

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОЛОГО- ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ АДАПТИВНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО БАЛАНСА.

Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.,
Тимченко И.И.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Введение.

Социальные и эколого-экономические системы (СЭЭС) отражают комплексные процессы развития общественных отношений в тех условиях, которые определяют использование природных, экономических и интеллектуальных ресурсов. Сложность и многообразие этих процессов заставляют рассматривать проблему управления устойчивым развитием с позиций системного анализа [1]. Чтобы рационально использовать природные, социальные и экономические ресурсы для достижения целей развития, необходимы информационные технологии управления, которые позволяют прогнозировать сценарии развития. Основу подобных технологий составляют динамические модели СЭЭС. Этим объясняется важность методов моделирования и необходимость их первоочередной разработки.

Одним из перспективных подходов к созданию моделей СЭЭС является метод системной динамики [2]. Для построения сценариев изменения состояния систем в нем используются экспертные знания о причинно-следственных связях между элементами систем: так называемые функции влияния [3]. Используя функции влияния, можно представить развитие процессов в СЭЭС как генерализованный динамический баланс двух тенденций: позитивной, соответствующей общественным целям развития, и негативной, препятствующей их осуществ-

лению. Эти тенденции обусловлены внешними воздействиями на систему. Более того, каждый из процессов, развивающихся в системе, может быть представлен своим локальным динамическим балансом, который является следствием внутрисистемных взаимодействий.

Представление о динамическом балансе, управляемом функциями влияния, отчасти замещает фундаментальные законы сохранения, которые, как известно, отсутствуют в экономике и в социальных науках. Однако, качество динамической модели будет существенно зависеть от объективного определения функций влияния. Эти функции могут быть найдены, например, по архивным данным об изменчивости параметров СЭЭС путем «реанализа» [3]. Усвоение данных текущих наблюдений в динамической модели системы должно обеспечивать адаптацию к наблюдениям не только модельных прогнозов, но и функций влияния.

Метод моделирования, построенный на изложенных выше соображениях, естественно назвать методом адаптивного динамического баланса. В настоящей работе мы рассмотрим некоторые приложения этого метода к описанию динамического межотраслевого баланса в природно-хозяйственных комплексах.

СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА.

Рассмотрим природно-хозяйственный комплекс (ПХК), выпускающий продукцию для удовлетворения спроса населения и для обеспечения технологических нужд производства. Чтобы управлять комплексом, необходимо отслеживать макроэкономические процессы, появляющиеся как результат агрегирования производства, при котором выпускаемые товары и услуги группируются по некоторым признакам в отрасли экономики. Каждая от-

расль экономики может рассматриваться в этом случае как экономическая система, производящая один агрегированный продукт.

Как известно, для моделирования агрегированных процессов в математической экономике широко применяется метод межотраслевого баланса [4]. В этом методе объем продукции, выпускаемой каждой отраслью экономики, представляется в виде суммы составляющих, которые учитывают, в какую из отраслей направлена данная часть продукции. Обозначим A_{ij} количество продукции отрасли i , потребляемое отраслью j . Предположим, что часть продукции каждой отрасли D_i идет на конечное потребление, т.е. не используется другими отраслями в технологических целях. Если обозначить P_i объем выпуска продукции отрасли i , а N - общее число отраслей то систему уравнений межотраслевого баланса можно записать в виде:

$$A_{11} + A_{12} + \dots + A_{1N} + D_1 = P_1;$$

$$A_{21} + A_{22} + \dots + A_{2N} + D_2 = P_2; \quad (1)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$A_{N1} + A_{N2} + \dots + A_{NN} + D_N = P_N.$$

Квадратная матрица $\|A_{ij}\|$ в этой системе уравнений называется матрицей Леонтьева.

Если теперь ввести цены на продукцию каждой отрасли C_i и умножить каждую строку системы уравнений на соответствующую ей цену, то уравнения межотраслевого баланса будут представлять производство продукции и распределение ее по отраслям экономики в денежном выражении. В этом случае каждый столбец матрицы Леонтьева показывает объемы технологических затрат, которые несет соответствующая отрасль на приобретение необходимых ей товаров других отраслей. Кроме технологических затрат для выпуска продукции необходимы затраты труда, энергии, материалов и многих

других составляющих стоимости продукции. Поэтому мы введем в рассмотрение добавленную стоимость продукции R_j , понимая под нею разницу между ценой и технологической себестоимостью.

