Компьютерная математика

Информационные технологии в экологии

Рассматривается проблема создания имитационных систем моделирования состояний водных объектов на примере одной из подсистем.

© А.А. Каленчук-Порханова, Н.В. Басок, 2015

УДК 681.3:574.5

А.А. КАЛЕНЧУК-ПОРХАНОВА, Н.В. БАСОК

ПОДСИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ВОДОТОКАХ

Введение. В Институте кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины на протяжении многих лет проводятся работы по созданию имитационных систем моделирования состояний природных объектов в условиях техногенных нагрузок. Эти работы, прежде всего, направлены на разработку проблемно-ориентированных комплексов моделирования для получения комплексной оценки экологического состояния конкретных экообъектов.

Примером такой системы является впервые разработанная в Институте кибернетики имени В.М. Глушкова Система имитационного моделирования водных объектов (СИМВО).

Назначение данной системы – это реализация нового гидроэкологического направления работ по комплексному исследованию состояний водных объектов в зависимости от сценариев развития антропогенного влияния и интенсивности использования водных ресурсов. Получение комплексной оценки состояний того или иного экообъекта требует системного подхода и разработки новых методов математического и имитационного моделирования с использованием аппаратно-программных комплексов автоматизации этих исследований [1, 2].

В состав базового информационного ресурса СИМВО входят проблемно-ориентированные подсистемы моделирования динамики процессов в водоемах, водотоках и подземных водоносных горизонтах, а также подсистема интеллектуализированного способа обработки, сжатия и восстановления с гарантированной точностью массивов числовых данных с использованием аппарата наилучшей

чебышевской аппроксимации [3]. В рамках данных подсистем реализованы, соответственно, такие математические модели:

1) двумерная модель стационарных стоково-ветровых течений в водотоках «мелкой» воды на отдельных глубинных горизонтах;

2) модель переноса загрязнений в водотоках;

3) математическая модель расчета изменений кислородного режима водотоков;

4) двумерная модель процессов в подземных водоносных горизонтах.

Описание подсистемы WODA. В статье приводится описание одной из проблемно-ориентированных подсистем, а именно, подсистемы WODA, в состав которой входит модель п. 3.

Управление качеством воды проводится на основе анализа колебаний концентрации растворенного в воде кислорода (РК), которые зависят как от потребления кислорода (БПК), так и от его выработки в результате различных внутриводоемных процессов и в толще воды, и в наносах. Так, например, биологическое потребление кислорода (БПК) происходит при гниении на участках водотока учитывая заиливание и бактериальное разложение, а выработка кислорода является результатом таких процессов, как фотосинтез, естественная и искусственная аэрации.

Для проведения указанного анализа используется модификация модели Доббинса расчета параметров оценки состояния кислородного режима водотоков и моделирования значений концентраций БПК и РК в точках измерений [4].

Если входные данные измерений БПК и/или РК на участке водотока получены в четко определенных гидробиологических и температурных условиях, то можно определить четыре параметра этой модели, а именно, скоростей поглощения кислорода в результате как гниения, так и бактериального разложения, а также выработки кислорода как в результате аэрации, так и в процессе фотосинтеза.

Однако, учитывая, что на перечисленные параметры существенно влияют гидрологические и термальные состояния водотока, связанные с различными условиями такими, как зима, лето, минимальный и максимальный сток, – следует также учитывать зависимости перечисленных «скоростей» от температуры и от модуля стока. Следовательно, в случаях получения исходных данных в разнообразных гидрологических и термальных условиях, следует оценивать девять параметров модели.

Таким образом, в прикладное программное обеспечение подсистемы WODA кроме программ предварительной обработки входных данных с использованием аппроксимации и модифицированной модели Доббинса входят также такие программы:

– программа EST расчета оптимальных значений параметров модели Доббинса для случаев соответственно четырех параметров – при одной серии данных, или девяти параметров – при нескольких сериях данных;

– программа SIM расчета БПК- и РК-концентраций в любой заданной точке участка водотока при любых гидрологических, температурных условиях и в условиях любых наносов.

