

УДК 517.7+330.46

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. Дана математическая формализация указанных методов иерархического управления в системе контроля качеством речных вод. Проведен их сравнительный анализ, сделаны выводы о достоинствах и недостатках каждого из них.

Введение

В последние десятилетия ускоренными темпами происходит 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 использование 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. Основой стратегии устойчивого развития является 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]. Простейшей схемой иерархически управляемой динамической системы является двухуровневая система, включающая в себя:

- источник воздействия верхнего уровня (Ведущий);
- источник воздействия нижнего уровня (Ведомый);
- 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, изготавливают необходимый обществу конечный продукт. В окружающую среду при этом попадают продукты технологического процесса – различного вида отходы.

Основной смысл введения понятия иерархически 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 как поощрительные, так и принудительные элементы регулирования. Основу этого механизма составляют платежи за пользование природными ресурсами и экономические санкции за экологическое правонарушение. Одной из основных научных задач при этом является разработка 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 ниже 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 неединственным образом. Поэтому помимо основной цели он стремится к максимизации остающихся в его распоряжении средств, поступающих от предприятий.

Целевая функция центра имеет вид

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

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

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

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

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

Здесь t - временная координата; $W_i(t)$ ($(1-P_i(t)) W_i(t)$) – количество загрязнений, сбрасываемых в реку до (после) очистки сточной воды в момент времени t ; $P_i(t)$ - доля загрязнений, удаляемых на i -м предприятии в процессе очистки сточных вод; FS_i , FN_i , FP_i – функции платежей (рис. 1-3), которые платят предприятия 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 $(1-P_i(t)) W_i(t)$; s , KN_i , 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; $W1$, $W2$ – установленные законодательством нормативы сброса загрязнений; $C_A(y(t))$ - функция, в которой отражены 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 -о предприятия от реализации произведенной продукции при величине 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 величины производственных фондов. Функция $VS_i(W_i, P_i)$ отражает затраты i -о предприятия на очистку сточных вод. Предполагается, что выполнены следующие соотношения

$$VK_i(\Phi_i) + H(\Phi_i) = \mu_i R_i(\Phi_i); \mu_i = \text{const}; \quad VS_i(W_i, P_i) = W_i C_p(P_i)$$

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

Цель предприятий состоит в максимизации прибыли, полученной в ходе производственной деятельности, то есть ($i=1, 2, \dots, N$)

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

$$\rightarrow \max \{P_i\}$$

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

$$W_i = \beta_i R_i(\Phi_i), \quad R_i(\Phi_i) = \gamma_i \Phi_i^{0.5}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad \gamma_i, \beta_i = \text{const} \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial B(x,t)}{\partial t} + v_x \frac{\partial B(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[EA \frac{\partial B(x,t)}{\partial x} \right] - k_c B(x,t) + \frac{W^o(x,t) (1 - P^o(x,t))}{A}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial B^o(x,t)}{\partial t} + v_x \frac{\partial B^o(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[EA \frac{\partial B^o(x,t)}{\partial x} \right] - k_c B(x,t) + \quad (6)$$

$$K_o [B_{\text{нас}}^o - B^o(x,t)] + F_0 - F_1 - F_2$$

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; $K_o [B_{\text{нас}}^o - B^o(x,t)]$ - добавка растворенного кислорода вследствие реэрации; $B_{\text{нас}}^o$ - концентрация насыщения кислорода; F_0 - добавка вследствие фотосинтеза; F_1 - потребление растворенного кислорода на дыхание; F_2 - придонное потребление растворенного кислорода.

Функции W^o , P^o отражают наличие источников загрязнений и определяются формулами

$$P^o(x,t) = \begin{cases} 0 & \text{если } x \neq x_i; \quad i = 1, 2, \dots, N \\ P_i(t) & \text{в противном случае} \end{cases}; \quad W^o(x,t) = \begin{cases} 0 & \text{если } x \neq x_i; \quad i = 1, 2, \dots, N \\ W_i(t) & \text{в противном случае} \end{cases}$$

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

Оптимизационные задачи (1),(2) решаются при следующих ограничениях на управления ($i = 1, 2, \dots, N$)

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

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

где значения величин KS_{\max} , 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

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

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

где $Q_i^o(t)$ - расход воды на i -м предприятии; величины B_{\max} , B_{\min}^o , 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

Достижение устойчивого развития эколого-экономической системы может осуществляться 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, то есть Ведущий запрещает Ведомому использовать стратегии, не удовлетворяющие требованиям устойчивого развития. При этом 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 побуждения заключается в том, чтобы сделать управления устойчивого развития экономически наиболее выгодными для Ведомого. Для этого используется 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, в данном случае 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 [6]. Формализуем указанные методы управления в случае (1)-(10).

4. Формализация методов иерархического управления

Основная цель центра состоит в выполнении неравенств (9), (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 (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, за счет выбора величин q_i - минимально допустимых степеней очистки сточных вод.