Рассматриваемая модель позволяет решать в основном статические задачи. Трудности ее применения связаны с выбором оптимального количества отраслей ПХК. При малом числе отраслей приходится относить к одной отрасли продукцию, довольно сильно отличающуюся по свойствам и назначению. При большом количестве отраслей резко осложняется проблема определения коэффициентов прямых затрат отраслей, показывающих какое количество продукции отрасли i необходимо для производства единицы продукции отрасли j . Поэтому представляет интерес попытаться решить проблему межотраслевого баланса методами системной динамики.

СИСТЕМНАЯ ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА.

Для построения концептуальной модели межотраслевого баланса попытаемся воспользоваться основными понятиями, которыми оперирует модель Леонтьева. В качестве уровней выберем элементы матрицы $\|A_{ij}\|$, функции конечного спроса D_i и добавленной стоимости R_j . Кроме того, введем в модель цены на продукцию отраслей C_i . Тогда с учетом рассмотренных выше свойств межотраслевого баланса несложно построить упрощенный вариант его концептуальной модели.

Так как все отрасли экономики ПХК входят в модель межотраслевого баланса на равных правах, их межотраслевые причинно-следственные связи должны быть подобными друг другу. Это позволяет упростить анализ и вместо N от-

раслей экономики рассматривать только две взаимосвязанные отрасли.

Системная диаграмма модели показана на рис. 1. Она представляет собой один из возможных вариантов отображения сущности межотраслевого баланса. Предположим, что цена C_1 на продукцию отрасли 1 увеличилась. Тогда спрос на нее D_1 уменьшится. Уменьшится так же и объем продукции отрасли 1, закупаемый отраслью 2 - величина A_{12} . Оба эти события приведут к сокращению объема выпуска продукции P_1 и к уменьшению добавленной стоимости R_1 , что будет препятствовать дальнейшему росту цены C_1 .

Сокращение производства P_1 приведет к уменьшению закупок продукции у отрасли 2 - величины A_{21} . Как следствие сократится объем выпуска P_2 , уменьшится добавленная стоимость R_2 и несколько снизится цена C_2 . В свою очередь понижение C_2 увеличит конечный спрос D_2 , что будет препятствовать сокращению объема выпуска P_2 . Стабилизация P_2 по цепям обратных связей через A_{12} и A_{21} будет способствовать стабилизации P_1 .

Таким образом, в модели действуют множественные обратные связи, которые отрабатывают реакцию общей двухотраслевой модели на внешние воздействия. Входами в модель, по которым на нее может быть оказано внешнее влияние, являются темпы потоков, проходящих через каждый из системных уровней. Естественно предположить, что технологии производства каждой из отраслей ПХК сохраняются неизменными в рассматриваемый период времени. При этом системные уровни, входящие в матрицу Леонтьева, не испытывают внешнего воздействия. Предположим так же, что эффективности производств у каждой их отраслей (или их мощности) сохраняются постоянными. Тогда основными входами в модель оста-

ются темпы потоков, проходящих через спрос на продукцию D_1 и D_2 , цены C_1 и C_2 и добавленную стоимость R_1 и R_2 .

Чтобы построить динамическую модель межотраслевого баланса, мы воспользуемся методом системной динамики [2,3]. Каждый из уровней A_{11} , A_{12} , P_1 и др., изображенных на рис. 1, представляет собой локальный динамический баланс тенденций. Стрелки, подходящие к уровням, указывают, какие другие уровни оказывают на них влияние. Диаграмме рис.1 соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} A_{11K} &= A_{11J} + \tau [F_1(A_{11})F_{25}(P_1)A_{11} - F_2(A_{11})A_{11}]_{JK}; \\ A_{12K} &= A_{12J} + \tau [F_3(A_{12})F_{26}(P_2)A_{12} - F_4(A_{12})F_{27}(C_2)A_{12}]; \\ A_{21K} &= A_{21J} + \tau [F_{23}(A_{21})F_{44}(P_2)A_{21} - F_{24}(A_{21})A_{21}]; \\ A_{22K} &= A_{22J} + \tau [F_{21}(A_{22})F_{43}(P_2)A_{22} - F_{22}(A_{22})A_{22}]; \\ P_{1K} &= P_{1J} + \tau [F_5(P_1)F_{28}(A_{12})F_{29}(D_1)P_1 - F_6(P_1)F_{30}(A_{11})F_{31}(A_{21})P_1]; \\ P_{2K} &= P_{2J} + \tau [F_{19}(P_2)F_{37}(A_{12})F_{38}(A_{21})P_2 - F_{20}(P_2)F_{39}(D_1)F_{40}(A_{22})P_2]; \\ D_{1K} &= D_{1J} + \tau [F_7(D_1)F_{32}(C_1)D_1 - F_8(D_1)D_1]; \\ D_{2K} &= D_{2J} + \tau [F_{17}(D_2)F_{41}(C_2)D_2 - F_{18}(D_2)D_2]; \\ R_{1K} &= R_{1J} + \tau [F_{11}(R_1)F_{34}(P_1)R_1 - F_{12}(R_1)R_1]; \\ R_{2K} &= R_{2J} + \tau [F_{13}(R_2)F_{35}(P_2)R_2 - F_{14}(R_2)R_2]; \\ C_{1K} &= C_{1J} + \tau [F_9(C_1)F_{33}(R_1)C_1 - F_{10}(C_1)C_1]; \\ C_{2K} &= C_{2J} + \tau [F_{15}(C_2)F_{36}(R_2)C_2 - F_{16}(C_2)C_2] \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь индексы j и k указывают на два последовательных момента времени вычислений, разделенных интервалом времени τ , F - функции влияния одних уровней на другие с соответствующими нижними индексами, показанными на рис. 1.

Для проверки работоспособности модели с нею были проведены вычислительные эксперименты. Функции влияния обычно выбираются, исходя из экспертных оценок причинно-следственных связей в модели.

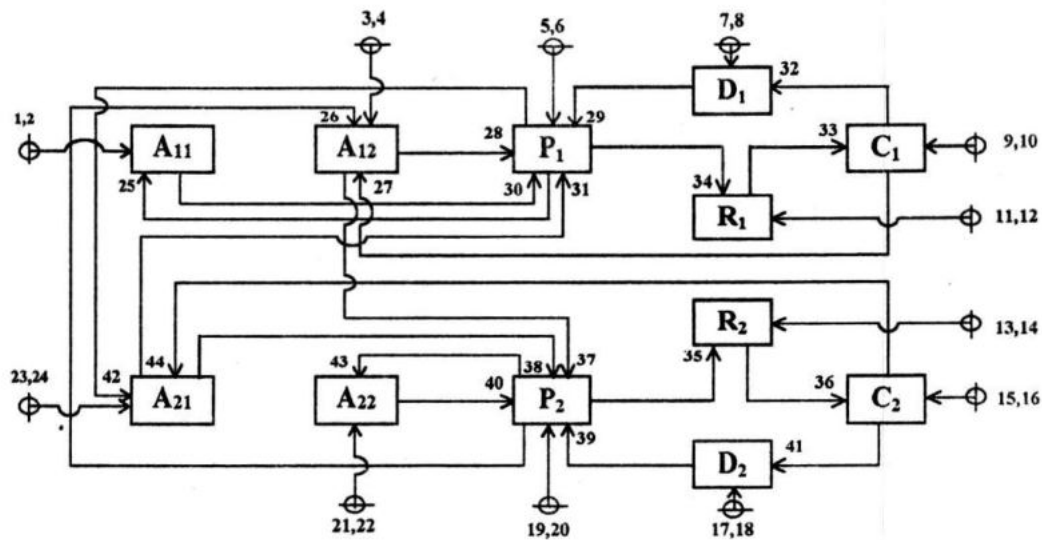


Рис. 1.

Нами были использованы монотонно возрастающие или монотонно падающие кривые в зависимости от соответствующих связей между уровнями. Расчеты показали, что модель правильно отражает основные причинно-следственные связи в двухотраслевой экономической системе.

На рис. 2 показаны результаты эксперимента, в котором оценивалась реакция модели на внешнее воздействие через цену на продукцию второй отрасли. Имитированное изменение C_2 заключалось в резком падении стоимости продукции на 25 шаге по времени. Из рис. 2 следует, что первоначально низкий спрос на продукцию отрасли 2 (кривая 1) существенно возрастает, как и выпуск отрасли (кривая 3). Рост P_2 ведет к увеличению закупок продукции отрасли 1, что в конечном итоге несколько увеличивает выпуск отрасли этой отрасли.

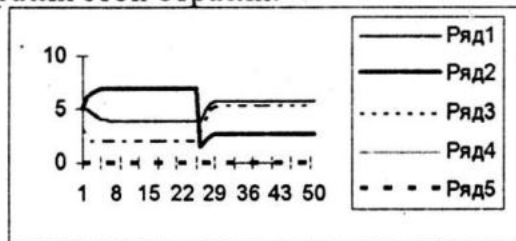


Рис. 2.

Эксперименты показали, что модель устойчива и достаточно быстро

отрабатывает изменения внешних условий. Этот результат позволяет рассчитывать на то, что системные модели динамического баланса окажутся более перспективными, чем традиционные модели межотраслевого баланса, когда речь идет об управлении ПХК при непрерывно меняющихся внешних условиях.

УСВОЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ В МОДЕЛЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО БАЛАНСА.

Модели динамического баланса позволяют прогнозировать сценарии развития процессов в природно-хозяйственном комплексе. Информация о невязках прогнозов должна быть использована для их корректировки и для адаптации самой модели к наблюдениям. Для кусочно-стационарных случайных процессов гауссовско-марковского типа наилучшим методом корректировки прогнозов является метод адаптивной фильтрации Калмана [5]. Оптимальный прогноз должен представлять собой взвешенное среднее значение из прогноза по модели $\Phi_{jk}x_j$ и из наблюдения z_k

$$x_k^* = \Phi_{jk} x_j^* + g_k [z_k - H_k \Phi_{jk} x_j^*] \quad (3)$$

здесь g_k - весовой коэффициент оптимальной фильтрации, определяющий точность прогноза. Этот коэффициент рассчитывается через корреляционную функцию ошибок прогнозов P

$$P_{jk} = E\{(\Phi_{jk} x_j - x_k)(\Phi_{ij} x_i - x_j)\}^T \quad (4)$$

Для нахождения весового коэффициента оптимальной фильтрации Калманом была получена следующая система уравнений [5]

$$\begin{aligned} P'_k &= \Phi_{jk} P_j \Phi_{jk}^T + Q_j; \\ g_k &= P'_k H_k [H_k P'_k H_k^T + R_k]^{-1}; \quad (5) \\ P_k &= P'_k - g_k H_k P'_k. \end{aligned}$$

Первое из них дает прогноз корреляционной функции ошибок фильтрации, которая находится с помощью динамического оператора модели процесса Φ_{jk} . Затем из второго уравнения находится оптимальный весовой коэффициент фильтрации g_k . Третье уравнение подготавливает фильтр к прогнозу функции P'_k , которая будет необходима при использовании первого уравнения на следующем шаге расчетов по времени.

Применяемая в фильтре Калмана процедура получения оптимальной оценки допускает интерпретацию методом системной динамики. Системная диаграмма процедуры усвоения наблюдений в фильтре Калмана представлена на рис.3. Этот системный модуль устраняет рассогласование между прогностической оценкой уровня x и его измерением z , благодаря отрицательной обратной связи между уровнем и темпом выходящего из него потока. Весовая функция фильтра Калмана g регулирует скорость сходимости прогноза к наблюдению. Если наблюдение точно приходится на момент прогноза и не содержит значимых погреш-

ностей, то весовая функция обращается в единицу и прогноз заменяется наблюдением. В противном случае производится взвешивание прогноза с наблюдением по схеме (3):

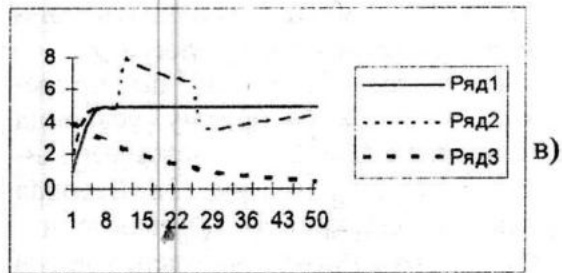
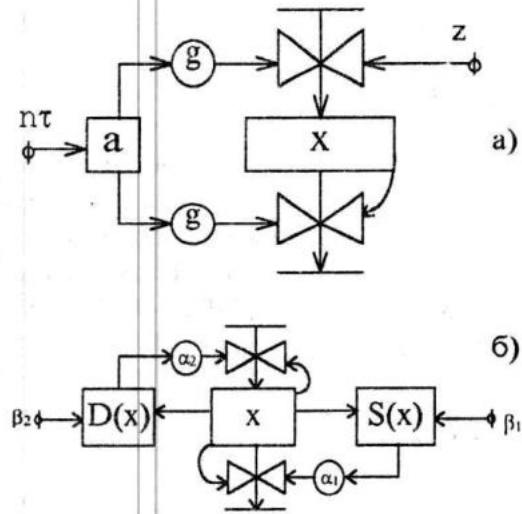


Рис. 3 а,б,в.

Назовем изображенный на рис.3а системный модуль усвоения наблюдений модулем адаптации. Добавление модуля адаптации к каждому системному модулю, из которых состоит модель управляемой системы (см.рис.1), превращает ее в динамико-стохастическую модель [6]. Подобные модели позволяют отображать динамику систем, опираясь на фактические наблюдения их состояний в реальном времени.

Рассмотрим пример усвоения наблюдений в простом системном модуле, изображенном на рис. 3 б. В этом модуле четыре цепи обратных связей: две из них (положительная и отрицательная) непосредственно связывают уровень x_1 с темпами входящего и выходящего потоков.

Две других цепи обратных связей содержат функции влияния S и D , через которые осуществляется внешнее воздействие на систему. Уравнение для прогностической оценки уровня имеет вид

$$x_{1k} = x_{1j} + \tau [D(x_{1j}) x_{1j} - \dot{S}(x_{1j}) x_{1j}] \quad (6)$$

Предположим, что измерение - точное, т.е. $N_k = 1$, $v_k = 0$. Тогда из системы уравнений Калмана (5) следует, что весовая функция оптимальной фильтрации g совпадает с нормированной корреляционной функцией ошибки фильтрации P , которая для гауссовско-марковских процессов имеет форму падающей экспоненты

$$P(t_k - t_0) = \exp[-\alpha(t_k - t_0)]$$

Подставляя это выражение в уравнение оптимальной оценки уровня (4), можно усваивать наблюдения истинного процесса z_k .

Результаты расчетов по приведенному выше алгоритму усвоения наблюдений в модели системной динамики показаны на рис. 3в. Весовая функция фильтрации (кривая с начальной ординатой 4, увеличена в четыре раза) была использована для усвоения двух измерений: $z_{10} = 8.3$ и $z_{25} = 1.7$. Так как измерения считались точными, а имитированные ошибки модельных прогнозов были выбраны значительными (+ 3.3 и - 3.3), динамика системы после усвоения наблюдений существенно отличается от модельной.

АДАПТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ В ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.

Второй важный путь адаптации моделей динамического баланса к наблюдениям заключается в уточнении функций влияния, аккумулирующих в себе экспертные знания о системе. Эта информация является обобщением наблюдений и должна

быть представлена в структуре информационной технологии управления системой в виде специальной базы данных. Поступающая в процессе управления информация о связях между системными уровнями и о внешнем воздействии на систему будет накапливаться в базе данных, что позволит верифицировать и уточнять функции влияния. Пример идентификации влияющих функций по банку данных архивных наблюдений приведен в [3].

Рассмотрим простую эколого-экономическую модель, вектор состояния которой, состоит из 4 параметров: X_1 - потребность населения ПХК в некотором экологически чистом продукте (например, в чистой питьевой воде), X_2 - стоимость единицы объема продукта, X_3 - качество продукта, X_4 - имеющееся количество продукта. Применим метод адаптивного динамического баланса для построения сценариев развития системы. Предположим, что динамические балансы каждого из уровней находятся под влиянием всех возможных внутрисистемных связей. Для определенности мы будем полагать их монотонно растущими или падающими функциями, причем нижние индексы будут указывать направление влияния: например, F_{21} обозначает влияние X_2 на X_1 .

