

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Г.А. Угольницкий, А.Б. Усов

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Сформулированы общие подходы к управлению эколого-экономическими системами. Предложены методы иерархического управления (принуждение, побуждение, убеждение), позволяющие субъекту управления верхнего уровня добиться выполнения требований устойчивого развития системы. Приведены примеры применения указанных методов в системе контроля качества речных вод и дан их сравнительный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия ускоренными темпами происходят концентрация производства, организация крупных промышленных объединений, глобализация экономики. Это приводит к усилению воздействия техногенных процессов на окружающую природу, создает реальную опасность истощения как невозобновляемых, так и возобновляемых ресурсов.

Рациональное использование природных ресурсов, внедрение новых ресурсосберегающих технологий требуют перехода на принципиально иные эколого-экономические отношения, в основе которых лежат сопряженность, соразмерность, сбалансированность природных и производственных потенциалов, эколого-экономический баланс. Окружающая среда должна быть включена в систему социально-экономических отношений как один из ее важнейших элементов.

Решение этих задач невозможно без комплексного подхода, предполагающего создание концепции управления эколого-экономическими системами, в которой должны быть сформулированы главные задачи управления, общая структура систем управления и принципы их организации. Актуальной проблемой является разработка новых подходов к управлению, которые исходят из требования устойчивого развития эколого-экономических систем и предполагают применение методов иерархического управления.

1. ИЕРАРХИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Устойчивое развитие определяется как процесс, отвечающий потребностям настоящего, но не лишаящий будущие поколения возможности удовлетворять свои потребности. В основе стратегии устойчивого развития лежит идея равновесия между окружающей средой, экономикой и населением Земли [1–3].

При анализе управления устойчивым развитием целесообразно трактовать эколого-экономическую систему как иерархически управляемую динамическую систему [4]. Простейшая иерархически управляемая динамическая система имеет два уровня и включает в себя:

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

Взаимоотношения внутри такой иерархической системы устроены следующим образом: Ведущий воздействует на Ведомого и на УДС, Ведомый — только на УДС. Ведущего и Ведомого вместе можно рассматривать как совокупный источник воздействия на УДС, имеющий иерархическую структуру. В качестве Ведущего чаще всего выступают органы государственной власти, в роли ведомых — промышленные предприятия, а в качестве УДС может выступать как целиком вся экологическая



система некоторого региона, так и отдельные ее составляющие.

Предприятия забирают из окружающей среды природные ресурсы, перерабатывая которые они производят необходимый обществу конечный продукт. В окружающую среду при этом попадают продукты технологического процесса — различного вида отходы.

Основной смысл введения понятия *иерархической управляемой динамической системы* заключается в следующем. Воздействуя на эколого-экономическую систему, предприятие преследует собственные цели, в общем случае не отвечающие требованиям устойчивого развития. Сама эколого-экономическая система, будучи неодушевленным объектом, не может целенаправленно «отстаивать свои интересы»; ее ответные реакции носят спонтанный, запаздывающий характер. Поэтому нужен Ведущий, способный, используя различные механизмы управления, воздействовать на Ведомого для достижения целей устойчивого развития всей системы.

В России в настоящее время формируется экономический механизм управления природопользованием, включающий в себя как поощрительные, так и принудительные элементы регулирования. Его основу составляют платежи за пользование природными ресурсами и экономические санкции за экологические правонарушения. Одна из основных научных задач при этом заключается в разработке методов регулирования (административных, экономических), в наибольшей степени отвечающих целям концепции устойчивого развития.

Рассмотрим математическую формализацию основных методов иерархического управления на примере модели контроля качества речных вод.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД

Для простоты в предлагаемой далее модели не учитываются платежи за водозабор и водосброс, в рассмотрение принимаются только платежи за сброс загрязнений. Исследуется случай только одного вида загрязнений, например, азотосодержащих загрязняющих веществ.

Пусть вдоль реки расположено N предприятий, которые сбрасывают загрязняющие вещества в реку вместе со сточными водами. Деятельность предприятий контролируется правительственным органом (центром). Центр, регулирующий качество речной и сточных вод, взимает с предприятий плату за сброс загрязнений. Основная цель центра состоит в поддержании речной системы в устойчивом состоянии. Добиться этого центр может не единственным образом, поэтому помимо основной цели он стремится к максимизации остающихся в его распоряжении средств, поступающих от предприятий.