Алгоритм построения равновесия принуждения состоит в следующем:

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

2) Метод принуждения предполагает, что величины платы за единицы сброшенных загрязнений (KN_i, KS_i) при решении оптимизационных задач остаются неизменными и максимизация (1) проводится только по величинам $q_i; i=1,2,\dots,N$. Оптимальными для центра являются величины $(q_i)^*$, которые максимизируют его целевую функцию и позволяют выполнить стандарты качества речной и сточных вод. Таким образом, решается задача (1), (8) с требованиями (9), (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 (величины $q_i; i=1,2,\dots,N$ остаются постоянными) и создает условия, при которых предприятиям выгодно придерживаться стандартов качества вод.

Алгоритм построения равновесия побуждения:

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

2) В методе побуждения критерий центра (1), в котором величины P_i определяются на первом шаге алгоритма, максимизируется по $KN_i, KS_i, i=1,2,\dots,N$ (величины $q_i(t)$ не меняются) с условиями (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 (1), (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 с ограничениями (7), (9), (10).

5. Модельные расчеты

Все расчеты проводились в случае $C_p(Y) = D \frac{Y}{1-Y}$; $C_A(y) = C_1 y$.

Пример 1 (побуждение). Для следующего набора входных данных (у.е. – стоимость в условных единицах; сут – сутки; м – метр; мг – миллиграмм; л - литр)

$N = 1; D = 1; KN_{\max} = 8; KS_{\max} = 10; \beta_1 = 0.01$ 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; $E = 24000$ м 2 / сут.; $\varepsilon = 0.01$; $\nu_1 = 0.24$; $\mu_1 = 0.5$;
 $\Phi_0=5 \cdot 10^9$ у.е.; $q_1=0$; $C_1=1$; $S_1=1$; $Y_1=0$; $W1=0.25\beta_1 \gamma_1 (\Phi_0)^{1/2}$; $W2=0.5 \beta_1 \gamma_1 (\Phi_0)^{1/2}$; $Q_{\max} = 60$;
 $B^0=B=12$ мг/л (при $t=0$; при $x=0, L$); $x_1=30$ м; $B^0_{\text{нас}}=22$ мг/л; $B_{\max}=35$ мг/л; $B_{\min}^0=3$ мг/л;
 $F_0=F_1=F_2=0$ мг/(л сут.); $\nu_x=100$ м/сут; $\Delta=360$ сут; $K_0=5$ 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 величин 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.

$$(KN_1)^* = 0; (KS_1)^* = 0; (P_1)^* = 0.99; J_0 = 6.09 \cdot 10^5 \text{ у.е.}; J_1 = 1.93 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

Пример 5 (побуждение). При $D = 4$, $S_1 = 20$ и входных данных примера 1 получим, что:

$$(KN_1)^* = 8; (KS_1)^* = 0; (P_1)^* = 0.7425; J_0 = 7.1 \cdot 10^5 \text{ у.е.}; J_1 = 1.234 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

Пример 6 (принуждение). В случае данных примера 1 и $S_1 = 0.1$ (величины q_i - являются переменными и подлежат определению) и $KN_1 = 6$; $KS_1 = 8$ метод принуждения (в отличие от примера 2) реализуется и выполняются равенства

$$(q_1)^* = 0.7425; (P_1)^* = 0.7425; J_0 = 7.63 \cdot 10^5 \text{ у.е.}; J_1 = 1.62 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

Пример 7 (принуждение). Для данных примера 1 и $KN_1 = 6$; $KS_1 = 8$ прибыль предприятия уменьшилась, центра – незначительно выросла

$$J_0 = 5.81 \cdot 10^5 \text{ у.е.}; J_1 = 1.57 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

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

$$(q_1)^* = 0.7425; (P_1)^* = 0.7425.$$

Прибыль центра уменьшилась, а прибыль предприятия немного выросла.

$$J_0 = 6.05 \cdot 10^5 \text{ у.е.}; J_1 = 1.8 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

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

$$(q_1)^* = 0.866; (P_1)^* = 0.9745; J_0 = 6.5 \cdot 10^5 \text{ у.е.}; J_1 = 1.65 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

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

$$(q_1)^* = 0.2475; (P_1)^* = 0.7115; J_0 = 8.56 \cdot 10^5 \text{ у.е.}; J_1 = 9.5 \cdot 10^5 \text{ у.е.}$$

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.

$$J_c = 1.84 \cdot 10^7 \text{ у.е.}$$

Пример 12 (убеждение). Для данных примера 4 также наблюдается значительный рост совместной прибыли субъектов управления, а именно

$$(P_1)^* = 0.866; J_c = 6.278 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

Пример 13 (убеждение). В случае данных примера 5 имеем

$$(P_1)^* = 0.6834; J_c = 4.85 \cdot 10^6 \text{ у.е.}$$

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

Заключение

Обеспечение устойчивого развития эколого-экономических систем требует применения механизмов иерархического управления, включающих 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 управлению 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, используются в системе Ростовского областного комитета по охране окружающей среды и природным ресурсам при решении 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 контригры предприятий// Водные ресурсы. - 2004. - №3. т.31. - С.375-382.