Уравнения модели запишем в виде:

$$\begin{aligned} X_{1k} &= X_{1j} + \tau \{ [F_{11}(X_{1j}) + F_{21}(X_{2j}) \\ &\quad + F_{31}(X_{3j}) + F_{41}(X_{4j})] X_{1j} - X_{1j} \}; \\ X_{2k} &= X_{2j} + \tau \{ [F_{12}(X_{1j}) + F_{22}(X_{2j}) \\ &\quad + F_{32}(X_{3j}) + F_{42}(X_{4j})] X_{2j} - X_{2j} \}; \quad (7) \\ X_{3k} &= X_{3j} + \tau \{ [F_{13}(X_{1j}) + F_{23}(X_{2j}) \\ &\quad + F_{33}(X_{3j}) + F_{43}(X_{4j})] X_{3j} - X_{3j} \}; \\ X_{4k} &= X_{4j} + \tau \{ [F_{14}(X_{1j}) + F_{24}(X_{2j}) \\ &\quad + F_{34}(X_{3j}) + F_{44}(X_{4j})] X_{4j} - X_{4j} \}. \end{aligned}$$

В качестве внешнего воздействия на систему имитируем случайные колебания потребности населения в питьевой воде. Тогда, задавая произвольные начальные условия и решая систему уравнений (7), получим сце-

нарии изменения уровней. Они показаны на рис. 4а. Как следует из рисунка, стоимость воды (кривая 2) испытывает на себе случайные колебания спроса (кривая 1).

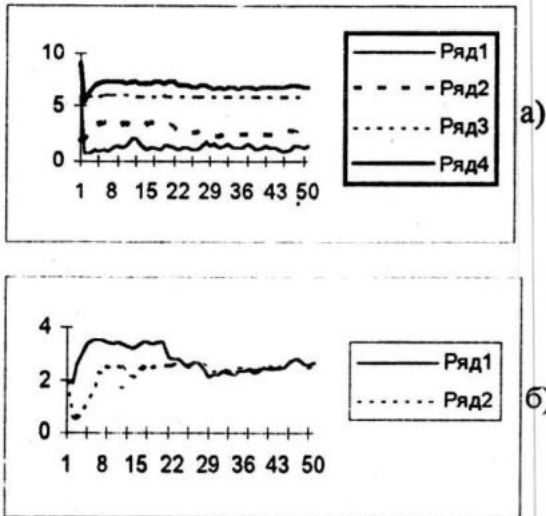


Рис. 4 а,б.

Предположим, что функция влияния спроса на цену F_{21} задана неточно. Располагая расчетными и «истинными» величинами уровня X_2 , нетрудно предложить алгоритм подстройки (адаптации) F_{21} . На рис. 4б показаны «наблюдения» цены X_2 (нижняя кривая) и ее значения, рассчитанные по модели. На 20 шаге расчетов был запущен механизм адаптации, который сводился к следующему. Параметры функции F_{21} были поставлены в линейную зависимость от разности двух скользящих средних значений: вычисленного по ряду наблюдений и по модельному ряду. Этот простой способ адаптации к наблюдениям позволил автоматически подстраивать F_{21} в ходе расчетов.

Закключение.

Предложенный в настоящей работе метод адаптивного динамического баланса позволяет моделировать сложные системы управления на основе всей доступной информации об их динамике. Усвоение данных текущих наблюдений в подобных моделях позволяет не только верифицировать прогностические сценарии развития системы, но и подстраивать функции влияния, на которых основана сама модель. Это открывает перспективы применения метода адаптивного динамического баланса в системах управления для поддержки принимаемых решений.

Литература.

1. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М. Морская среда как эколого-экономическая система.// Морской гидрофизический журнал, 1996,-№ 6.
2. Форрестер Д. Мировая динамика.- М.: Наука, 1978.-160 с.
3. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Прималенный А.А. Управление эколого-экономическими системами. "Экоси-гидрофизика", Севастополь, 1999.- 180 с.
4. Леонтьев В.В. Исследование структуры американской экономики. - М.: Госстатиздат, 1958.- 150с.
5. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.//Journal of Basic Engen., Trans. of ASME. March 1960.-P. 35-45.
6. Timchenko I.E. Stochastic Modelling of Ocean Dynamics.//Harwood Acad. Publ. Chur-London-Paris-New-York., 1984.-320 p.