Целевая функция центра имеет вид

$$J_0 = \int_0^{\Delta} \left\{ -C_A(y(t)) + \sum_{i=1}^N [v_i(R_i(\Phi_i) - VK_i(\Phi_i) - H_i(\Phi_i) - VS_i(W_i, P_i) - FN_i) + FN_i + FP_i + FS_i] \right\} dt \rightarrow \max \{KN_i(t), KS_i(t), q_i(t)\}_{i=1}^N;$$

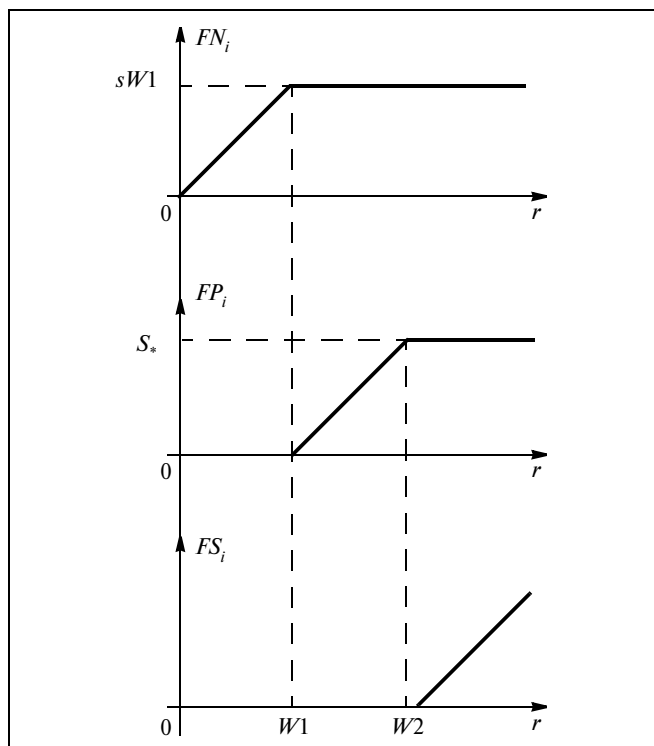
$$y(t) = \sum_{i=1}^N [1 - P_i(t)] W_i(t);$$

$$FN_i = \begin{cases} s(1 - P_i(t)) W_i(t), & \text{если } (1 - P_i(t)) W_i(t) \leq W1, \\ sW1, & \text{если } (1 - P_i(t)) W_i(t) > W1, \end{cases}$$

$$FP_i = \begin{cases} 0, & \text{если } (1 - P_i(t)) W_i(t) \leq W1, \\ sKN_i(t)((1 - P_i(t)) W_i(t) - W1), & \text{если } W1 < (1 - P_i(t)) W_i(t) \leq W2, \\ sKN_i(t)(W2 - W1), & \text{если } W2 < (1 - P_i(t)) W_i(t); \end{cases}$$

$$FS_i = \begin{cases} 0, & \text{если } (1 - P_i(t)) W_i(t) \leq W2, \\ sKS_i(t)((1 - P_i(t)) W_i(t) - W2), & \text{если } (1 - P_i(t)) W_i(t) > W2. \end{cases}$$

Здесь t — временная координата; $W_i(t)$ и $(1 - P_i(t)) W_i(t)$ — количество загрязнений, сбрасываемых в реку до и после очистки сточных вод в момент времени t ; $P_i(t)$ — доля загрязнений, удаляемых на i -м предприятии в процессе очистки сточных вод; FS_i , FN_i и FP_i — функции платежей (см. рисунок) предприятий за сброс загрязнений в пределах установленного норматива, а также за сверхнормативный и сверхлимитный сбросы соответственно, эти функции зависят от общего количества загрязнений, сбрасываемых в реку после очистки сточных вод, т. е. от величины $r(1 - P_i(t)) W_i(t)$; s , KN_i и KS_i — размеры платы за единицу сброшенных загрязнений на i -м предприятии в момент времени t при сбросе в установленных пределах, сверхнормативном и сверхлимитном сбросах соответственно; $W1$ и $W2$ — установленные законодательством нормативы сброса загрязнений; $C_A(y(t))$ — функция, отражающая материальные потери общества из-за загрязненной воды (затраты на устройство новых мест отдыха в других регионах, дополнительные расходы по очистке речной воды для потребительских нужд населения и т. п.); $y(t)$ — общее количество сброшенных в реку загрязнений; Δ — момент времени, до которого ведется рассмотрение; v_i — ставка налога на прибыль на i -м предприятии; $R_i(\Phi_i)$ — доход i -го предприятия от реализации произведен-


