

УДК 631.879.2:626.82

Ю. Е. Домашенко, М. В. Власов, С. М. Васильев, А. О. Матвиенко
Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Целью работы является эколого-экономическое обоснование использования сточных вод на оросительных системах на основе метода динамического программирования. Мелиорация земель сопряжена с интенсивным антропогенным воздействием на природную среду, поэтому разработанная эколого-экономическая модель на основе метода динамического программирования позволит провести многоуровневую эколого-гидрологическую оценку состояния участков, орошаемых сточными водами. В основу разрабатываемой модели положена конфигурация иерархически управляемой динамической системы, которая включает в себя: источник воздействия верхнего уровня (Ведущий), источник воздействия нижнего уровня (Ведомый), управляемую динамическую систему (УДС). Динамическое программирование в широком смысле представляет собой оптимальное управление процессом посредством изменения управляемых параметров на каждом шаге и, следовательно, воздействие на ход процесса, изменяя на каждом шаге состояние системы. В модели приняты две ассоциированные с управляемой динамической системой группы субъектов: Ведущий и Ведомый, из которых Ведомый непосредственно воздействует на систему в своих интересах, а Ведущий следит за соблюдением этих объективных интересов, располагая возможностью воздействия на Ведомого, при этом непосредственное воздействие Ведущего на систему отсутствует. Моделирование позволяет определить основные свойства эколого-мелиоративной системы, законы развития и взаимодействия с окружающим миром, определить наилучшие способы управления эколого-мелиоративной системой для достижения заданных целей, прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации разных форм и способов воздействия на экологический объект. С помощью динамической модели можно регулировать степень очистки сточных вод, предназначенных для орошения, на основе экологической емкости агроландшафта.

Ключевые слова: грунтовые воды, динамическое программирование, загрязнения, сточная вода, оросительные системы, орошаемые земли.

Yu. Ye. Domashenko, M. V. Vlasov, S. M. Vasilyev, A. O. Matvienko
Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

ECOLOGICAL-ECONOMIC SUBSTANTIATION OF WASTEWATER UTILIZATION ON IRRIGATION SYSTEMS BASED ON DYNAMIC PROGRAMMING METHOD

The aim of the work is the ecological and economic substantiation of effluents utilization in irrigation systems on the basis of dynamic programming method. Land reclamation is associated with intensive anthropogenic environmental impact; therefore the developed ecological and economic model based on the dynamic programming method will allow carrying

out a multi-level ecological and hydrological assessment of the wastewater-irrigated plots. The developed model is based on the configuration of a hierarchically controlled dynamic system, which includes: the impact source of the upper level (Master), the impact source of the lower level (Slave), the managed dynamic system (MDS). Dynamic programming in the broad sense is the optimal control of the process by changing the controlled parameters at each step and, consequently, influencing the process, changing the state of the system at each step. Two groups of subjects associated with the managed dynamic system are admitted in the model: Master and Slave, where Slave directly influences the system in its own interests, and Leader ensures observance of these objective interests, having the opportunity to impact on Slave without the Leader's direct influence on the system. Modeling allows determining the main properties of the ecological meliorative system, the laws of development and interaction with the outworld, the best ways of managing the ecological-meliorative system to achieve the set goals, to predict the direct and indirect consequences of implementing different forms and methods of influencing the ecological object. Using the dynamic model, it is possible to regulate purification index intended for irrigation, based on ecological capacity of cultivated lands.

Keywords: groundwater, dynamic programming, pollution, wastewater, irrigation systems, irrigated land.

Введение. Россия занимает второе место в мире по валовым ресурсам пресной воды (после Бразилии), а по водообеспеченности в расчете на душу населения – третье место среди крупных стран (после Канады и Бразилии). Особенностью использования водных ресурсов в России является его низкая эффективность, но наиболее опасны аварийные сбросы загрязненных вод, связанные с авариями на очистных сооружениях, и нелегальные сбросы сточных вод в обход очистных сооружений в ночное время. Это приводит к интенсивному загрязнению поверхностных и в отдельных случаях подземных источников водоснабжения. В результате порядка 35 % проб воды в этих источниках не соответствуют стандартам качества. В России ежегодный ущерб от загрязнения водных объектов в первые годы нового тысячелетия составлял в среднем около 70 млрд руб. (в ценах 2001 г.), и в последние годы этот показатель продолжает расти [1–3]. В технических решениях современных оросительных систем допускается использование сточных вод, что позволяет сократить потребление удобрений и чистой воды для орошения. Однако сточные воды в зависимости от их качества почти всегда нуждаются в очистке [4–6].

