. Подбор предикторов, характеризующих влияние предшествующего увлажнения и промерзания почв, выполнен следующими способами:

1) на основе парной корреляции стока талых вод (Y) с различными характеристиками увлажнения и промерзания (m);

2) путем расчета коэффициентов множественной корреляции и других показателей тесноты уравнений вида $Y = a_1 X + a_2 m + b$, где a_1, a_2 – коэффициенты регрессии, b – свободный член;

3) методом оптимизации параметров уравнений для стока талых вод (6–8) и (10), в которых характеристики P и U выражаются с помощью представленных выше эмпирических зависимостей от показателей увлажнения и промерзания бассейна с оценкой критериев качества полученных уравнений.

Поиск различных комбинаций позволил обосновать следующий обобщенный показатель условий увлажнения заморозания почв в период установления зимы:

$$A_0 = \sqrt{K \frac{Q_{9+10}}{Q_{9+10}} \frac{K_{10-T}}{K_{h+100}}}, \quad (11)$$

где $K_{Q_{9+10}} = \frac{Q_{9+10}}{Q_{9+10}}$, $K_{10-T} = \frac{10-T}{10-T}$, $K_{h+100} = \frac{h+100}{h+100}$ –

соответствующие модульные коэффициенты (черта сверху обозначает среднее многолетнее значение); $K_{Q_{9+10}}$ – модульный коэффициент суммы сред-

немесячных расходов воды за сентябрь и октябрь; T – средняя месячная температура воздуха в ноябре для лесостепных и степных, и в октябре – для горно-лесных бассейнов; h – высота снега за третью декаду ноября для лесостепных и степных, и за третью декаду октября – для горно-лесных бассейнов. В формуле (11) модульный коэффициент осеннего стока характеризует предзимнее увлажнение водосбора. Температура воздуха и высота снежного покрова в начале зимы отражают условия промерзания почвы и, по-видимому, интенсивность миграции влаги к фронту промерзания.

Возможность использования показателя A_0 совместно другими характеристиками предшествующего состояния речного бассейна вытекает из анализа уравнений, включающих три и более переменных. Например, для р. Большая Уря наибольшим коэффициентом

множественной корреляции и достаточно высокими значениями t -статистик характеризуется уравнение $Y = a_1X + a_2A_0 + a_3\Delta H + b$ (табл. 1), которое включает, кроме A_0 , также показатель $\Delta H = H_n - H_{\min}$ (H_n – уровень воды на момент начала ледостава, H_{\min} – минимальный зимний уровень воды). В этом случае косвен-

ная характеристика потерь талого стока (m) представляется в виде линейной комбинации $m = A_0 + \frac{a_3}{a_2} \Delta H$. Аналогично представляются линейные комбинации (m) для рек бассейна Качи (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Уравнения для расчета комплексных характеристик потерь талых вод

Река – пункт	Комплексные характеристики потерь стока талых вод (m)	
Большая Уря – с. Малая Уря	$A_0 = \sqrt{K_{Q_{9+10}} \left(\frac{K_{10} - T_{11}}{K_{h_{30,11}} + 100} \right)}$	$A_0 + 0,04\Delta H$, где $\Delta H = H_n - H_{\min}$
Кача – с. Емельяново	$A_0 = \sqrt{K_{Q_{9+10}} \left(\frac{K_{10} - T_{10}}{K_{h_{30,10}} + 100} \right)}$	$A_0 - 0,20 T_{n,0,2}$
Кача – г. Красноярск	$A_0 = \sqrt{K_{Q_{9+10}} \left(\frac{K_{10} - T_{11}}{K_{h_{30,11}} + 100} \right)}$	$A_0 + 0,02 H_{31,03}$

Оптимизация параметров d , c и n выполнена методом Розенброка, параметра a – методом наименьших квадратов [2. С. 11].

Результаты оптимизации и оценки критерия качества показали (табл. 2), что уравнения (8) и (10), учитывающие слой начального увлажнения (подход 2), лучше соответствуют данным наблюдений, чем уравнения с применением подхода 1.

Модели процессов формирования стока используются для расчетов (прогнозов) гидрографа весеннего половодья. Процессы стокообразования описываются с помощью созданных гидрологией понятий в укрупненном виде. Нами применяется концептуальная модель, основанная на параметрическом описании основных процессов формирования стока [5], структура которой показана на рис. 1. Для оптимизации блоков снегона-

копления и снеготаяния используется космическая информация о динамике площади одновременного снеготаяния [6].

Программное обеспечение, разработанное на основе рассмотренной выше гидролого-математической модели, позволяет путём численных экспериментов моделировать величины речного стока и ежедневных уровней воды. Известные к моменту выпуска прогноза максимальные запасы воды в снежном покрове, характеристики предшествующего увлажнения бассейна, ежедневные температуры воздуха и суточные осадки определяются по фактическим данным наблюдений. За период заблаговременности гидрологического прогноза суточный ход метеорологических элементов задается по краткосрочному и среднесрочному прогнозам погоды.

Т а б л и ц а 2

Рекомендуемые зависимости для прогноза стока талых вод

Вид уравнения	m	Параметры				σ_0/σ
		d	c	a	n	
$H = S + x + U, P = 100 \text{ мм}$ $U = d - \text{clg}(m - m_{\min} + 1)$ $Y = a \left\{ H - P \left[1 + \left(\frac{H}{P} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \right\}$	р. Большая Уря – с. Малая Уря					
	$m = A_0 + 0,04(H_n - H_{\min})$, $A_0 = \sqrt{K_{Q_{9+10}} \left(\frac{K_{10} - T_{11}}{K_{h_{30,11}} + 100} \right)}$	5,00	197,7	0,608	3,99	0,576
	р. Кача – г. Красноярск					
	$m = A_0 + 0,02 H_{31,03}$	43,5	103,5	0,345	1,126	0,563
$Y = a \left[H - P \left(1 - e^{-\frac{H}{R_0}} \right) \right]$	$m = A_0 + 0,02 H_{31,03}$	60,9	100,0	0,346	–	0,562
$Y = a \left[H - P \left(1 - e^{-\frac{H}{R_0}} \right) \right]$	р. Кача – п. Емельяново					
	$m = A_0 - 0,20 T_{n,0,2}$	48,0	386,8	0,330	–	0,642



Рис. 1. Общая структура модели формирования стока

Разработанная прогностическая модель краткосрочного прогноза ежедневных уровней воды р. Качи у г. Красноярск нашла применение в отделе гидрологических прогнозов Красноярского гидрометцентра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М.: Гидрометеиздат, 1963. 295 с.
2. Бураков Д.А. О влиянии испарения на сток весеннего половодья в лесной зоне // Метеорология и гидрология. 1968. № 12. С. 55–61.
3. Бураков Д.А. Основы гидрологических прогнозов объема и максимума весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. 1978. № 11. С. 3–49.
4. Мезенцев А.В., Мезенцева О.В. К методике прогноза весеннего стока // География и природные ресурсы. Новосибирск: Наука, 1984. № 4. С. 121–125.
5. Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология. 1996. № 10. С. 75–87.
6. Бураков Д.А. и др. Методика определения заснеженности речного бассейна по спутниковым данным для оперативных прогнозов стока // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 100–109.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 30 марта 2010 г.