 Графики функций платежей (штрафов); $S_* = sKN_i(W2 - W1)$

ной продукции при размере производственных фондов Φ_i ; $VK_i(\Phi_i)$ — включаемые в себестоимость издержки основного производства; $H_i(\Phi_i)$ — суммарная заработная плата основного и природоохранного производств; $VS_i(W_i, P_i)$ — издержки природоохранной деятельности, зависящие от объема сбрасываемых загрязнений и степени очистки сточных вод; q_i — минимально допустимая степень очистки сточных вод на i -м предприятии.

Функции VK_i и H_i зависят от объема производства, т. е. от размера производственных фондов. Функция $VS_i(W_i, P_i)$ отражает затраты i -го предприятия на очистку сточных вод. Предполагается, что выполнены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} VK_i(\Phi_i) + H_i(\Phi_i) &= \mu_i R_i(\Phi_i); \quad \mu_i = \text{const}; \\ VS_i(W_i, P_i) &= W_i C_p(P_i), \end{aligned}$$

где $C_p(P_i)$ — функции затрат i -го предприятия на очистку единицы сбрасываемых в водоток загрязнений.

Цель предприятий состоит в максимизации прибыли, полученной в ходе производственной деятельности, т. е.

$$J_i = \int_0^{\Delta} \{(1 - v_i)(R_i(\Phi_i) - VK_i(\Phi_i) - H_i(\Phi_i) - VS_i(W_i, P_i) - FN_i) - FP_i - FS_i\} dt \rightarrow \max\{P_i\}. \quad (2)$$

Динамика производственных фондов предприятия описывается уравнением

$$\frac{d\Phi_i}{dt} = -k_i \Phi_i + Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где k_i — коэффициент амортизации производственных фондов, Y_i — инвестиции в производство.

Пусть количество сбрасываемых загрязнений (до очистки) зависит от количества произведенной продукции линейно, а производственные функции имеют вид

$$\begin{aligned} W_i &= \beta_i R_i(\Phi_i), \quad R_i(\Phi_i) = \gamma_i \Phi_i^{0,5}, \\ i &= 1, 2, \dots, N, \quad \gamma_i, \beta_i = \text{const}. \end{aligned} \quad (4)$$

Основные характеристики качества речной воды — концентрация загрязняющих веществ $B(x, t)$ и концентрация растворенного в воде кислорода $B^{O_2}(x, t)$ описываются в случае пространственной неоднородности только вдоль русла реки уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B(x, t)}{\partial t} + v_x \frac{\partial B(x, t)}{\partial x} &= \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[EA \frac{\partial B(x, t)}{\partial x} \right] - \\ &k_c B(x, t) + W^0(x, t)(1 - P^0(x, t))/A; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B^{O_2}(x, t)}{\partial t} + v_x \frac{\partial B^{O_2}(x, t)}{\partial x} &= \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial t} \left[EA \frac{\partial B^{O_2}(x, t)}{\partial x} \right] - \\ &- k_c B(x, t) + [B_{\text{нас}}^{O_2} - B^{O_2}(x, t)] + F_0 - F_1 - F_2, \end{aligned} \quad (6)$$

где x — пространственная координата; $0 \leq x \leq L$; L — длина реки; E — коэффициент дисперсии; A — площадь поперечного сечения реки; v_x — скорость воды в реке; $k_c B(x, t)$ — изменение во времени биохимического потребления кислорода из-за распада; $K_{O_2}(B_{\text{нас}}^{O_2} - B^{O_2}(x, t))$ — добавка растворенного кислорода вследствие реаэрации; $B_{\text{нас}}^{O_2}$ — концентрация насыщения кислорода; F_0 — добавка кислорода вследствие фотосинтеза; F_1 — потребление растворенного кислорода на дыхание; F_2 — придонное потребление растворенного кислорода.