Сложившаяся тенденция систематического поступления и накопления загрязняющих веществ в поверхностных и подземных водах вызвала

необходимость в разработке иерархических динамических систем управления экологической обстановкой на территориях орошаемых земель.

Целью работы является эколого-экономическое обоснование использования сточных вод на оросительных системах на основе метода динамического программирования.

Материалы и методы. В основу разрабатываемой модели положена конфигурация иерархически управляемой динамической системы, которая включает в себя [7–9]:

- источник воздействия верхнего уровня (Ведущий);
- источник воздействия нижнего уровня (Ведомый);
- управляемую динамическую систему (УДС).

При формировании модели определены следующие допущения: Ведущий воздействует на Ведомого, а Ведомый на управляемую динамическую систему, при этом непосредственное воздействие Ведущего на систему отсутствует. Ведущего и Ведомого в комплексе можно выделить в интегральный источник влияния на управляемую динамическую систему.

Общая задача иерархического управления динамической системой имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}x(t) &\in \Omega, \quad t=1, 2, \dots, T; \\J_v &= \sum_{t=1}^T g_v(t, v(t)) \rightarrow \max; \\v(t) &\in V(t), \quad t=1, 2, \dots, T; \\J_u &= \sum_{t=1}^T g_u(t, x(t-1), u(t), v(t)) \rightarrow \max; \\u(t) &\in U(t, x(t-1), v(t)), \quad t=1, 2, \dots, T; \\\xi(t) &\in E(t), \quad t=1, 2, \dots, T; \\x(t+1) &= x(t) + f(t, x(t), u(t), \xi(t)); \\x(0) &= x_0, \quad t=0, 1, \dots, T-1,\end{aligned}$$

где $x(t)=(x_1(t), \dots, x_n(t))$ – вектор состояния управляемой динамической си-

стемы в момент времени t ;

$v(t)=(v_1(t),..., v_p(t))$ – вектор управляющих воздействий Ведущего на Ведомого в момент времени t ;

$V(t)$ – область допустимых управлений Ведущего в момент t ;

$u(t)=(u_1(t),..., u_m(t))$ – вектор управляющих воздействий Ведомого на управляемую динамическую систему в момент времени t ;

$U(t, x(t-1), v(t))$ – область допустимых управлений Ведомого в момент t ;

$\xi(t)=(\xi_1(t), ..., \xi_r(t))$ – вектор неконтролируемых внешних воздействий на управляемую динамическую систему в момент времени t ;

$E(t)$ – область возможных значений внешних факторов в момент t ;

$g_v(t, v(t))$ – целевая функция Ведущего в момент t ;

J_v – целевая функция Ведущего за период $[0, T]$;

$g_u(t, x(t-1), u(t), v(t))$ – целевая функция Ведомого в момент t ;

J_u – целевая функция Ведомого за период $[0, T]$;

$f(t, x(t), u(t), \xi(t))$ – оператор перехода управляемой динамической системы из состояния в момент t в состояние в момент $t+1$;

$x_0=(x_{01},..., x_{0n})$ – известное начальное состояние управляемой динамической системы;

T – период прогнозирования;

Ω – совокупность диапазонов значений области состояния управляемой динамической системы (экосистемы).

Результаты и обсуждения. Рассмотрим следующий пример, в котором ограничимся наличием двух ассоциированных групп с управляемой динамической системой субъектов: Ведущего и Ведомого, из которых Ведомый непосредственно воздействует на систему в своих интересах (вообще говоря, не совпадающих с интересами системы), а Ведущий следит за соблюдением этих объективных интересов, располагая возможностью воздействия на Ведомого, кроме того, Ведущий может иметь и соб-

ственные субъективные интересы. Ведомый интерпретируется как источник воздействия на экосистему. При этом возникает иерархически управляемая динамическая система, исследование которой мы и проведем. Пусть на поверхности земли расположен точечный источник загрязнения (сточные воды (СВ)). СВ содержат некоторое загрязняющее вещество. Обозначим:

