

УДК 556.1; 519.876.5

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Поздеев А.Г., Кузнецова Ю.А., Ржепкин А.Ю.

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола,
e-mail: PozdeevAG@volgatech.net, KuznetsovaYA@volgatech.net, RzhepkinAY@volgatech.net

Основой оценки экологического состояния природных вод и планирования их использования является составление водобалансных моделей, в которые в качестве основных физических подсистем входят: подсистема, связанная с осадками и испарением влаги; подсистема динамики поверхностных вод; подсистема фильтрационного движения подземных вод. Линейный характер указанных подсистем позволил составить единую системную методику оценки состояния водных ресурсов на основе динамической балансовой модели Дж. Форрестера. На основе разработанной системной диаграммы водобалансной модели получена система уравнений уровней и темпов, которая предельным переходом переведена к аналитическому виду. С использованием уравнений системного комплекса построен имитационный комплекс в прикладной программной среде MathCAD. Программа позволяет прогнозировать изменение состояния основных подсистем. Начальные значения параметров модели следует вводить на основе данных натурных измерений.

Ключевые слова: модель водного баланса, системная диаграмма, балансовая модель, речной бассейн, системная модель, осадки, поверхностные воды, подземные воды

INFORMATION TECHNOLOGY MODEL OF RIVER-BASIN BALANCE

Pozdeev A.G., Kuznetsova Y.A., Rzhepkin A.Y.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola,
e-mail: PozdeevAG@volgatech.net, KuznetsovaYA@volgatech.net, RzhepkinAY@volgatech.net

Environmental assessment of natural waters and planning of their use are based on water-balance models, which include as main physical subsystems: subsystem associated with precipitation and moisture evaporation; subsystem of surface water dynamics; subsystem of groundwater filtration flow. The linear nature of these subsystems allowed to create a systematic technique of water resource state assessment based on the dynamic balance model of J. Forrester. Based on the developed system diagram of the water-balance model, a system of equations of levels and rates was obtained, which was converted to the analytical form through the passage to the limit. Using the equations of the system complex, an imitation complex was built in MathCAD application software environment. The program allows to predict the change in the state of the main subsystems. The initial values of the model parameters should be entered on the basis of field measurement data.

Keywords: water-balance model, system diagram, balance model, river basin, system model, precipitation, surface water, groundwater

Целью работы является выявление факторов, влияющих на формирование водного баланса, основных подсистем системного комплекса и их взаимосвязей и разработка на этой основе информационно-технологической модели, позволяющей произвести имитационное моделирование и получить характеристики водного баланса речного бассейна.

В работе решаются следующие задачи:

- разработка модели водного баланса речного бассейна и построение системной диаграммы в обозначениях Дж. Форрестера [5];
- формирование системы уравнений подсистем системного комплекса в аналитической форме;
- построение расчетного имитационного комплекса в прикладной программной среде MathCAD;
- проведение имитационного эксперимента.

Современная концепция оценки экологического состояния природных вод ос-

нована на составлении линейных водобалансных моделей [1-5], в которые явно или неявно входят основные физические подсистемы [4]:

- подсистема, связанная с осадками и испарением влаги;
- подсистема динамики поверхностных вод;
- подсистема фильтрационного движения грунтовых вод.

Линейный характер всех указанных подсистем позволяет составить единую системную методику оценки состояния водных ресурсов и планирования их использования на основе динамической балансовой модели Дж. Форрестера [5]. Форрестерская модель отражает инерционность реальных систем, которая ведет к задержке изменений в отдельном элементе, передаваемых другими элементами системы.

Контуры связи систем представляют собой функции запаздывания. Каналы потоков субстанций, протекающих в системе,

формируют некоторые уровни их накопления, которые регулируются темпами или функциями решения. Соединение уровней с функциями решения информационными

связями обеспечивает необходимое по условиям описания реального процесса единство между подсистемами, входящими в систему (рис. 1).



Рис. 1. Обозначения, принятые в модели Дж. Форрестера [5]

Имитационное моделирование

На основе балансовых динамических моделей Дж. Форрестера [5] построена си-

стемная модель водного баланса речного бассейна, включающая три основные физические подсистемы (рис. 2).

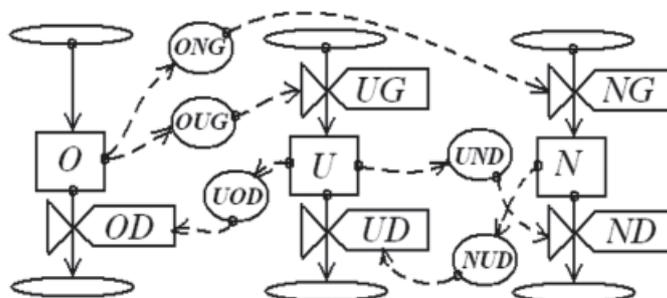


Рис. 2. Системная диаграмма водобалансной модели

Элементы системы обозначаются индивидуальными именами – идентификаторами. Для системы состояния водных ресурсов идентификаторы приведены в таблице (табл. 1). Величины, приведенные в таблице, являются условными. Прежде всего это относится к множителям влияния, которые требуют установления уравнений связи на основе данных наблюдений.

Системная диаграмма позволяет составить систему уравнений уровней и темпов, в которой с помощью расширений символами J , K , L обозначаются предыдущий, текущий и будущий моменты времени, и расширений символами JK и KL – периоды, предшествующий настоящему моменту времени K и следующий за ними.

Уравнения уровней принимают вид

$$O.L = O.K - DT \cdot OD.KL; \quad (1)$$

$$U.L = U.K + DT(UG.KL - UD.KL); \quad (2)$$

$$N.L = N.K + DT(NG.KL - ND.KL). \quad (3)$$

Уравнения темпов запишутся

$$OD.KL = UOD \cdot U.K; \quad (4)$$

$$UG.KL = OUG \cdot O.K; \quad (5)$$

$$UD.KL = NUD \cdot N.K; \quad (6)$$

$$NG.KL = ONG \cdot O.K; \quad (7)$$

$$ND.KL = UND \cdot U.K. \quad (8)$$

где DT – расчетный интервал времени.

Предельным переходом при $DT \rightarrow 0$ можно перевести уравнения темпов и уровней к аналитическому виду:

$$O' = -OD; \quad (9)$$

$$U' = UG - UD; \quad (10)$$

$$N' = NG - ND, \quad (11)$$

где штрихом обозначены производные по времени;

$$OD = UOD \cdot U; \quad (12)$$

$$UG = OUG \cdot O; \quad (13)$$

$$UD = NUD \cdot N; \quad (14)$$

$$NG = ONG \cdot O; \quad (15)$$

$$ND = UND \cdot U. \quad (16)$$

Обозначения элементов системы
состояния водных ресурсов

Номер элемента системы	Идентификатор элемента системы	Вербальное описание элемента системы	Размерность элемента системы	Численное значение величины элемента
1	O	Уровень осадков	м	0,005
2	OD	Темп уменьшения уровня осадков	м/сут	0
3	U	Уровень поверхностных вод	м	63
4	UG	Темп повышения уровня поверхностных вод	м/сут	0,001
5	UD	Темп понижения уровня поверхностных вод	м/сут	0
6	N	Уровень грунтовых вод	м	2,2
7	NG	Темп повышения уровня грунтовых вод	м/сут	0,001
8	ND	Темп понижения уровня грунтовых вод	м/сут	0,0005
9	OUG	Множитель влияния осадков на повышение уровня поверхностных вод	1/сут	1
10	UOD	Множитель влияния поверхностных вод на понижение уровня осадков	1/сут	0
11	ONG	Множитель влияния осадков на повышение уровня подземных вод	1/сут	10^{-3}
12	UND	Множитель влияния поверхностных вод на понижение уровня подземных вод	1/сут	10^{-6}
13	NUD	Множитель влияния подземных вод на понижение уровня поверхностных вод	1/сут	0

Ввод диапазона изменения параметров модели, сутки

$t := 0..10$

Динамика уровня поверхностных вод

```

U(t) :=
O ← 0.005
OD ← 0
U ← 63
UG ← 0.001
UD ← 0
N ← 2.2
NG ← 0.001
ND ← 0.0005
OUG ← 1
UOD ← 0
ONG ← 10-3
UND ← 10-6
NUD ← 0
for DT ∈ 0..t
    O ← O - DT · OD
    U ← U + DT · (UG - UD)
    N ← N + DT · (NG - ND)
    OD ← UOD · U
    UG ← OUG · O
    UD ← NUD · N
    NG ← ONG · O
    ND ← UND · U
U
    
```

Рис. 3. Фрагмент листинга имитационной модели, реализованной в среде MathCAD

Полученная система уравнений является автономной. Однозначность решения полученной системы обеспечивается начальными условиями в момент времени K , следующими из уравнений темпов. Система уравнений (9)–(16) образует в принятых допущениях систему линейных однородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Имитационный эксперимент

Разработанная модель водного баланса речного бассейна реализована в прикладной программной среде MathCAD. Построенный имитационный комплекс приведен в листинге программы (рис. 3).

Интерпретация результатов

Предложенная модель в целом отражает тенденцию повышения уровня поверхностных вод с течением времени при постоянном уровне осадков. Зависимость уровня грунтовых вод, напротив, имеет тенденцию к понижению. Последнее обстоятельство требует корректировки множителей влияния поверхностных вод на уровень грунтовых. В дальнейших исследованиях будет проанализирован вопрос об уточнении модели и повышении качества выводимого решения.