Перегруппировка входных данных для представления их в нужной форме производится программой INDAT.

Перечисленные программы выполняются в такой последовательности: после сбора определенного количества разновременных серий данных для расчета приведенных выше «скоростей» и их зависимостей от температуры и модуля стока выполняются сначала программы INDAT и EST, а затем для расчета соответствующих концентраций выполняются программы INDAT и SIM [5].

Следует заметить, что модель Доббинса используется с учетом выполнения таких условных ограничений:

– стационарное состояние гидрологических условий (1);
– одномерное представление (2);
– отсутствие продольной дисперсии (3);
– стационарные бентические условия (4);
– стационарная токсическая нагрузка (5);
– аэробные условия (6).

Обоснованиями допустимости принятых ограничений при широко распространенных реальных расчетах качества воды являются такие:

– условие (1) выполняется, так как прогноз и контроль качества воды в водотоках особенно важен, как правило, в период высокой температуры, поскольку в данном случае сильно снижается и разбавление, и реаэрация и, следовательно, гидрологические переменные почти постоянны;

– применение одномерной модели (2) оправдано при определении качества воды для больших расстояний водотоков, так как в таких случаях используется значение средней величины сечения потока;

– условие (3), как правило, выполняется, так как в верхней и средней частях русла водотока практически всегда выполняются неравенства $V^2 >> 200K_bD$, $V^2 >> 200K_rD$, где V – средняя скорость в сечении (км/ч), K_b – скорость гниения по БПК, K_r – скорость реаэрации, D – коэффициент продольной дисперсии (км^2/ч), при которых влиянием продольной дисперсии на концентрации БПК и растворенного кислорода можно пренебречь;

– в верхней части русла, где вода течет быстро, бентическими составляющими можно пренебречь и учитывать их влияние следует только в средней части русла. При этом влияние бентических составляющих можно считать стационарным (4), в силу того, что продолжительность их биоцикла намного меньше скорости разложения загрязнителей;

– модель Доббинса неприменима к нестационарным токсическим нагрузкам (5), так как она не описывает динамику роста бактерий;

– что касается (6), то модель Доббинса учитывает биохимические процессы только в аэробных условиях (для конкретной группы бактерий), поэтому для моделирования процессов в анаэробных условиях (для различных групп бактерий), необходимо создание комплексной экологической модели моделирования процессов самоочистки при переходе от аэробных к анаэробным условиям.

Принятые условные ограничения не существенно уменьшают сферу применения подсистемы WODA, так как фактически при этом нельзя моделировать только приливно-отливные эстуарии, зарегулированные или слишком медленные водотоки, похожие на реки коллекторы сточных вод, которые встречаются сравнительно редко. Во всех остальных случаях надежность модели и в целом подсистемы WODA обеспечивается приемами оптимизации используемого прикладного и системного обеспечения [6]. Кроме этого, использование в подсистеме WODA для обработки экспериментальных числовых данных способа наилучшей чебышевской аппроксимации обеспечивает получение результатов с высокой гарантированной точностью [7].

Далее приводится математическое описание вычислительной реализации подсистемы WODA.

Краткое описание алгоритмов. За основу расчета состояния кислородного режима водотока при исключении влияния продольной дисперсии применяется одномерное уравнение массбаланса для некоторой компоненты вида

$$\frac{d(Ac)}{dt} + \frac{d(vAc)}{dl} = AS, \tag{1}$$

где t – время, l – расстояние от точки в верхнем бьефе по оси реки, $c = c(t,l)$ – концентрация компоненты; $A=A(t, l)$ – площадь сечения, $v = v(t, l)$ – средняя скорость сечения; $S = S(t, l, c, p)$ – чистый средний по течению источник компоненты, который обычно зависит от концентрации p остальных взаимодействующих компонент.

Уравнение (1) можно переписать в форме

$$\frac{dC}{dt} + V\frac{dC}{dl} = -\frac{S_q}{A}C + S\,, \tag{2}$$

где

$$S_q = \frac{dA}{dt} + \frac{d(vA)}{dl} \tag{3}$$

– скорость приточности, которая усиливает разбавление компонент, т. е. $S_q C / A$.

В случае, если приток содержит ту же компоненту в концентрации C_i, то в компоненту источника S надо включить скорость массприточности $S_q C_i$. Следовательно, чистый разброс компоненты выражается $S_q(C_i - C)/A$.

Это формальное описание процесса справедливо и для случая водозабора, когда S_q – отрицательная величина.

Если в общем одномерном уравнении баланса (1) в стационарных гидрологических условиях концентрация C отождествляется с удельным весом воды P (константа в пространстве и времени), то получаем уравнение

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dq}{dl} = S_q, \tag{4}$$

где $q = vA$ – модуль речного стока. В стационарных гидрологических условиях при учете ограничения (1) уравнение (4) приобретает вид

$$\frac{dq}{dl} = S_q \tag{5}$$

для случая, когда отклонение модуля стока может обуславливаться только притоком или оттоком.

В подсистеме WODA используется уравнение (5), где l выражается в км, а q – в м^3/с и исходный член $S_q = S_q(l)$ состоит из концентрированной и распределенной (частная константа) приточности.

Учитывая, что в стационарных гидрологических условиях за среднюю скорость сечения можно принять модуль стока с помощью выпуклой функции, что выражается уравнением

$$V = aq^b, \tag{6}$$

где $V = V(l)$ измеряется в км/ч, $q = q(l)$ – в м^3/с, $a = a(l)$ и $b = b(l)$ – частные постоянные функции, которые оцениваются как параметры по измеряемым данным $a^i, b^i, i = 1, \ldots, n$ программой INDAT.

В подсистеме WODA принимается, что температура $T(^{\circ}c)$ – экспериментально данная постоянная функция на расстоянии l от точки в верхнем бьефе, т. е. $T = T(l)$.

С учетом принятых шести ограничений, изменение БПК в пространстве и времени описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{db}{dt} + V\frac{db}{dl} = -\frac{S_q}{A}b - K_b b + \frac{B}{A}, \tag{7}$$

где $b = b(t, l)$ – концентрация БПК в (г/м^3), $K_b = K_b(l, T)$ – скорость разложения БПК в ($ч^{-1}$), $B = B(t, l)$ – ввод БПК (г/с км). При этом полагается, что скорость разложения БПК $K_b(l, T)$ равна сумме двух членов

$$K_b(l, T) = K_{11}(l)\,Q_1 + K_{12}(l), \tag{8}$$

где $K_{11}(l)$, $K_{12}(l)$ – изменяющиеся во времени функции, Q_1 – константа.

Оба члена зависят от l. Первый член в (8) обозначает скорость потребления БПК в связи с бактериальным окислением и называется скоростью деоксигенации и выражает скорость потребления растворенного кислорода. Второй член обозначает скорость отложения наносов и учитывает такие факторы, как отложение и размыв донных наносов и флокуляция.

Следует отметить, что вычислительной основой алгоритмов являются дифференциальные уравнения в частных производных, которые описывают динамику концентраций БПК и растворенного кислорода в условиях устоявшейся и неустоявшейся нагрузки.

Для решения таких уравнений используется, как правило, метод характеристик.

В статье не приводится полное описание алгоритмов реализации в целом подсистемы WODA.

Заключение. Основными преимуществами подсистемы WODA являются наличие программ автоматизации расчета зависимостей качества воды от температуры и модуля стока, что обеспечивает высокую скорость получения оценок изменения кислородного режима водотоков; а также наличие программ предварительной обработки данных без потери точности и обеспечивающих значительную экономию времени на организацию входных файлов.