H – глубина залегания грунтовых вод, м;

$\pi(t, h)$ – количество загрязняющего вещества, мг/кг в момент t на глубине h почвы, м;

$m(t)$ – объем СВ в момент t в точке $h=0$, т. е. полив сточными водами, м³;

$p(t)$ – доля объема СВ, подвергаемая очистке в момент t ;

$a(t)$ – стоимость очистки половины объема СВ на момент t , руб.;

$\kappa(h)$ – доля разбавления загрязняющего вещества грунтовыми водами на $[0, h]$;

$V(h)$ – расход грунтовых вод в точке h , м³/сут;

ν – скорость впитывания влаги в почву, мм/ч;

c – предельно допустимая концентрация данного загрязняющего вещества, мг/кг;

λ – коэффициент естественного распада загрязняющего вещества;

$\pi_0(h)$ – начальное (фоновое) распределение загрязняющего вещества в почве, мг/кг.

Положим, $\kappa(h)=kh/\nu$, где k – коэффициент самоочищения почвы, и возьмем функцию затрат на очистку стоков в виде:

$$g(p)=ap/(1-p).$$

Сохраняя смысл задачи иерархического управления, применим формализацию с непрерывным временем в отрезке $[0, T]$. Тогда задачу понижения концентрации загрязняющего вещества в почве до предельно допустимой за период T при минимальных затратах на очистку можно сфор-

мулировать в виде:

$$J_v = \int_0^T g(p(t)) dt \rightarrow \min_{\{p(t)\}}, \quad (1)$$

$$\partial \pi(t, h) / \partial t = -\lambda \pi(t, h) + (1 - kh/v)[1 - p(t - h/v)]m(t - h/v), \quad (2)$$

$$\pi(0, h) = \pi_0(h), \quad (3)$$

$$\pi(T, h) \leq cV(h), \quad (4)$$

$$0 \leq p(t) < 1, \quad (5)$$

$$0 \leq m(t) \leq M, \quad (6)$$

где M – максимальная величина сброса, м³.

В терминах модели иерархического управления:

$\pi(t, h)$ – состояние УДС с учетом пространственно-временного распределения;

$m(t)$ – управляющее воздействие Ведомого;

$p(t)$ – управляющее воздействие Ведущего.

В данной постановке Ведомый трактуется как безразличный (его интересы не учитываются), механизм адаптации вынесенный (деятельность по очистке). Здесь присутствует и встроенный механизм адаптации $\kappa(h)$, но его действие незначительно по сравнению с $p(t)$, особенно при малых h .

С математической точки зрения система (2)–(6) представляет собой краевую задачу для уравнения в частных производных с запаздыванием, исследование которой затруднено.

В качестве упрощенной иллюстрации рассмотрим случай, когда время добегания $\tau = h/v$ от места сброса до точки h небольшое (т. е. динамику загрязнения вблизи места сброса). Тогда вместо условий (2)–(6) можно записать:

$$d\pi/dt = [1 - p(t)]m(t) - \lambda \pi(t), \quad (7)$$

$$\pi(0) = \pi_0, \quad (8)$$

$$\pi(T) \leq Vc, \quad (9)$$

где π_0 – начальное количество загрязняющего вещества, м³;

V – расход грунтовых вод (оба – в месте сброса).

В случае постоянной нагрузки $m(t) \equiv m$ задача (1), (7)–(9) представляет собой задачу оптимального управления с подвижным правым концом (можно рассматривать варианты свободного или закрепленного времени). Замена условия (9) более сильным требованием:

$$\pi(t) \leq Vc, \quad 0 \leq t \leq T,$$

приводит к задаче оптимального уравнения с ограничением на фазовую переменную.

Рассмотрим случай закрепленного времени (содержательно эта постановка выражает требование обеспечить соответствие предельно допустимой концентрации через заданный отрезок времени T).

Пусть $a(t) \equiv a$. Функция Гамильтона имеет вид:

$$H(\psi, \pi, p) = a\psi_0(t)/[1-p(t)] + \psi_1(t)[m(1-p(t)) - \lambda\pi(t)],$$

где $\psi(t)$ – сопряженная переменная.

Согласно принципу максимума Понтрягина [10], $\psi(t)$ – постоянная сопряженная неположительная функция. Обозначим $\psi_0(t) = \psi < 0$.

