

---

**УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ  
И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

---

УДК 519.711.2+504.064.3

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

© 2007 г. Г. А. Угольницкий, А. Б. Усов

*Ростов-на-Дону, Южный федеральный ун-т*

Поступила в редакцию 09.01.07, после доработки 03.07.07 г.

Сформулированы основные функции информационно-аналитической системы управления эколого-экономическими объектами, приведены принципы и укрупненная схема ее организации. Предлагаемая система базируется на концепции иерархически управляемых динамических систем. Приведен пример модели, входящей в состав системы. Сделаны выводы о структуре информационно-аналитической системы управления эколого-экономическими объектами и применяемых в ней методах управления.

**Введение.** На современном этапе развития общества, при увеличивающейся антропогенной нагрузке на природную среду к режимам функционирования большинства промышленных предприятий предъявляются все более жесткие экологические требования. Выполнение экологических нормативов, как правило, вступает в противоречие с экономической эффективностью работы предприятий. Сегодня приоритетным стало экологически сбалансированное экономическое развитие, что нашло отражение в понятии эколого-экономического объекта как совокупности взаимосвязанных экономических, социальных и природных факторов в окружающем человека мире [1]. Это понятие объединяет взаимодействующие экономическую и экологическую системы, причем экономическая составляющая рассматривается нами преимущественно как источник хозяйственного воздействия на экологическую систему.

Исследование экологической обстановки в регионах, выработка рекомендаций по ее улучшению и рациональному использованию кладовых природы, решение многочисленных вопросов, связанных с природоохранной деятельностью, невозможно без комплексного подхода к проблеме, предполагающего создание информационно-аналитических систем (ИАС) управления эколого-экономическими объектами. В них особое внимание должно уделяться состоянию экологической системы в условиях хозяйственного воздействия на нее. ИАС управления эколого-экономическими объектами способствуют решению основных задач оперативного и долгосрочного управления, а также управления в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. Эффективность подобного управления в значительной мере зависит от степени эффективности информационной поддержки, которая обеспечивается ИАС, являющейся мощным инструментом для выработки

альтернативных вариантов действий, анализа последствий их применения и совершенствования навыков руководителя при принятии управленческих решений.

Основные вопросы, возникающие при разработке и проектировании ИАС, связаны с определением ее назначения, структуры и содержания. Вопросам создания ИАС управления эколого-экономическими объектами посвящено значительное количество работ, например [2–6]. Имеется ряд разработанных и успешно действующих программных комплексов, например, системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области [2]; центральной частью Московского артезианского бассейна; информационно-аналитическая система контроля экологического состояния окружающей среды и природопользования городов и районов Ростовской области и многие другие. Тем не менее, по-прежнему, острыми остаются вопросы разработки оптимальной структуры ИАС, определения ее целей и стоящих перед ней задач. Существует настоятельная необходимость в создании общего подхода к проектированию подобных систем.

Поскольку многие проблемы построения ИАС управления имеют общий характер независимо от параметров конкретного эколого-экономического объекта, требуется построение общей концепции ИАС управления эколого-экономическими объектами, в которой должны быть сформулированы главные задачи управления и планирования, общая структура и принципы их организации.

В отличие от большинства работ в основе предлагаемой ИАС лежит концепция иерархически управляемых динамических систем, что находит отражение в используемых нами оптимизационных моделях. При формулировке основных за-

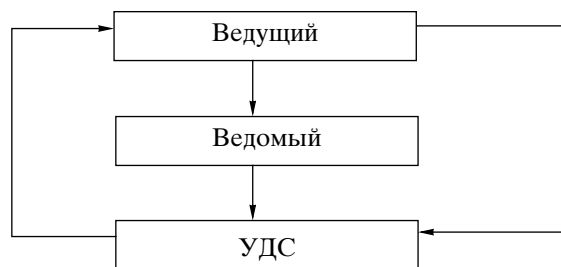


Рис. 1. Двухуровневая система управления

дач, стоящих перед ИАС, учитывается специфика управления эколого-экономическими объектами, особенности их организации, а при построении математических моделей, входящих в состав ИАС – иерархическая структура систем управления. В качестве методов управления используется три метода – методы побуждения, принуждения и убеждения [7–9]. Отметим, что ИАС управления эколого-экономическими объектами, разработанная в соответствии с приведенными принципами, может и должна использоваться лицами, принимающими управленческие решения, для организации эффективного управления эколого-экономическими системами на местном, и региональном уровнях.