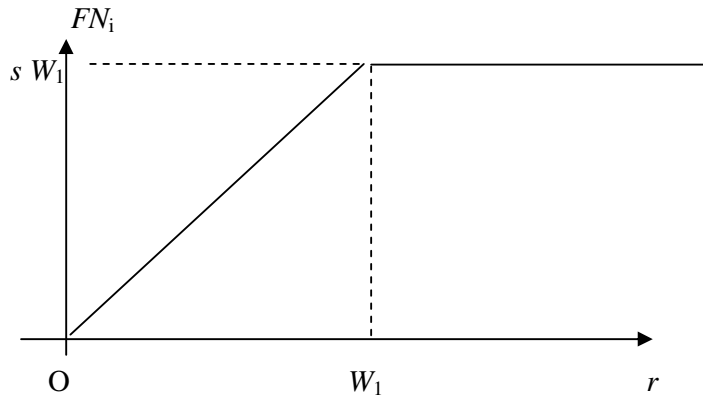


Рис.1. Зависимость функции FN_i от аргумента $r = (1-P_i(t)) W_i(t)$.

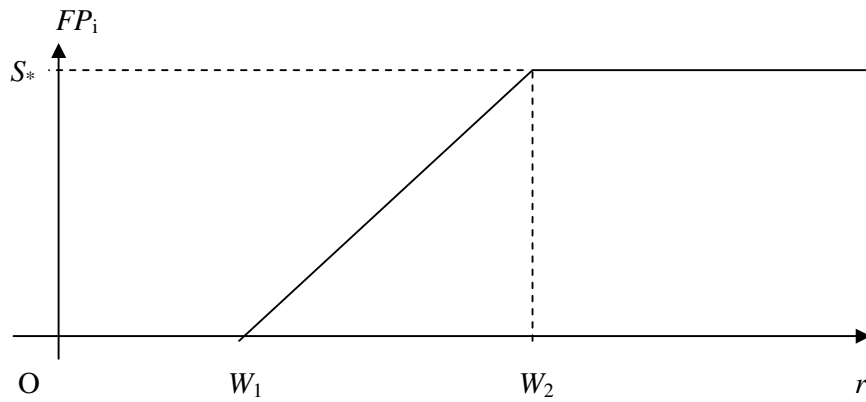


Рис.2. Зависимость функции FP_i от аргумента $r = (1-P_i(t)) W_i(t)$,
причем $S^* = s KN_i (W_2 - W_1)$.

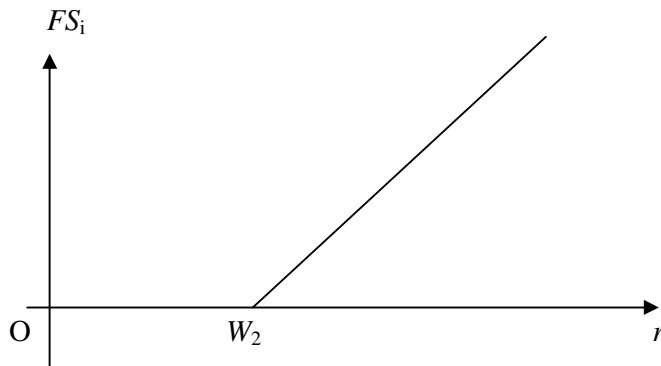


Рис.3. Зависимость функции FS_i от аргумента $r = (1-P_i(t)) W_i(t)$.

Математическая формализация методов иерархического управления эколого-экономическими системами

Г.А. Угольницкий; А.Б. Усов

Авторы Угольницкий Геннадий Анатольевич

д.ф.-м.н., профессор, Южный федеральный университет,

зав. кафедрой ПМиП;

344022, г. Ростов-на-Дону, пер. Журавлева 104, кв. 85

тел.(д)(863) 220-89-69

E-mail: ougoln@math.rsu.ru

Усов Анатолий Борисович,

к.ф.-м.н. доцент, Южный федеральный университет;

344002, г. Ростов-на-Дону, пр.Семашко 50, кв. 29,

тел.(д) (863) 240-40-29.

E-mail: usov@math.rsu.ru

The mathematical formalization of the hierarchical control methods of the ecology-economic systems

G.A. Ougolnitsky, A.B. Usov

In this paper there are formulated the general approaches to control of the ecology-economic systems. There are offered the methods of the hierarchical control (the methods of the compulsion, impetus and persuasion). The top-level subject of control obtains the execution of the requirements of the system sustainable development, using these methods of control. In this paper there is brought the mathematical formalization of hierarchical control methods in control system of river water quality. There are conducted its comparative analysis and made conclusion about value and defect of these methods.