Из уравнения для сопряженной переменной $d\psi_1/dt = -\partial H/\partial \pi$ находим $\psi_1(t) = C_1 e^{\lambda t}$.

Необходимое условие максимума дает:

$$0 = \partial H/\partial p = a\psi_0(t)/[1-p(t)]^2 - m\psi_1(t),$$

откуда оптимальное управление:

$$p^*(t) = 1 - [a\psi_0(t)/m\psi_1(t)]^{1/2} = 1 - [aCe^{-\lambda t}/m]^{1/2}, \quad (10)$$

где $C = \psi/C_1$.

Условие трансверсальности на правом конце дает:

$$\theta^0 \psi + \theta^1 C_1 e^{-\lambda T} = 0,$$

где $\theta = (\theta^0, \theta^1)$ – вектор, касательный к лучу $\pi \leq Vc$. Тогда:

$$C = \psi / C_1 = -\theta^1 e^{-\lambda T} / \theta^0 = e^{-\lambda T} > 0,$$

откуда с учетом (10) оптимальное управление есть

$$p^*(t) = 1 - (a/m)^{1/2} e^{-0,5\lambda(T+t)},$$

а оптимальная траектория

$$\pi^*(t) = \pi_0 e^{-\lambda t} + 2\lambda^{-1} (ma)^{1/2} e^{-0,5\lambda(T+t)}.$$

В общем случае переменной нагрузки $m(t)$ задача (1), (7)–(9) представляет собой дифференциальную игру с Природой, управление которой есть $m(t)$, а целевая функция $J_u = \text{const}$.

Применение принципа гарантированного результата ведет к антагонистической игре, в которой наихудшая для целеустремленного игрока (механизмов адаптации) ситуация возникает, очевидно, при выборе Природой максимально возможного значения своей управляющей переменной $m(t) = M$.

Поэтому антагонистическая дифференциальная игра сводится к уже исследованной задаче оптимального управления и оптимальная гарантирующая стратегия адаптации должна иметь вид:

$$p^*(t) = 1 - (a/M)^{1/2} e^{-0,5\lambda(T+t)},$$

что ведет к оптимальному гарантированному результату:

$$J_v^*(t) = 2\lambda^{-1} (aM)^{1/2} e^{-0,5\lambda T} - T.$$

Заключение. Мелиорация земель сопряжена с интенсивным антропогенным воздействием на природную среду, поэтому разработанная эколого-экономическая модель на основе метода динамического программирования позволит провести многоуровневую эколого-гидрологическую оценку состояния участков, орошаемых сточными водами. В модели иерархически управляемой динамической системой Водомый (загрязняющее вещество) оказывает непосредственное влияние на УДС, что позволяет оптимизировать отдельные критерии процесса распределения загрязня-

ющих веществ в профиле почвенного горизонта, и Ведущий (почвенный горизонт) не воздействует непосредственно на Ведомого. Моделирование позволяет определить основные свойства модели эколого-мелиоративной системы, законы развития и взаимодействия с окружающим миром, определить наилучшие способы управления эколого-мелиоративной системой для достижения заданных целей, прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации разных форм и способов воздействия на экологический объект. С помощью динамической модели можно регулировать степень очистки сточных вод, предназначенных для орошения, на основе экологической емкости агроландшафта.

Список использованных источников

- 1 Данилов-Данильян, В. И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России / В. И. Данилов-Данильян // Институт устойчивого развития, Центр экологической политики России. – М.: Типография ЛЕВКО, 2009. – 88 с.
- 2 Rodda, G. On the problems of assessing the World water resources / G. Rodda // In: Geosci. and water resource environment data model. – Berlin – Heidelberg, 1997. – pp. 14–32.
- 3 Домашенко, Ю. Е. Моделирование и оценка поступления загрязняющих веществ в коллекторно-дренажный сток / Ю. Е. Домашенко, С. М. Васильев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2016. – № 2(22). – С. 112–127. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=406&id=414>.
- 4 Капустян, А. С. Качество дренажно-сбросных вод оросительных систем / А. С. Капустян, Л. В. Юченко, О. А. Старостина // Современные проблемы мелиорации земель, пути и методы их решения: сб. науч. тр. ФГНУ «РосНИИПМ» / под ред. В. Н. Щедрина. – В 2 ч. – Новочеркасск, 2003. – Ч. 1. – С. 160–164.
- 5 Глотов, И. И. Использование вторичных ресурсов в отраслях АПК / И. И. Глотов. – М.: Россельхозиздат, 1987. – 87 с.
- 6 Щедрин, В. Н. Очистка дренажно-сбросных вод от вредных примесей / В. Н. Щедрин, А. С. Капустян // Мелиорация и водное хозяйство. – 1998. – № 6. – С. 32–34.
- 7 Беллман, Р. Процессы регулирования с адаптацией / Р. Беллман. – М.: Наука, 1964. – 359 с.
- 8 Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус – М.: Наука, 1965. – 460 с.
- 9 Угольницкий, Г. А. Управление эколого-экономическими системами / Г. А. Угольницкий. – М.: Вузовская книга, 1999. – 132 с.
- 10 Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1983. – 392 с.