**1. Принцип построения ИАС.** Современные системы управления обычно устроены по иерархическому принципу: имеется несколько субъектов управления, отношения между которыми носят иерархический характер. Поэтому представляется полезным при проектировании ИАС использовать концепцию иерархически управляемой динамической системы [1,10], простейшей из которых является двухуровневая система, включающая в себя (рис. 1):

источник воздействия верхнего уровня (ведущий);

источник воздействия нижнего уровня (ведомый);

управляемую динамическую систему (УДС).

В качестве ведущего чаще всего выступают органы государственного контроля (например, комитет по охране окружающей среды), в роли ведомых – промышленные предприятия, а в качестве УДС может выступать как целиком вся экологическая система региона, так и отдельные ее составляющие, например, некоторый водный объект.

Взаимоотношения внутри 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. Воздействуя на УДС, ведомый преследует свои частные цели (например, получение

максимальной прибыли в процессе производства). Эти цели, вообще говоря, не совпадают с объективно существующими целями устойчивого развития УДС, которая никак воздействовать на ведомого не может и является пассивным объектом. Поэтому нужен ведущий, который, воздействуя на ведомого и УДС, способен обеспечить выполнение условий, гарантирующих устойчивое развитие УДС.

Таким образом, для успешного решения различных оперативных и стратегических задач управления эколого-экономическими системами, даже на уровне одного отдельно взятого региона необходимо создание ИАС, базирующейся на современных компьютерных технологиях и концепции иерархически управляемых динамических систем, наиболее точно отражающих структуру реальных систем управления.

**2. Назначение ИАС.** Поскольку структура, характер и полнота наполнения ИАС определяется задачами, которые ставятся перед такой системой, то мы, в первую очередь, определим ее основные функции.

ИАС управления эколого-экономическими объектами должна способствовать решению задач, связанных с гидрологическими и гидродинамическими характеристиками рассматриваемой экологической системы, с экономическими и социально-экономическими аспектами использования природных ресурсов и с управлением природоохранной деятельностью. ИАС должна обеспечить:

1) хранение, накопление, возможность пополнения и корректировки всей имеющейся информации не только об экологическом состоянии рассматриваемых объектов (данные натурных измерений прошлых лет, текущего экологического мониторинга, топографические, справочно-информационные и т.д.), но и об экономической и социальной обстановке в регионе;

2) возможность прогнозирования изменения состояния исследуемой экологической системы в целом и отдельных составляющих ее экосистем при тех или иных сценариях внешнего (в том числе антропогенного) воздействия на нее (путем качественного, численного и имитационного анализа системы);

3) хранение и пополнение экспертной информации о системе, как на основе состояния системы в прошлом, так и в результате прогноза ее состояния в будущем и заключений экспертов;

4) простой и наглядный способ представления всей имеющейся или полученной информации в удобном для пользователя виде (графическом и текстовом, автономном и диалоговом);

5) помощь лицам, подготавливающим или принимающим решения в области управления водохозяйственными системами, как в виде конкретных рекомендаций, так и в виде результатов ана-

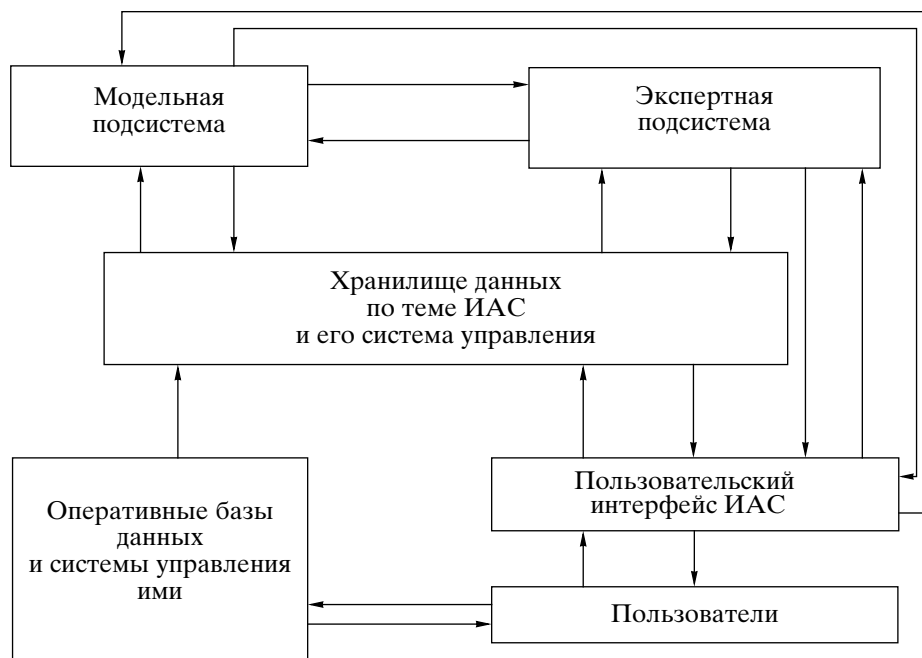


Рис. 2. Структура ИАС управления качеством водных ресурсов

лиза разнообразной информации, которую позволяет получить ИАС по данному вопросу. Например, на основании анализа ретроспективных данных или прогноза последствий принятия различных вариантов решений. Последнее может быть осуществлено как с помощью непосредственного моделирования отклика экологической системы на принятые решения, так и с помощью исследования базы знаний накопленных экспертных оценок подобных ситуаций.

Экспертиза может осуществляться, например, путем анализа результатов прогноза, полученных по заранее разработанным сценариям и оформленных в виде одной из баз общего блока экспертных оценок. Сценарии при этом разрабатываются на основании мнений высококвалифицированных экспертов и пожеланий соответствующих заинтересованных организаций.

Основная научно-техническая и практическая ценность ИАС управления эколого-экономическими объектами состоит в:

формализации системы экологического контроля, повышении эффективности ее функционирования;

организации оперативного коллективного доступа к банкам экологических данных подразделений и служб регионального природоохранного органа;

осуществлении информационной поддержки принятия решений; повышении достоверности данных мониторинга за счет автоматизированного контроля их непротиворечивости;

возможности реализации эффективного экологического контроля за деятельностью промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

**3. Структура ИАС.** Для решения всех указанных задач предлагается следующая укрупненная схема ИАС управления эколого-экономическими объектами (рис. 2). ИАС состоит из трех блоков: хранилища данных (СУБД и анализ данных), базы моделей (модели, методы, моделируемые процессы), и экспертной системы.

Хранилище данных представляет собой совокупность баз данных, в которых хранится вся имеющаяся информация о каждом из экологических объектов в отдельности и всей системы в целом. Кроме того, в виде баз данных или электронных таблиц здесь хранятся справочные данные, необходимые для работы других блоков системы.

База моделей содержит как модели отдельных экологических подсистем, так и модели, описывающие свойства совокупности рассматриваемых объектов. Здесь же находятся модели воздействия (в первую очередь, антропогенного) и ряд других моделей. Этот блок активно связан с хранилищем данных. Сведения из хранилища данных используются базой моделей для верификации моделей и при непосредственной работе самих моделей.

Экспертная система представляет собой базу знаний моделей управления, которую можно условно разделить на две части. В первой содержится известная информация и заранее разработанные модели управления. Здесь находится база всех документов, регламентирующих использова-

ние ресурсов экосистемы и имеющих отношение к управлению природными ресурсами разного уровня, а также модели (сценарии) управления, предписанные и определенные имеющимися документами. Сюда же включена база результатов прогноза последствий тех или иных экологических ситуаций, полученных по заранее разработанным сценариям.

Вторая часть экспертного блока использует информацию, модели и данные иного рода – экспертные, основанные на знаниях, опыте, интуиции специалистов-экспертов в области управления эколого-экономическими объектами. Они должны непрерывно пополняться по мере использования ИАС.

Все три блока объединяются общей программной оболочкой (интерфейс и авторизация), которая дает возможность пользователю работать с каждой базой данных и любой моделью как в автономном режиме, так и во взаимодействии друг с другом. Все базы данных и базы знаний являются открытыми для пополнения и корректировки имеющейся в них информации, в том числе на основании данных мониторинга.

Взаимодействие различных блоков опишем на примере. Имея определенную цель и исходные данные поставленной задачи, с помощью предлагаемой ИАС пользователь может выбрать модель (из базы моделей), метод управления и необходимую для проведения расчетов входную информацию (из хранилища данных). С помощью имитационного моделирования осуществляется прогноз развития состояния исследуемого эколого-экономического объекта (или отдельных его составляющих) во времени и пространстве. Полученная информация анализируется экспертной системой, с широким использованием базы знаний (хранилища данных) и справочно-информационных данных.

В результате вырабатываются рекомендации субъектам управления различных уровней с учетом тех целей, которые они преследуют. Если решение не найдено, то происходит уточнение входных данных задачи или изменение метода управления и повторение процесса поиска решения. Подобный итерационный процесс приводит к конкретным рекомендациям лицам, принимающим решения.

#### 4. Интерфейс и возможности пользователя.

Особое место в ИАС управления эколого-экономическими объектами занимает интерфейсная часть. ИАС должна обладать простой и доступной программной оболочкой с развитым интерфейсом. Развитая система интерфейса позволит организовать диалог системы с пользователем на всех этапах решения задачи (при вводе входных данных, проведении имитационных расчетов и выдаче рекомендаций) и выдачу информации

пользователю в наиболее удобном виде. Пользователь ИАС должен обладать следующими возможностями:

- выбора и идентификации модели;
- варьирования параметров модели в диалоговом режиме;
- конкретизации метода управления и режима работы системы.

В ИАС должны быть предусмотрены следующие режимы работы системы:

- идентификационный (идентификация модели);
- имитационный (проведение имитационных расчетов);
- экспертный (анализ полученных ранее результатов, имеющихся баз данных и моделей и выдача рекомендаций по оптимальному управлению субъектам управления различных уровней).

**5. Модели, используемые в ИАС.** Для иллюстрации возможностей предлагаемой ИАС и используемых в ней моделей, рассмотрим одну из них, используемую в аналитическом блоке ИАС при оценке качества речных вод. Пусть вдоль реки расположено  $N$  промышленных предприятий (ПП), которые сбрасывают загрязняющие вещества (ЗВ) в реку вместе со сточными водами. Для простоты рассмотрим случай только одного вида ЗВ, например, азотосодержащих ЗВ. В предлагаемой ИАС предусмотрена возможность выбора пользователем до пяти ЗВ из предоставляемого списка.

Деятельность ПП (ведомого) контролируется правительственным органом (центром, ведущим). ПП стремятся к максимизации своей прибыли и, следовательно, хотят разместить отходы своих производств без затрат на их утилизацию. Ведущий (центр), регулирующий качество речной и сточных вод, взимает с предприятий плату за сброс ЗВ.

Цель центра – максимизация остающихся у него средств после проведения природоохранных мероприятий по очистке речных вод. Его целевая функция имеет вид

$$J_0 = \int_0^{\Delta} \left\{ -C_A(y(t)) + \sum_{i=1}^N F_i(T_i(t)) \times (1 - P_i(t)) W_i(t) \right\} dt \rightarrow \max_{\{T_i, q_i\}_{i=1}^N}, \quad (5.1)$$

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

Здесь  $t$  – временная координата;  $T_i(F_i(T_i))$  – размер (функция) платы за единицу сброшенных ЗВ на  $i$ -м предприятии в момент времени  $t$ ;  $W_i((1 - P_i)W_i)$  – количество ЗВ, сбрасываемых в реку  $i$ -м предприятием до (после) очистки сточной воды в единицу

времени;  $P_i(t)$  доля ЗВ, удаляемых на  $i$ -м предприятии в процессе очистки сточных вод;  $C_A$  – функция затрат центра на улучшение качества речной воды, зависящая от общего количества сброшенных в реку ЗВ;  $\Delta$  – момент времени, до которого ведется рассмотрение;  $q_i(t)$  – минимально допустимые степени очистки сточных вод на предприятиях, определяемые центром.

Цель предприятий – максимизация прибыли, полученной в результате хозяйственной деятельности, за вычетом затрат, связанных с очисткой сточных вод на предприятиях и платой за сброс ЗВ в водоток. Целевые функции предприятий записываются как

$$J_i = \int_0^{\Delta} \{z_i R_i(\Phi_i) - C_p(P_i(t)) W_i(t) - F_i(T_i(t))\} \times [1 - P_i(t)] W_i(t) dt \rightarrow \max_{P_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5.2)$$

где  $C_p(P_i)$  – функции затрат  $i$ -го предприятия на очистку единицы сбрасываемых загрязнений от ЗВ;  $\Phi_i$  – производственные фонды;  $R_i(\Phi_i)$  – производственная функция  $i$ -го предприятия;  $z_i(t)$  – прибыль предприятия от реализации единицы произведенной продукции в момент времени  $t$ .

Динамика изменения производственных фондов  $i$ -го ПП описывается обыкновенным дифференциальным уравнением вида

$$\frac{d\Phi_i}{dt} = -k_i \Phi_i + Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5.3)$$

$$\Phi(0) = \Phi_0,$$

где  $k_i$  – коэффициент амортизации производственных фондов;  $Y_i$  – инвестиции в производство, которые можно считать как постоянной величиной, так и зависящей от полученной ПП прибыли; величина  $\Phi_0 = \text{const}$  задана.

Пусть общее количество сбрасываемых ЗВ (до очистки) зависит от количества произведенной на ПП продукции линейно и производственные функции имеют вид

$$W_i = \beta_i R_i(\Phi_i), \quad R_i(\Phi_i) = \gamma_i \Phi_i^{0.5}, \quad (5.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad \gamma_i, \beta_i = \text{const}.$$

Основные характеристики качества речной воды – концентрация ЗВ ( $B(x, y, z, t)$ ) и концентрация растворенного в воде кислорода  $B^o(x, y, z, t)$  описываются в общем случае нелинейными уравнениями переноса, с учетом временной и пространственной неоднородности по каждому из трех направлений.

В ИАС предусмотрена возможность расчета концентрации ЗВ и растворенного в воде кислорода, исходя из линейных обыкновенных дифферен-

циальных уравнений (решаемых аналитически), нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных (которые решаются численно методами конечных разностей и конечных элементов). Например, в случае пространственной неоднородности только вдоль русла реки эти уравнения имеют вид

$$\frac{\partial B(x, t)}{\partial t} + v_x \frac{\partial B(x, t)}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[ EA \frac{\partial B(x, t)}{\partial x} \right] - k_c B(x, t) + \frac{W^o(x, t)(1 - P^o(x, t))}{A}, \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial B^o(x, t)}{\partial t} + v_x \frac{\partial B^o(x, t)}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[ EA \frac{\partial B^o(x, t)}{\partial x} \right] - k_c B(x, t) + K_o [B_{\text{sat}}^o - B^o(x, t)] + F_0 - F_1 - F_2, \quad (5.6)$$

где  $x$  – пространственная координата, отсчитываемая вдоль русла реки;  $0 \leq x \leq L$ ;  $L$  – длина реки;  $E$  – коэффициент дисперсии;  $A$  – площадь поперечного сечения реки;  $v_x$  – скорость воды в реке;  $k_c B$  – изменение во времени биохимического потребления кислорода из-за распада;  $B_{\text{sat}}^o$  – концентрация насыщения кислорода;  $K_o [B_{\text{sat}}^o - B^o]$  – добавка растворенного кислорода вследствие реаэрации;  $F_0$  – вследствие фотосинтеза;  $F_1$  – потребление растворенного кислорода на дыхание;  $F_2$  – придонное потребление кислорода. Функции  $W^o, P^o$  отражают наличие источников поступления ЗВ в водоток и определяются формулами

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

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

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

Уравнения (5.5), (5.6) рассматриваются с соответствующими начальными и граничными условиями.

Задачи (5.1), (5.2) решаются при следующих ограничениях на управления:

$$q_i \leq P_i \leq 1 - \varepsilon; \quad 0 \leq t \leq \Delta, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5.7)$$

$$0 \leq q_i \leq 1 - \varepsilon; \quad 0 \leq T_i \leq T_{\text{max}}, \quad (5.8)$$

$$0 \leq t \leq \Delta, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где значение величины  $\varepsilon$  определяется технологическими возможностями ПП по очистке сточных вод;  $T_{\text{max}}$  – задано.

Известны государственные стандарты на концентрации ЗВ в водотоке, на концентрацию растворенного в воде кислорода

$$0 \leq B \leq B_{\max}, \quad B_{\min}^o \leq B^o \quad (0 \leq t \leq \Delta) \quad (5.9)$$

и качество сточной воды, сбрасываемой в водоток ( $0 \leq t \leq \Delta$ )

$$\sum_{i=1}^N \frac{W_i(t)[1 - P_i(t)]}{Q_i^o(t)} \leq Q_{\max}, \quad (5.10)$$

где  $Q_i^o(t)$  – расход воды на  $i$ -м предприятии в момент времени  $t$ ; величины  $B_{\max}$ ,  $B_{\min}^o$ ,  $Q_{\max}$  – заданы.

Модель описывается системой уравнений и неравенств (5.1)–(5.10). Моделирующий блок ИАС объединяет набор подобных оптимизационных и имитационных моделей. Все оптимизационные модели строятся с учетом иерархии в отношениях между субъектами управления. Кроме того, в состав аналитического блока входит множество различных стационарных и нестационарных математических моделей для описания динамики распространения загрязнений в различных средах, в частности, в водотоке.

**6. Методы иерархического управления.** Основная цель ведущего (центра) состоит в выполнении неравенств (5.9), (5.10), что позволяет поддерживать УДС в устойчивом состоянии. Гарантировать выполнение условий (5.9), (5.10) ведущий может не единственным образом, поэтому помимо своей основной цели, он стремится к оптимизации целевой функции (5.1). Добиться своих целей ведущий может, используя различные методы управления [7–9], выбор которых, как и самой математической модели, осуществляется пользователем ИАС из предоставленного системой списка. Остановимся подробнее на методах управления, предусмотренных в ИАС для модели (5.1)–(5.10).

**6.1 Принуждение.** В случае принуждения ведущий (центр) воздействует на область допустимых управлений ведомых (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. Предприятия вынуждены соблюдать стандарты качества в силу ограничений (5.7).

Алгоритм построения равновесия принуждения состоит в следующем:

1) в результате минимизации критериев (5.2) с ограничениями (5.7) и соотношениями (5.3) определяются оптимальные стратегии предприятий в зависимости от управлений центра  $(P_i)^*(T_i, q_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;

2) метод принуждения предполагает, что величины платы за единицы сброшенных загрязнений  $(T_i)$  при решении оптимизационных задач остаются неизменными и максимизация критерия центра (5.1) осуществляется только по переменным  $q_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$ . Оптимальными для центра являются величины  $(q_i)^*$ , которые максимизируют их целевую функцию и позволяют выполнить стандарты качества речной и сточных вод [7, 8]. Решается задача (5.1), (5.8) с требованиями (5.9), (5.10).

3) равновесие принуждения имеет вид  $\{(q_i)^*, (P_i)^*\}_{i=1}^N$ , где  $(P_i)^*$  – оптимальные реакции предприятий на выбранную центром стратегию, причем  $(P_i)^* = (P_i)^*((q_i)^*, T_i)$

**6.2. Побуждение.** Метод побуждения предполагает, что ведущий (центр) воздействует на целевые функции ведомых. Он назначает размер платы за единицы сброшенных загрязняющих веществ (величины  $q_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$  в процессе оптимизации остаются постоянными) и создает условия, при которых ведомым (предприятиям) выгодно придерживаться стандартов качества речной и сточной вод [7, 8].

Задача поставлена корректно, если центр имеет достаточные экономические рычаги воздействия на предприятия, то есть максимально допустимый размер платы за сброс загрязнений  $(T_{\max})$  позволяет центру сделать для предприятий выгодным выполнение стандартов качества речной и сточных вод.

Алгоритм построения равновесия побуждения:

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

2) в методе побуждения критерий центра (5.1), в котором величины  $P_i$  определяются на первом шаге алгоритма, максимизируется по  $T_i$   $i = 1, 2, \dots, N$  (при этом величины  $q_i(t)$  не меняются) с условиями (5.8) и (5.9), (5.10).

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

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

**6.3. Убеждение.** Если Ведомый (предприятие) понимает важность задачи улучшения экологической обстановки в регионе и сам стремится поддерживать УДС в устойчивом состоянии, то

вместо отдельных критериев (5.1), (5.2), у всех субъектов управления будет один общий критерий

$$J = \int_0^{\Delta} \left[ -C_A(y(t)) + \sum_{i=1}^N (z_i R_i(\Phi_i) - C_p(P_i) W_i(t)) \right] \rightarrow \max(\{P_i\}_{i=1}^N), \quad (6.1)$$

рассматриваемый с ограничениями (5.7), (5.9), (5.10).

Распределение совместной прибыли, полученной при максимизации критерия (6.1), между субъектами управления осуществляется согласно некоторому кооперативному принципу. Равновесия принуждения, побуждения и убеждения находятся путем имитации.

**Заключение.** В статье сформулированы основные принципы построения ИАС управления эколого-экономическими объектами, ее структура. Для более наглядного представления содержания аналитического блока ИАС приведен пример модели, используемой в ИАС, и возможные методы управления в ней.

ИАС, построенные на основе концепции иерархически управляемых динамических систем, в соответствии с изложенными принципами и подходами осуществляют упорядочивание системы сбора, учета, хранения и использования первичных материалов о природном объекте и всей эколого-экономической системе. Наряду с первичной обработкой данных в ИАС проводится их глубокая интеллектуальная обработка, предоставляющая более широкие возможности для выбора оптимальных управленческих решений. В ИАС предусмотрено использование разнообразных оптимизационных и имитационных моделей, реализованы алгоритмы их согласования и взаимодействия. Все модели строятся с учетом иерархии в отношениях между субъектами управления.

Кроме того, ИАС обеспечивают информационную открытость и прозрачность деятельности природоохранных органов, субъектов управления эколого-экономической системой различных уровней. ИАС предоставляет лицу, принимающему решение, возможность выбрать модель из банка моделей, применяемый метод управления и выдает конкретные рекомендации по оптимальному управлению эколого-экономическими объектами.

Относительно предусмотренных в ИАС методов управления эколого-экономическими объектами заметим следующее. Метод принуждения позволяет поддерживать УДС в устойчивом состоянии независимо от стратегий других субъектов управления, за счет накладываемых ограничений на области их допустимых управлений.

Экономически такой подход к управлению может оказаться невыгодным, по сравнению с методом побуждения, предоставляющим всем субъектам управления больше экономической свободы. Чрезвычайно интересен метод убеждения. Он, с одной стороны, эффективен при поддержании УДС в устойчивом состоянии, а с другой, наиболее экономически выгоден для всех субъектов управления. Его реализация предполагает высокую культуру, экологичность мышления у всех субъектов управления. Выбор конкретного метода управления зависит от объективных (имеющихся у ведущего возможностей воздействия на ведомого, преследуемых им целей) и субъективных условий (уровня культуры субъектов управления, масштаба их мышления).

Отдельные составляющие ИАС, разработанной в соответствии с приведенными принципами, используются в системе Ростовского областного комитета по охране окружающей среды и природным ресурсам.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Приведем несколько примеров использования ИАС управления эколого-экономическими объектами. Модельные расчеты проводились в случае

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

для различных методов управления.

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

$$T_i = 20 \text{ у.е.}; \quad F_i(T) = 2T; \quad i = 1, 2; \quad D = 5;$$

$$A = 100 \text{ м}^2; \quad T_{\max} = 1000 \text{ у.е.}; \quad \beta_i = 0.003 \frac{\text{мг}}{\text{сут у.е.}};$$

$$\gamma_i = 0.2 \text{ у.е.}; \quad k_i = 0.001 \text{ сут}^{-1}; \quad Q_i^0 = 10^6 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}};$$

$$i = 1, 2; \quad N = 2; \quad z_1 = 25 \text{ сут}^{-1}; \quad z_2 = 20 \text{ сут}^{-1};$$

$$B^0(x, 0) = B^0(L, t) = B^0(0, t) = 10 \frac{\text{мг}}{\text{л}}; \quad L = 100 \text{ м};$$

$$\Phi_0 = 10^{15}; \quad v_x = 300 \frac{\text{м}}{\text{сут}};$$

$$B(x, 0) = B(L, t) = B(0, t) = 5 \frac{\text{мг}}{\text{л}}; \quad E = 24000 \frac{\text{м}^2}{\text{сут}};$$

$$B_{\text{sat}}^0 = 18 \frac{\text{мг}}{\text{л}}; \quad B_{\max} = 14 \frac{\text{мг}}{\text{л}}; \quad \varepsilon = 0.001; \quad x_1 = 20 \text{ м};$$

$$x_2 = 60 \text{ м}; \quad C1 = 60 \frac{\text{сут у.е.}}{\text{мг}}; \quad \Delta = 365 \text{ сут};$$

$$k_c = 0.01 \text{ сут}^{-1}; \quad Y_i = 0 \text{ у.е.}; \quad k_o = 0.2 \text{ сут}^{-1};$$

$$B_{\min}^o = 4 \frac{\text{МГ}}{\text{л}}; \quad Q_{\max} = 0.4; \quad F_0 = F_1 = F_2 = 0 \frac{\text{МГ}}{\text{л сут}}$$

метод принуждения реализуется и

$$(q_i)^* = (P_i)^* = 1 - \varepsilon; \quad i = 1, 2; \quad R_0 = -5.68 \times 10^3 \text{ у.е.}$$

$$R_1 = -2.34 \times 10^{11} \text{ у.е.}; \quad R_2 = -2.45 \times 10^{11} \text{ у.е.}$$

где  $R_0$  – величина средств, поступивших от ПП к центру в виде платы за сброс ЗВ, за вычетом расходов на очистку речной воды;  $R_1, R_2$  – доходы предприятий.

В этом случае размер платы за единицу сброшенных ЗВ мал по сравнению с затратами центра на очистку речной воды, поэтому он заставляет ПП выбирать максимально допустимые степени очистки сточных вод. Для ПП производство нерентабельно и им выгодно, чтобы размер платы за сброс загрязнений был, с одной стороны, больше некоторой величины  $C_{\min}$  (для центра должна стать невыгодной максимально возможная степень очистки сточных вод на ПП), с другой – меньше величины  $C_{\max}$  (плата не должна быть “слишком большой” с точки зрения ПП).

**Пример 2** (принуждение). В случае входных данных примера 1 и  $T_i = 333 \text{ у.е.}; i = 1, 2$ , получим

$$(P_i)^* = (P_i)^*(T_i, 0) = 1 - \sqrt{D/F_i(T_i)} = 0.225;$$

$$(q_i)^* = 0; \quad i = 1, 2; \quad R_0 = 8.92 \times 10^6 \text{ у.е.};$$

$$R_1 = 5.22 \times 10^{10} \text{ у.е.}; \quad R_2 = 4.16 \times 10^{10} \text{ у.е.}$$

Центру стала выгодна наименьшая степень очистки сточных вод на предприятиях, позволяющая выполнить стандарты качества речной и сточных вод. Наряду с ростом величины  $R_0$ , значительно выросли и доходы предприятий.

**Пример 3** (принуждение). В случае входных данных примера 1 и

$$T_i = 150 \text{ у.е.}; \quad i = 1, 2; \quad F_2(T) = 0.5T;$$

$$\beta_i = 0.06 \frac{\text{МГ}}{\text{сут у.е.}}; \quad i = 1, 2,$$

получим

$$R_0 = 8.90 \times 10^7 \text{ у.е.}; \quad R_1 = 5.22 \times 10^{10} \text{ у.е.};$$

$$R_2 = 3.53 \times 10^{10} \text{ у.е.}$$

Таким образом, если у центра больше возможностей (максимально допустимые размеры платы за сброс ЗВ выше, чем в примере 1, затраты на очистку воды меньше), то наряду с увеличением величины  $R_0$  может происходить и увеличение доходов предприятий.

**Пример 4** (побуждение). Для входных данных примеров 1, 2 (величины  $T_i$  – являются пере-

менными и подлежат определению) и  $q_i = 0; i = 1, 2$  метод побуждения реализуется

$$(T_i)^* = T_{\max} = 1000 \text{ у.е.}; \quad i = 1, 2;$$

$$(P_i)^* = 1 - \sqrt{D/F_i((T_i)^*)} = 0.755;$$

$$R_0 = 3.52 \times 10^7 \text{ у.е.}; \quad R_1 = 5.03 \times 10^{10} \text{ у.е.};$$

$$R_2 = 3.96 \times 10^{10} \text{ у.е.}$$

**Пример 5** (побуждение). Для входных данных примера 3 и  $F_1(T) = 0.1T; q_i = 0; i = 1, 2$ , метод побуждения не может быть реализован – у центра недостаточно рычагов для экономического воздействия на ведущего.

**Пример 6** (побуждение). Если увеличить возможности центра по сравнению с предыдущим примером (например, в случае  $F_i(T) = T; i = 1, 2$ ), то метод побуждения реализуется и

$$(T_i)^* = T_{\max} = 1000 \text{ у.е.}; \quad i = 1, 2; \quad (P_i)^* = 0.9;$$

$$R_0 = 1.92 \times 10^8 \text{ у.е.}; \quad R_1 = 3.94 \times 10^{10} \text{ у.е.};$$

$$R_2 = 2.46 \times 10^{10} \text{ у.е.}$$

Таким образом, метод побуждения реализуется не всегда. Возможна ситуация (примеры 1, 2 и 5), когда метод принуждения применять можно, а метод побуждения – нет. Метод побуждения по сравнению с методом принуждения предоставляет предприятиям большую свободу действий и, как показывают примеры (1–3 и 4, 6), является для центра экономически более выгодным, чем принуждение.

**Пример 7** (убеждение). В случае входных данных примера 1

$$(P_1)^* = 0.12987; \quad i = 1, 2.$$

Совместный доход центра и предприятий в равновесии убеждения ( $R_c$ ) на порядок больше, чем при побуждении или принуждении и определяется равенством

$$R_c = 9.51 \times 10^{10} \text{ у.е.}$$

**Пример 8** (убеждение). Для входных данных примера 3

$$R_c = 8.55 \times 10^{10} \text{ у.е.}$$

Все рассмотренные примеры исследуются в ИАС методом сценариев путем имитационного моделирования.

Уравнения (5.5), (5.6) решаются численно при заданных источниках загрязнений по явной схеме метода конечных разностей с первым порядком аппроксимации по пространственной переменной и по времени по аналогии с [9].



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угольницкий Г.А. Управление эколого-экономическими системами. М.: Вузовская книга. 1999. 132с.
2. Алимов А.Ф., Андреев О.А., Астраханцев Г.П. и др. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. СПб: Vorey print. 2001. 419 с.
3. Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Сурков Ф.А. Модели управления эколого-экономическими системами. М.: Наука. 1984. 120 с.
4. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат. 1987. 400 с.
5. Полищук Ю.М., Силич В.А., Татарников В.А. и др. Региональные экологические информационно-моделирующие системы. Новосибирск:Наука. 1993. 132 с.
6. Рикун А.Д., Черняев А.М., Ширяк И.М. Методы математического моделирования в оптимизации водохозяйственных систем промышленных регионов. М.: Наука. 1991. 160 с.
7. Угольницкий Г.А. Теоретико-игровое моделирование методов иерархического управления устойчивым развитием // Известия РАН. Теория и системы управления. 2002. № 1. С. 92–97.
8. Угольницкий Г.А. Теоретико-игровые принципы оптимальности иерархического управления устойчивым развитием // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 4. С. 88–94.
9. Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Методы иерархического управления качеством речной воды // Вод. ресурсы. 2004. т. 31. № 2. С. 1–8.
10. Хованский А.Д., Хлобыстов В.В., Паращенко М.В., Панова С.В. Планирование устойчивого развития на местном уровне. Ростов-на-Дону. 2000. 53 с.