Функции W^0 и P^0 отражают наличие источников загрязнений и определяются формулами

$$P^0(x, t) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \neq x_i, \\ P_i(t) & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$W^0(x, t) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \neq x_i, \\ W_i(t) & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В точках x_i , $i = 1, 2, \dots, N$, расположены предприятия.



Оптимизационные задачи (1) и (2) решаются при следующих ограничениях на управления

$$q_i \leq P_i(t) \leq 1 - \varepsilon, \quad 0 \leq t \leq \Delta, \quad (7)$$

$$0 \leq KN_i(t) \leq KN_{\max}, \quad 0 \leq KS_i(t) \leq KS_{\max}, \\ 0 \leq t \leq \Delta, \quad (8)$$

где значения величин KS_{\max} и KN_{\max} заданы; $0 < \varepsilon < 1$ — постоянная, определяемая технологическими возможностями очистки сточных вод на предприятиях.

Требования устойчивого развития эколого-экономической системы, включающей в себя водоток, состоят в необходимости выполнения следующих неравенств:

$$0 \leq B(x, t) \leq B_{\max}, \quad B_{\min}^{O_2} \leq B^{O_2}(x, t), \\ 0 \leq t \leq \Delta, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (9)$$

$$\frac{W_i(t)[1 - P_i(t)]}{Q_i^0(t)} \leq Q_{\max}, \quad 0 \leq t \leq \Delta, \\ i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

где $Q_i^0(t)$ — расход воды на i -м предприятии; величины B_{\max} , $B_{\min}^{O_2}$ и Q_{\max} заданы.

Условия (9) связаны с государственными стандартами качества речной воды, а условия (10) — со стандартами поступления загрязнений с очищенной сточной водой для каждой точки сброса [5].

3. МЕТОДЫ ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Устойчивое развитие эколого-экономической системы может достигаться различными методами иерархического управления. В зависимости от степени свободы индивида как объекта управления можно выделить следующие методы управления: принуждение, побуждение и убеждение.

Метод принуждения предполагает воздействие Ведущего на множество допустимых управленческих стратегий Ведомого. Это воздействие носит административно-законодательный характер, т. е. Ведущий запрещает Ведомому применять стратегии, не удовлетворяющие требованиям устойчивого развития. Из множества возможных стратегий принуждения Ведущий выбирает ту, которая отвечает его критерию оптимальности.

Метод побуждения заключается в стимулировании Ведомого путем воздействия Ведущего на его целевую функцию. Смысл метода заключается в том, чтобы сделать управления устойчивого развития экономически наиболее выгодными для Ведомого. Для этого применяется экономический механизм с обратной связью, предусматривающий поощрение Ведомого в случае выполнения им условий устойчивого развития и наказание в

противном случае. В отличие от метода принуждения, Ведомому явно не запрещается выбирать стратегии, нарушающие условия устойчивого развития. Поэтому, если возможностей Ведущего недостаточно для стимулирования Ведомого, то стратегия побуждения может оказаться неэффективной по отношению к «браконьерскому» поведению Ведомого.

Метод убеждения подразумевает добровольную кооперацию Ведущего и Ведомого для совместного обеспечения условий устойчивого развития и максимизации суммарной целевой функции, с последующим дележом полученной коалицией Ведущего и Ведомого суммарной прибыли между ними. Суть метода убеждения заключается в преобразовании иерархических отношений в кооперативные.

Подробная характеристика методов принуждения, побуждения и убеждения дана в работе [6]. Формализуем указанные методы управления для случаев, описываемых выражениями (1)–(10).

4. ФОРМАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Основная цель центра состоит в выполнении неравенств (9) и (10), что позволяет поддерживать систему в устойчивом состоянии. Гарантировать выполнение этих условий центр может не единственным образом, поэтому, помимо основной цели, он стремится к оптимизации функции (1). При этом используются следующие методы управления.