References

- 1 Danilov-Danilyan V.I., 2009. *Vodnyye resursy mira i perspektivy vodokhozyaystvennogo kompleksa Rossii* [World water resources and water-industrial complex prospects of Russia]. *Institut ustoychivogo razvitiya, Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii* [Insti-

tute for Sustainable Development, Center for Environmental Policy of Russia]. Moscow, LEVKO Publ., 88 p. (In Russian).

2 Rodda G., 1997. On the problems of assessing the World water resources In: Geosci. and water resource environment data model. Berlin, Heidelberg, pp. 14-32. (In English).

3 Domashenko Yu.Ye., Vasiliev S.M., 2016. *Modelirovaniye i otsenka postupleniya zagryaznyayushchikh veshchestv v kollektorno-drenazhnyy stok* [Modeling and evaluation of pollutants input into a collector-drainage water]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 2(22), pp. 112-127, available: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=406&id=414>. (In Russian).

4 Kapustyan A.S., Yuchenko L.V., Starostina O.A., 2003. *Kachestvo drenazhno-sbrosnykh vod orositelnykh sistem* [Quality of drainage-wastewaters of irrigation systems]. *Sovremennyye problemy melioratsii zemel, puti i metody ikh resheniya: sb. nauch. tr. FGNU "RosNIIPM"* [Modern problems of land reclamation, ways and methods for their solution: Proceed. of FGNU "RosNIIPM"]. In 2 parts. Novocherkassk, part 1, pp. 160-164. (In Russian).

5 Glotov I.I., 1987. *Ispolzovaniye vtorykh resursov v otraslyakh APK* [Recyclable resources utilization in agro-industrial complex branches]. Moscow, Rosselkhozizdat Publ., 87 p. (In Russian).

6 Shchedrin V.N., Kapustyan A. C., 1998. *Ochistka drenazhno-sbrosnykh vod ot vrednykh primesey* [Purification of drainage-wastewaters from harmful impurities]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Melioration and water management], no. 6, pp. 32-34. (In Russian).

7 Bellman R., 1964. *Protsessy regulirovaniya s adaptatsiyey* [Control processes with adaptation]. Moscow, Nauka Publ., 359 p. (In Russian).

8 Bellman R., Dreyfus S., 1965. *Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applied problems of dynamic programming]. Moscow, Nauka Publ., 460 p. (In Russian).

9 Ugolnitsky G.A., 1999. *Upravleniye ekologo-ekonomicheskimi sistemami* [Management of Ecological and Economic Systems]. Moscow, University Book Publ., 132 p. (In Russian).

10 Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko Ye.F., 1983. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka Publ., 392 p. (In Russian).

Домашенко Юлия Евгеньевна

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: начальник отдела

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: Domachenko_u@list.ru

Domashenko Yuliya Yevgenyevna

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Head of the Department

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: Domachenko_u@list.ru

Власов Михаил Вячеславович

Ученая степень: кандидат физико-математических наук

Должность: начальник отдела

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: m_vlasov@bk.ru

Vlasov Mikhail Vyacheslavovich

Degree: Candidate of Physico-Mathematical Sciences

Position: Head of the Department

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: m_vlasov@bk.ru

Васильев Сергей Михайлович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: заместитель директора по науке

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Vasilyev Sergey Mikhaylovich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Deputy Director of Science

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Матвиенко Анна Олеговна

Должность: младший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Matvienko Anna Olegovna

Position: Junior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru