

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЛЕЖЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РЕК В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИИ

Е. В. Власов, Т. А. Шмелева

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

В статье приводится упрощенная динамическая модель водотока с сосредоточенными параметрами, и рассматриваются возможности ее практического применения.

Водоток, русло, грунтовые воды, модель, предельно-допустимый сброс

INFORMATION TECHNOLOGIES OF TRACKING AND PREDICTION OF THE LEVEL OF HYDROLOGICAL MODES OF THE RIVERS IN THE TASKS OF ECOLOGY

E. V. Vlasov, T. A. Shmeleva

Earth Cryosphere Institute, 625000, Tyumen, 1230, Russia

A simplified dynamic model of the river with lumped parameters is described in this paper, and the possibilities of practical application of this model are considered.

Water-course, riverbed, ground waters, model, ultimate dumping

ВВЕДЕНИЕ

Существующие методики оценки уровня загрязнения рек и формирования предельно-допустимых сбросов в водотоки имеют один недостаток — они не учитывают динамику водности загрязняемых гидрологических объектов и взаимовлияние источников сбросов. В свою очередь учет взаимовлияния также невозможен без оценки параметров водности реки. Кроме задач формирования предельно-допустимых сбросов, моделирование параметров водности необходимо при проектировании и эксплуатации водохозяйственных сооружений, планировании водопотребления промышленных предприятий и территорий.

Проблема гидрологического анализа, поставленная в этой работе, не нова [Антонцев и др., 1986; Системный подход..., 1985; Чувствительность..., 1990; Кучмент, 1972]. Однако полная динамическая картина движения вод чрезвычайно сложна и задача определения гидрологических характеристик является трудоемкой, основанной на большом количестве исходных данных [Антонцев и др., 1986]. Реальные исходные данные зачастую бедны и представлены отрывочно. Для упрощения расчетов применяются модели, основанные на анализе статистических рядов наблюдений. В статье делается попытка создания упрощенной динамической

модели водотока, анализируются возможности применения модели для практических задач.

При разработке математической модели принята методика разбиения водотока на связанные участки (камеры) с осредненными параметрами состояния. Полная оценка распространения загрязняющих веществ невозможна без учета поверхностного стока и водообмена с грунтами. Поэтому в каждой камере рассматривается состояние трех областей — собственно русла, прилегающей области стока и грунтовых вод. Согласно классификации приведенной в [Кучмент, 1972], такая модель может быть определена как составная детерминистическая модель стока с сосредоточенными параметрами. Модель основана на уравнениях баланса с участием следующих потоков: $Q(i, t)$ — расход воды в i камере, $Q(i-1, t)$ — вода, поступающая из предыдущей $i-1$ камеры (рис. 1), $\sum_j Q(i, j, t)$ — вода, поступающая с притоками. Осадки и испарение из русла представлены потоком $Q_1^\uparrow(i, t)$. Рассматриваются также механизмы водообмена с грунтом ($Q_{31}(i, t)$ — грунтово-русовая инфильтрация, $Q_{23}(i, t)$ — поступление воды с поверхности в грунты, Q_3^\uparrow — испарение воды из грунтов) и поверхностного стока ($Q_{21}(i, t)$ —

поверхностный сток в русло, $Q_{1c}(i, t)$ — вода, поступающая в русло в результате снеготаяния, $Q_{1c}^{\uparrow}(i, t)$ — осадки/испарение снега над руслом, Q_2^{\downarrow} — осадки в прилегающую область водосбора, $Q_2^{\uparrow}(i, t)$ — испарение из прилегающей области (рис. 2). Значения объема воды в русле $V_1(i, t)$, в поверхностном слое $V_2(i, t)$, объема грунтовых вод $V_3(i, t)$ зависят от вышеназванных потоков.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОДОТОКА

Объем воды в русле моделируется уравнением:

$$\frac{dV_1(i, t)}{dt} = Q(i-1, t) - Q(i, t) + \sum_j Q(i, j, t) + Q_1^{\uparrow}(i, t) + Q_{31}(i, t) + Q_{21}(i, t) + Q_{1c}(i, t). \quad (1)$$

При этом объем может быть представлен следующим образом:

$$V_1(i, t) = w(i, h_1(i, t)) l(i),$$

где $w(i, h_1(i, t))$ — площадь поперечного сечения водного потока, $l(i)$ — длина камеры.