4.1. Принуждение

В случае принуждения центр воздействует на область допустимых управлений предприятий и заставляет их выполнять стандарты качества речной и сточных вод, не оставляя им других возможностей, путем выбора значений q_i — минимально допустимых степеней очистки сточных вод.

Алгоритм построения равновесия принуждения состоит в следующем.

1. В результате максимизации критериев (2) при ограничениях (7) и соотношениях (3) и (4) определяются оптимальные стратегии предприятий в зависимости от управлений центра $(P_i)^*(KN_i, KS_i, q_i)$ $i = 1, 2, \dots, N$.

2. Метод принуждения предполагает, что размеры платы за единицы сброшенных загрязнений (KN_i, KS_i) при решении оптимизационных задач остаются неизменными и функция (1) максимизируется только по значениям q_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Оптимальными для центра являются значения $(q_i)^*$, которые доставляют максимум его целевой функции и позволяют выполнить стандарты качества реч-

ной и сточных вод. Таким образом, решается задача (1), (8) с учетом требований (9) и (10).

3. Равновесие принуждения имеет вид $\{(q_i)^*, (P_i)^*\}_{i=1}^N$, где $(P_i)^*$ — оптимальные реакции предприятий на выбранную центром стратегию: $(P_i)^* = (P_i)^*(q_i)^*, KN_i, KS_i$

4.2. Побуждение

Метод побуждения предполагает, что центр воздействует на целевые функции предприятий. Он назначает размер платы за единицы сброшенных загрязняющих веществ (значения $q_i, i = 1, 2, \dots, N$ остаются постоянными) и создает условия, при которых предприятиям выгодно придерживаться стандартов качества вод.

Алгоритм построения равновесия побуждения состоит в следующем.

1. Аналогично методу принуждения определяются оптимальные стратегии предприятий в зависимости от стратегии центра.

2. В методе побуждения критерий (1) центра, в котором значения P_i определяются на первом шаге алгоритма, максимизируется по $KN_i, KS_i, i = 1, 2, \dots, N$ (значения $q_i(t)$ не меняются) при условиях (8)—(10).

Оптимальными для центра являются размеры платы за сброс загрязнений, позволяющие выполнить стандарты качества и доставляющие максимум его целевой функции.

3. Равновесие побуждения имеет вид $\{(KN_i)^*, (KS_i)^*, (P_i)^*\}_{i=1}^N$, где $(KN_i)^*, (KS_i)^*$ — оптимальная стратегия центра, $(P_i)^* = (P_i)^*((KN_i)^*, (KS_i)^*)$ — оптимальные реакции предприятий на выбранную центром стратегию.

4.3. Убеждение

Если предприятия сами стремятся поддерживать систему в устойчивом состоянии, то вместо критериев (1) и (2) у всех субъектов управления будет один общий критерий

$$J = \int_0^{\Delta} \left[-C_A(y(t)) + \sum_{i=1}^N (R_i(\Phi_i) - VK_i(\Phi_i) - H_i(\Phi_i) - VS_i(W_i, P_i)) \right] dt \rightarrow \max(\{P_i\}_{i=1}^N),$$

рассматриваемый при ограничениях (7), (9) и (10).

5. МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Все расчеты проводились для случая, когда