Несмотря на то, что модель Доббинса в составе подсистемы WODA имеет ряд ограничений, например, не учитываются роли азота, фосфора и явлений диффузии в биохимических процессах, продольной дисперсии и предполагаются стационарными токсические нагрузки и аэробные условия в водотоке, – она имеет широкую сферу применения и является достаточно надежной ввиду того, что содержит малое число эмпирических параметров по сравнению с более сложными экологическими моделями.

Сферой применения подсистемы WODA является оценка качества воды в водотоках в зависимости от техногенного влияния, связанного, прежде всего, с результатами развития промышленности (расположение предприятий, вид продукции, технология, использование водохранилищ и т. д.).

Расчеты по проблемно-ориентированным подсистемам в составе СИМВО проводились для Киевского моря, морей Днепровского каскада, водоема-охладителя Криворожской ГРЭС, водохранилищ и лиманов Северо-Западного Причерноморья. В том числе расчеты по подсистеме WODA проводились по моделированию трансформации хлоридов в условиях установившегося движения реки Ингулец (правого притока реки Днепр) на участке от водосбросного сооружения Карачуновского водохранилища до водпоста у села Могилевка. Этот участок включает в себя пять различных створов, по каждому из которых получались необходимые для расчетов данные. Полученные впервые результаты расчетов в виде информационных массивов, карт и схем передавались в различные организации, в том числе в Институт гидробиологии НАН Украины. Достоверность результатов подтверждалась верификацией натурными наблюдениями.

В последующих публикациях планируется описание других проблемно-ориентированных подсистем в составе СИМВО и Системы в целом.

А.О. Каленчук-Порханова, Н.В. Басок

ПІДСИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН КИСНЕВОГО РЕЖИМУ У ВОДОТОКАХ

Розглядається проблема створення імітаційних систем моделювання стану водних об’єктів на прикладі однієї із підсистем.

A. Kalenchuk-Porkhanova, N. Basok

A SUBSYSTEM FOR MODELING THE CHANGES OF OXYGEN REGIME IN WATER CURRENTS

The creation of simulation models of the state of water objects is discussed on the example of a modeling subsystem.

1. *Каленчук-Порханова А.О.* Система моделювання стану водних об'єктів Північно-Західного Причорномор'я // Збірник доповідей II-го з'їзду гідробіологічного товариства України. Том 2. – К.; 1997. – С. 207 – 208.
2. *Лаврик В.И., Каленчук-Порханова А.А.* Имитационная система моделирования экологического состояния устьев рек, лиманов и озер северо-западного Причерноморья // Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря: Сборник трудов научной конференции. – Севастополь, 1997. – С. 88 – 89.
3. *Каленчук-Порханова А.А., Вакал Л.П.* Об одном способе преобразования экологической информации // Технические и программные средства систем экологического мониторинга. – Киев: Ин-т кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины. – 1994. – С. 76 – 80.
4. *Лаврик В.И.* Возможности и перспективы математического моделирования водных систем // Збірник доповідей II-го з'їзду гідробіологічного товариства України. Том 2. – К.; 1997. – С. 210 – 211.
5. *Хільченко В.Й.* Інформаційне забезпечення в проблемно-орієнтованих комплексах контролю (ПОКК) за станом екооб'єктів // Технические и системные средства экологического мониторинга. – Киев: Ин-т кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины. – 1998. – С. 29 – 35.
6. *Басок Н.В., Хибина М.А., Хільченко В.Й. та ін.* Система моделювання стану водних об'єктів // Там же. – Киев: Ин-т кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины. – 1998. – С. 46 – 51.
7. *Каленчук-Порханова А.А.* Аппарат аппроксимации для анализа и синтеза сложных систем // Пр. Міжнар. конф. «50 років Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. – К.; 2008. – С. 354 – 361.

Получено 25.02.2015

Об авторах:

Каленчук-Порханова Анжелина Алексеевна,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,
E-mail: ioanna@public.icyb.kiev.ua

Басок Наталия Васильевна,
главный инженер-программист
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины.
E-mail: basok_nat@rambler.ru