Расход воды в камере:

$$Q(i, t) = w(i, h_1(i, t)) v(i, h_1(i, t)),$$

где $v(i, h_1(i, t))$ — скорость воды в камере, согласно [Штеренлихт, 1984], можно предложить следующую модель:

$$v(i, h_1(i, t)) = C(i) \sqrt{J(i, h_1(i, t), h_1(i+1, t)) \frac{w(i, h_1(i, t))}{\chi(i, h_1(i, t))}}, \quad (2)$$

где $C(i)$ — коэффициент Шези, $\chi(i, h_1(i, t))$ — периметр смачивания, $J(i, h_1(i, t), h_1(i+1, t))$ — уклон (см. рис. 1):

$$J(i, h_1(i, t), h_1(i+1, t)) = \frac{h_1^-(i, t) + \frac{h_1(i, t) - h_1^-(i, t)}{2}}{(l(i) + l(i+1))/2} -$$

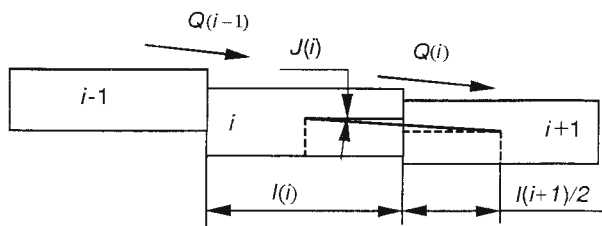


Рис. 1. Схема русла в продольном разрезе.

$$- \frac{\left(h_1^-(i+1, t) + \frac{h_1(i+1, t) - h_1^-(i+1, t)}{2} \right)}{(l(i) + l(i+1))/2}$$

где $h_1^-(i, t)$ и $h_1^-(i+1, t)$ — уровни дна соответственно i и $i+1$ камер, $h_1(i, t)$ и $h_1(i+1, t)$ — высота столба воды соответственно для i и $i+1$ камер. Такая схема построения уклона позволяет учитывать обратные течения, возможные при сильных подпорах в устье (для упрощения модели можно исключить зависимость уклона от уровней и полагать уклон постоянным). Для учета обратных течений в (2) знак $J(i, h_1(i, t), h_1(i+1, t))$ должен быть вынесен за корень.

Осадки/испарение из русла можно описать формулой

$$Q_1^{\uparrow}(i, t) = (e^{\downarrow}(t) - e^{\uparrow}(t)) S_1(i) E_c(t),$$

где $e^{\downarrow}(t)$ — интенсивность осадков, $e^{\uparrow}(t)$ — интенсивность испарения, $S_1(i)$ — площадь водной поверхности, $E_c(t)$ — функция „зима—лето“, которая имеет значение 1 в летний период, 0 — в зимний (рис. 3). На рис. 2 t_+ — время начала таяния снега, t_- — время начала замерзания.

Грунтово-руслевая инфильтрация:

$$Q_{31}(i, t) = \mu(31) S_p(i, t) (h_3(i, t) - h_1(i, t)),$$

где $\mu(31)$ — интенсивность инфильтрации, $h_3(i, t)$ — приведенный уровень грунтовых вод, $S_p(i, t)$ — площадь соприкосновения, может быть представлена так:

$$S_p(i, t) = l(i) \max \{h_1(i, t), h_3(i, t)\}.$$

Вода, поступающая в русло в результате снеготаяния:

$$Q_{1c}(i, t) = \dot{E}_c(t)_+ \text{sat}(\alpha_v, V_{1c}(i, t_+), V_{1c}(i, t)),$$

где $V_{1c}(i, t)$ — объем воды в снежном покрове над руслом, $\alpha_v = V_{1c}(i, t_+)/\varepsilon v$, $V_{1c}(i, t_+)$ — объем „воды“, накопленный к моменту таяния.

Объем воды, образуемый из снежного покрова над руслом, моделируется следующим образом:

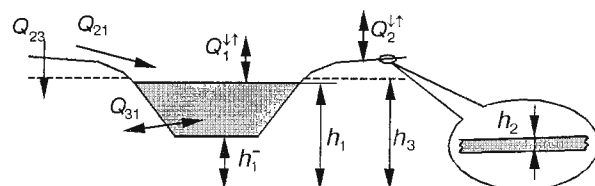


Рис. 2. Схема русла в поперечном разрезе.

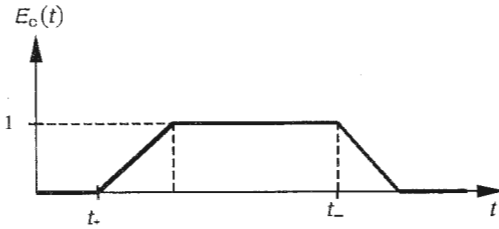


Рис. 3. График функции „зима—лето“.