$$C_p(Y) = D \frac{Y}{1-Y}, C_A(y) = C_1 y.$$

Пример 1 (побуждение). Для следующего набора входных данных $N = 1; D = 1; KN_{\max} = 8; KS_{\max} = 10; \beta_1 = 0,01$ мг/(сут·у. е.); $\gamma_1 = 0,2$ у. е.; $k_1 = 10^{-5}$ сут $^{-1}$; $Q_1 = 10^6$ м 3 /сут; $A = 700$ м 2 ; $L = 100$ м; $E = 24\,000$ м 2 /сут; $\varepsilon = 0,01$; $\nu_1 = 0,24$; $\mu_1 = 0,5$; $\Phi_0 = 5 \cdot 10^9$ у. е.; $q_1 = 0$; $C_1 = 1$; $S_1 = 1$; $Y_1 = 0$; $W1 = 0,25\beta_1\gamma_1(\Phi_0)^{1/2}$; $W2 = 0,5\beta_1\gamma_1(\Phi_0)^{1/2}$; $Q_{\max} = 60$; $B^{O_2} = B = 12$ мг/л (при $t = 0$; при $x = 0, L$); $x_1 = 30$ м; $B_{\text{нас}}^{O_2} = 22$ мг/л; $B_{\text{max}} = 35$ мг/л; $B_{\text{min}}^{O_2} = 3$ мг/л; $F_0 = F_1 = F_2 = 0$ мг/(л·сут); $\nu_x = 100$ м/сут; $\Delta = 360$ сут; $K_{O_2} = 5$ сут $^{-1}$; $k_c = 2,5$ сут $^{-1}$ метод побуждения реализуется, для предприятия выгодно, чтобы объемы сброса загрязнений не превышали величины $W2$ и $(KN_1(t))^* = 8$; $(KS_1(t))^* = 1,25$; $(P_1(t))^* = 0,7425$; $J_0 = 5,75 \cdot 10^5$ у. е.; $J_1 = 1,81 \cdot 10^6$ у. е.

Пример 2 (побуждение). В случае входных данных примера 1 и $S_1 = 0,1$ или $D = 5$ метод побуждения не реализуется. В распоряжении центра оказываются недостаточные экономические рычаги воздействия на предприятие.

Пример 3 (побуждение). В случае $W1 = 0,15\beta_1\gamma_1(\Phi_0)^{1/2}$; $W2 = 0,35\beta_1\gamma_1(\Phi_0)^{1/2}$ и данных примера 1 происходит уменьшение значений допустимых объемов нормативного и сверхнормативного сброса загрязнений. Предприятие своей стратегии не меняет, центр получает дополнительную прибыль по сравнению с примером 1:

$$(KN_1)^* = 8; (KS_1)^* = 7,5; (P_1)^* = 0,7425; J_0 = 6,12 \cdot 10^5 \text{ у. е.}; J_1 = 1,77 \cdot 10^6 \text{ у. е.}$$

Пример 4 (побуждение). Для данных примера 1 и $D = 0,001$ наблюдается уменьшение затрат на очистку сточных вод на предприятии. В результате на предприятии выбирается максимально возможная степень очистки сточных вод, и $(KN_1)^* = 0$; $(KS_1)^* = 0$; $(P_1)^* = 0,99$; $J_0 = 6,09 \cdot 10^5$ у. е.; $J_1 = 1,93 \cdot 10^6$ у. е.

Пример 5 (побуждение). При $D = 4, S_1 = 20$ и входных данных примера 1 получим, что $(KN_1)^* = 8$; $(KS_1)^* = 0$; $(P_1)^* = 0,7425$; $J_0 = 7,1 \cdot 10^5$ у. е.; $J_1 = 1,234 \cdot 10^6$ у. е.

Пример 6 (принуждение). В случае данных примера 1 и $S_1 = 0,1$ (значения q_i переменные и подлежат определению) и $KN_1 = 6$; $KS_1 = 8$ метод принуждения (в отличие от примера 2) реализуется и выполняются равенства $(q_1)^* = 0,7425$; $(P_1)^* = 0,7425$; $J_0 = 7,63 \cdot 10^5$ у. е.; $J_1 = 1,62 \cdot 10^6$ у. е.



Пример 7 (принуждение). Для данных примера 1 и $KN_1 = 6$; $KS_1 = 8$ прибыль предприятия уменьшилась, центра — незначительно выросла: $J_0 = 5,81 \cdot 10^5$ у. е.; $J_1 = 1,57 \cdot 10^6$ у. е.