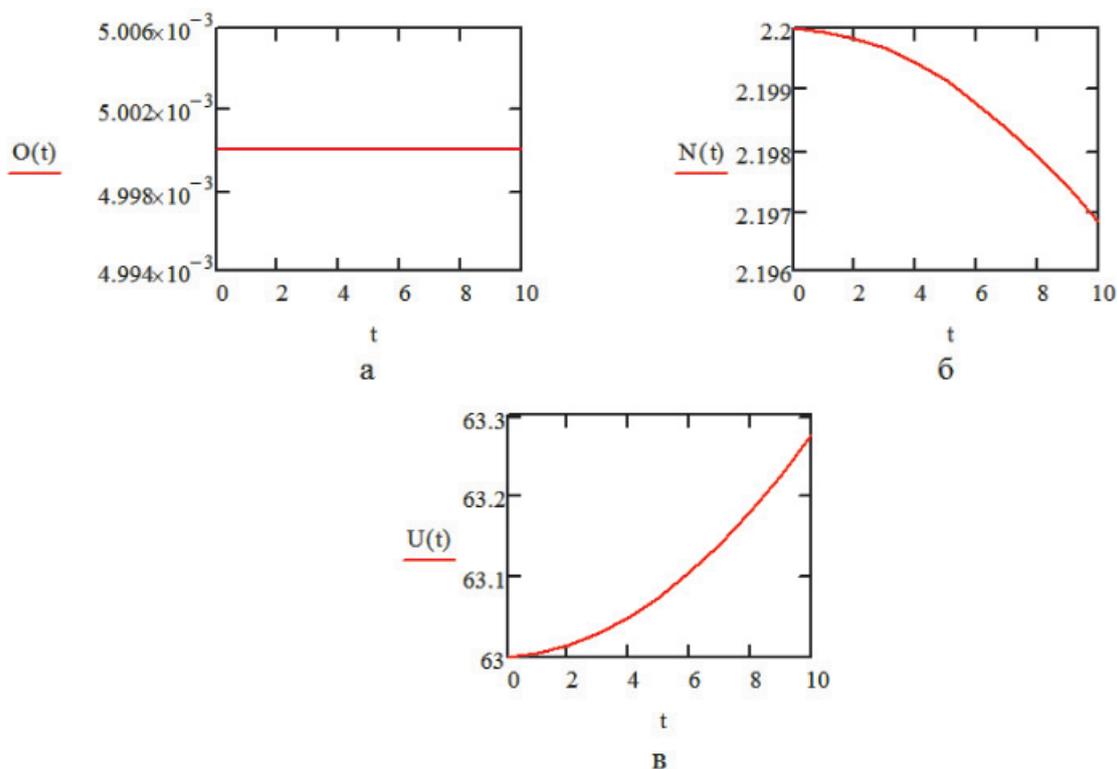


Рис. 4. Динамика основных подсистем системной модели:
 а – уровень осадков; б – уровень грунтовых вод; в – уровень поверхностных вод

Выводы

1. Системное моделирование с использованием балансового подхода Дж. Форрестера позволило получить модель водного баланса речного бассейна и составить ее математическое описание.

2. Путем имитационного моделирования в прикладной программной среде MathCad для условных начальных параметров построены динамические характеристики подсистем системной модели, которые могут быть уточнены для данных натурных измерений.

Список литературы

1. Кузнецова Ю.А. Моделирование струйного размыва донного грунта // Труды Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Технологическая. Вып. 2/ отв. и науч. ред. Д.В. Иванов. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – С. 306–310.
2. Кузнецова Ю.А. Средства инженерно-экологической защиты нижних бьефов гидроузлов: монография. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 260 с.
3. Поздеев А.Г. Обобщение модели экологии популяций Лотки-Вольтерры на основе принципов системной динамики / А.Г. Поздеев, В.П. Сапцин, Ю.А. Кузнецова // Вестник МарГТУ. Серия «Лес. Экология. Человек». – 2011. – № 2. – С. 94–101.
4. Поздеев А.Г. Системный эколого-экономический анализ состояния водных ресурсов: Научное издание / А.Г. Поздеев, Е.Ю. Разумов, Ю.А. Поздеева, Е.В. Моспанова, А.В. Башкиров. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – 71 с.

5. Форрестер, Дж. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978. – 167 с.

References

1. Kuznecova Yu.A. Modelirovanie strujnogo razmyva donnogo grunta. Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: Tehnologicheskaja. Joshkar-Ola: Povolzhskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2014, no. 2. pp. 306–310.
2. Kuznecova Yu.A. Sredstva inzhenerno-jekologicheskoy zashhity nizhnih b'efov gidrouzlov: monografija. Joshkar-Ola: Povolzhskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2014. 260 p.
3. Pozdeev A.G. Obobshhenie modeli jekologii populjaczij Lotki-Vol'terry na osnove principov sistemnoj dinamiki. Vestnik MarGTU. Serija «Les. Jekologija. Chelovek», 2011, no. 2, pp. 94–101.
4. Pozdeev A.G. Sistemnyj jekologo-jekonomicheskij analiz sostojanija vodnyh resursov: Na-uchnoe izdanie. A.G. Pozdeev, E.Ju. Razumov, Yu.A. Pozdeeva, E.V. Mospanova, A.V. Bashki-rov. Joshkar-Ola: MarGTU, 2002. 71 p.
5. Forrester Dzh. Mirovaja dinamika. M.: Nauka, 1978. 167 p.

Рецензенты:

Полянин И.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола;

Царев Е.М., д.т.н., профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленных производств, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.

Работа поступила в редакцию 30.10.2014.