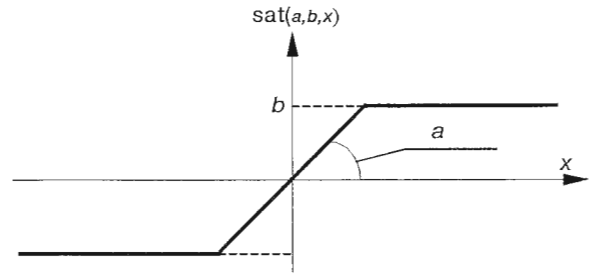


Рис. 4. График функции $\text{sat}(a, b, x)$.

$$\frac{dV_{1c}(i, t)}{dt} = Q_{1c}^{\downarrow}(i, t) - Q_{1c}(i, t). \quad (3)$$

Осадки/испарение снега над руслом:

$$Q_{1c}^{\downarrow}(i, t) = (e^{\downarrow}(t) - e^{\uparrow}(t)) S_1(i) (1 - E_c(t)).$$

Объем воды в прилегающей области водосбора моделируется уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{dV_2(i, t)}{dt} = & Q_2^{\downarrow}(i, t) - \\ & - Q_2^{\uparrow}(i, t) - Q_{21}(i, t) - Q_{23}(i, t). \end{aligned} \quad (4)$$

Объем может быть представлен в виде:

$$V_2(i, t) = S_2(i) h_2(i, t),$$

где $S_2(i)$ — площадь прилегающей области водосбора, $h_2(i, t)$ — условная высота водного покрова.

Осадки в прилегающую область:

$$Q_2^{\downarrow}(i, t) = S_2(i) e^{\downarrow}(t) v_2(i, t),$$

где $v_2(i, t)$ — функция поглощения воды растительным покровом.

Испарение из прилегающей области:

$$Q_2^{\uparrow}(i, t) = S_2(i) e^{\uparrow}(t) v_2(i, t) \text{sat}\left(1, 1, \frac{h_2(i, t)}{h_2^-(i)}\right),$$

где $h_2^-(i)$ — уровень, ниже которого интенсивность испарения меньше, чем с открытой водной поверхности (функция sat вводит зависимость интенсивности испарения от уровня, рис. 4).

Поступление воды с поверхности в грунты:

$$\begin{aligned} Q_{23}(i, t) = & (S_2(i) \mu(23) \times \\ & \times \text{sat}(1, h_2^-(i), h_2(i, t)) E_c(t) + \\ & + S_{22}(i) h_{1c}(i, t_+) \dot{E}_c(t)_+ \times \\ & \times \text{sat}(\alpha_3, 1, (h_3^+(i) - h_3(i, t))_+), \end{aligned}$$

где $\mu(23)$ — интенсивность просачивания с поверхности в грунт, S_{22} — условная часть поверхности, с которой вода от таяния снега поступает в грунт, $h_3^+(i)$ — уровень грунтового „резервуара“, выше которого впитывание влаги не происходит (функция sat вводит зависимость интенсивности просачивания от уровня),

$$h_{1c}(i, t_+) = V_{1c}(i, t_+)/S_1(i).$$

Поверхностный сток в русло:

$$\begin{aligned} Q_{21}(i, t) = & S_2(i) \mu(21) \text{sat}(1, h_2^-(i), h_2(i, t)) E_c(t) + \\ & + h_{1c}(i, t) \dot{E}_c(t)_+ (S_2(i) - \\ & - S_{22}(i) \text{sat}(\alpha_3, 1, (h_3^+(i) - h_3(i, t))_+)), \end{aligned}$$

где $\mu(21)$ — интенсивность стока.

Объем грунтовых вод моделируется уравнением:

$$\frac{dV_3(i, t)}{dt} = Q_{23}(i, t) - Q_{31}(i, t) - Q_3^{\uparrow}(i, t). \quad (5)$$

Объем грунтовых вод можно представить следующим образом:

$$V_3(i, t) = \bar{w}(i) S_3(i) h_3(i, t),$$

где $S_3(i)$ — площадь, $\bar{w}(i)$ — пористость грунтов:

$$\bar{w}(i) = V_{03}(i)/V_3(i),$$

где $V_{03}(i)$ — объем пустот в объеме $V_3(i, t)$.

Испарение воды из грунтов:

$$\begin{aligned} Q_3^{\uparrow}(i, t) = & e^{\uparrow}(t) v(i, t) S_3(i) \frac{h_3(i, t)}{h_3^+(i)} (h_2^-(i) - \\ & - h_2(i, t))_+/h_2^-(i). \end{aligned}$$

Уравнения (1), (3)—(5) составляют систему из 4 уравнений, описывающих гидрологический баланс одной камеры. Общее количество уравнений в модели — $4 \cdot n$, где n — количество камер. Для решения системы уравнений предлагается вычислительная модель.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ

Приведенная выше модель водотока, в отличие от более полных трехмерных моделей русловой гидродинамики [Антонцев и др., 1986; Калинин, 1997], существенно проще и ориентирована на практическое применение. Возможны следующие виды применения модели:

1. В случае, когда известны лишь некоторые параметры состояния водного объекта (например, состояние только в некоторых створах),

математическая модель водотока может применяться в качестве наблюдателя состояния водности объекта. Модель позволяет оценить полный комплекс параметров водности на всем протяжении реки. При этом разница между измеренными и смоделированными параметрами используется для коррекции значения входных параметров или ошибки моделирования.