Пример 8 (принуждение). В случае данных примера 3 и $KN_1 = 6$; $KS_1 = 8$ получим

$$(q_1)^* = 0,7425; \quad (P_1)^* = 0,7425.$$

Прибыль центра уменьшилась, а прибыль предприятия немного выросла:

$$J_0 = 6,05 \cdot 10^5 \text{ у. е.}; \quad J_1 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ у. е.}$$

Пример 9 (принуждение). Для данных примера 4 и $KN_1 = 6$; $KS_1 = 8$ получим, что

$$(q_1)^* = 0,866; \quad (P_1)^* = 0,9745;$$

$$J_0 = 6,5 \cdot 10^5 \text{ у. е.}; \quad J_1 = 1,65 \cdot 10^6 \text{ у. е.}$$

Пример 10 (принуждение). Для данных примера 5 и $KN_1 = 6$; $KS_1 = 8$ получим

$$(q_1)^* = 0,2475; \quad (P_1)^* = 0,7115;$$

$$J_0 = 8,56 \cdot 10^5 \text{ у. е.}; \quad J_1 = 9,5 \cdot 10^5 \text{ у. е.}$$

Пример 11 (убеждение). В случае данных примеров 1—3, получим, что $(P_1)^* = 0,812$. Совместная прибыль центра и предприятия (J_c) значительно возросла, по сравнению с побуждением и принуждением; $J_c = 1,84 \cdot 10^7$ у. е.

Пример 12 (убеждение). Для данных примера 4 также наблюдается значительный рост совместной прибыли субъектов управления, а именно $(P_1)^* = 0,866$; $J_c = 6,278 \cdot 10^6$ у. е.

Пример 13 (убеждение). В случае данных примера 5 имеем $(P_1)^* = 0,6834$; $J_c = 4,85 \cdot 10^6$ у. е.

Все примеры исследовались методом сценариев путем имитационного моделирования [7]. Уравнения (5) и (6) решались численно по явной схеме метода конечных разностей с первым порядком аппроксимации по пространственной переменной и по времени по аналогии с работой [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение устойчивого развития эколого-экономических систем требует применения механизмов иерархического управления, содержащих административные, экономические и психологические составляющие и предполагающих применение методов иерархического управления—принуждения, побуждения и убеждения.

Метод принуждения позволяет поддерживать систему в устойчивом состоянии независимо от стратегий субъектов управления более низких уровней. Экономически такой подход к управле-

нию чаще всего оказывается невыгодным по сравнению с методом побуждения, который предоставляет всем субъектам управления большую свободу действий при принятии управленческих решений. С другой стороны, если у субъекта управления верхнего уровня недостаточно экономических рычагов воздействия на остальных субъектов управления, то метод побуждения может не работать, в то время как метод принуждения позволяет поддерживать систему в устойчивом состоянии.

Наиболее эффективным методом управления устойчивым развитием системы является метод убеждения, подразумевающий добровольную кооперацию субъектов управления для достижения цели, объективно отвечающей их общим интересам. В этом случае устойчивое развитие эколого-экономической системы достигается наиболее экономически выгодным для обоих субъектов управления способом.

Выбор метода управления в конкретной системе зависит от объективных (имеющихся у Ведущего возможностей воздействия на Ведомого, преследуемых им целей) и субъективных условий (уровня культуры субъектов управления).

Математические модели, разработанные в соответствии с приведенными принципами организации систем управления, применяются в системе Ростовского областного комитета по охране окружающей среды и природным ресурсам для решения задач, связанных с контролем качества речных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рюмина Е.В. Анализ эколого-экономических взаимодействий. — М.: Наука, 2000. — 158 с.
2. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. — М.: Прогресс-Традиция, 2000. — 415 с.
3. Новая парадигма развития России. Комплексные исследования проблем устойчивого развития / Под ред. В.А. Коптюга, В.М. Матросова, В.К. Левашова. — М.: Academia; Изд-во МГУК, 1999. — 459 с.
4. Угольницкий Г.А. Управление эколого-экономическими системами. — М.: Вузовская книга, 1999. — 132 с.
5. Лаукс Д., Стединжер Дж., Хейт Д. Планирование и анализ водохозяйственных систем. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 400 с.
6. Фатхутдинов Р., Сивкова Л. Принуждение, побуждение, убеждение: новый подход к методам управления // Управление персоналом. — 1999. — № 2. — С. 32—40.
7. Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Методы иерархического управления качеством воды с учетом манипуляции центра и триггеры предприятий // Водные ресурсы. — 2004. — Т. 3, № 3. — С. 375—382.

e-mail: ougoln@mail.ru, usov@math.rsu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д.А. Новиковым. □