2. Модель может использоваться для прогноза водности при формировании предельно-допустимых сбросов. Еще одно назначение прогноза — оценка уровней в мало- или многоводные годы (что немаловажно для засушливых или подтопляемых районов).

Измеренные параметры состояния водности (ряды наблюдений) могут использоваться также для коррекции вектора параметров модели.

С точки зрения этапов построения и эксплуатации данные делятся на следующие группы:

Данные, задаваемые на этапе проектирования программы. На этом этапе определяются данные о возможных интервалах изменения параметров, наиболее типовые значения графиков и параметров, которые могут использоваться при недостаточном количестве исходных данных о моделируемом водном объекте. Кроме того, в эту группу можно включить задание способа построения русла реки (или определение типового русла и способа его масштабирования).

Данные, определяемые в процессе задания модели. В этой группе определяются длины камер $l(i)$. Разбиение реки на камеры производится перед заданием всех остальных параметров. Далее на этом этапе задаются данные по руслу реки: $h_1^-(i)$ — уровень дна, $S_1(i)$ — средняя площадь зеркала воды камеры, $w(i, h_1)$ — график зависимости сечения створа от уровня, $\chi(i, h_1)$ — график зависимости смачиваемого периметра от уровня, и некоторые другие исходные данные модели: $S_2(i)$ — площадь прилегающей поверхности водосбора для камеры, $s_3(i)$ — площадь грунтового резервуара для камеры, $\bar{w}(i)$ — пористость грунтов.

На этом этапе задаются также параметры, не участвующие в организации эксперимента.

Данные, определяющие параметры моделирования: t_n — начальное время, t_k — конечное время, δt — шаг моделирования.

Данные, определяемые в процессе идентификации модели. Здесь доопределяются параметры модели, не заданные на предыдущем этапе. К такой группе данных относятся коэффициенты Шези $C(i)$, интенсивность просачивания с поверхности в грунт $\mu(23)$, интенсивность стока $\mu(21)$, интенсивность передачи из

грунта в русло $\mu(31)$, а также настроечные коэффициенты уровней ϵv , $h_2^-(i)$, $h_3^+(i)$.

Данные, изменяемые в ходе эксперимента. Если модель используется в режиме наблюдателя, на этом этапе входными данными являются данные измерений. Если модель используется для прогноза, на этом этапе задаются метеорологические данные: $Q(0, t)$ — график входного потока от времени, $h(n+1, t)$ — график уровня водоприемника от времени, $E_c(t)$ — функция „лето—зима“, $e^{\downarrow}(t)$ — интенсивность осадков, $\theta(t)$ — температурный режим, $v(t)$ — ветровой режим, $e^{\uparrow}(t, \theta(t), v(t))$ — интенсивность испарения, $v_2(i, t)$ — график поглощения воды растительным покровом от времени.

Результатом моделирования являются следующие графики: $h_1(i, t)$ — график уровня воды в камере, $h_2(i, t)$ — график уровня поверхностных вод, приуроченных к камере, $h_3(i, t)$ — график уровня грунтовых вод, приуроченных к камере, $h_{1c}(i, t)$ — график уровня снежного покрова над камерой, $v(i, t)$ — график скорости воды в камере, $Q(i, t)$ — график расхода в камере, $V(i, t)$ — график объема воды в камере.

Разработаны программные средства, реализующие описанную модель. В настоящее время обрабатывается технология идентификации параметров модели на основе данных постов измерений для участка р. Тура от с. Туринская Слобода до устья. Производится адаптация модели для задач экологического нормирования.

Литература

- Антонцев С. Н., Епихов Г. Н., Кашеваров А. А. Системное математическое моделирование процессов водообмена. Новосибирск, Наука, 1986, 216 с.
- Калинин В. М. Гидрологические основы рациональной водохозяйственной деятельности и охраны вод в пределах малых заболоченных водосборов. Екатеринбург, 1997.
- Кучмент Л. С. Математическое моделирование речного стока. Ленинград, 1972, 192 с.
- Системный подход к управлению водными ресурсами / Под ред. А. Бисваса. Пер. с англ. под ред. Н. Н. Моисеева. М., Наука, 1985, 392 с.
- Чувствительность гидрологических систем (Влияние антропогенных изменений речных бассейнов и климата на гидрологический цикл) / Кучмент Л. С., Мотовилов Ю. Г., Назаров Н. А. М., Наука, 1990, 144 с.
- Штеренлихт Д. В. Гидравлика. М., Энергоатомиздат, 1984, 640 с.

Поступила в редакцию
6 февраля 1998 г.