

УДК 519.86:330.115

*В.С. Григоркив, М.В. Григоркив*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ ОБЩЕСТВА. Часть 2

### Введение

Характер взаимоотношений человека с окружающим миром вызывает вполне обоснованные опасения не только по поводу настоящего и будущего экосистем регионального и планетарного уровня, но и будущего человечества. Дело в том, что большинство экологических кризисов является следствием этих взаимоотношений, в частности следствием неправильного и даже агрессивного природопользования, чрезмерного потребления, экономического эгоизма, отсутствия элементарной экологической культуры и дисциплины, а также многих других действий, нарушающих гармонию существования человеческой цивилизации. Именно поэтому задачи экологизации экономики, ее устойчивого развития в последние десятилетия стали приоритетными, фундаментальными проблемами человечества. Они стали актуальными для ученых разных научных направлений, разрабатывающих и внедряющих комплексные программы гармонизации экономических, экологических и социальных слагаемых устойчивого развития. Одним из наиболее мощных и эффективных инструментариев исследования процессов, происходящих в эколого-экономических и социально-экономических системах, является математическое моделирование, позволяющее получить новые знания об объекте исследования, исключив реальные эксперименты с этим объектом, которые в действительности невозможны.

Настоящая публикация является продолжением первой части работы [1], в которой были предложены некоторые варианты моделей динамики эколого-экономических систем с учетом экономической структуризации общества. Остановимся на модели (1)–(8) [1], описывающей эколого-экономическое взаимодействие с помощью динамических переменных, обозначающих ликвидные накопления для девяти групп общества, составляющих его экономическую структуру, цену основного агрегированного продукта, тариф на утилизацию экологически вредных отходов и объем загрязнения окружающей среды. В математическом плане эта модель состоит из дифференциальных уравнений (1)–(5), (7) и начальных условий (6), (8). В состав уравнений модели входит ряд так называемых функций экономического поведения и параметров, играющих очень важную роль для ее теоретического и прикладного исследования, а также исследования ее возможных модификаций.

Первая часть работы посвящена построению основных соотношений модели и обоснованию исходных предпосылок и предложений процесса ее формирования [1]. Более детально остановимся на вопросах ее апробации. Естественно, что эти вопросы предполагают соответствующую идентификацию функций и параметров модели, а также ее верификацию. Главной целью модели (1)–(8) [1], как и ее различных модификаций, является имитация динамики эколого-экономической системы, представленной переменными модели, выявление и анализ основных тенденций и трендов ее развития, а также их зависимости от параметров. Для реализации этой цели с помощью Matlab разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее выполнять вычислительные эксперименты и на основании их результатов делать выводы о динамике исследуемых систем и ее особенностях.

### Функции экономического поведения и параметры модели

Прежде чем конкретизировать функции и параметры модели, еще раз подчеркнем, что модель (1)–(8) [1] может использоваться для качественного и экспериментального анализа процессов эколого-экономического взаимодействия как на региональном, так и на макроуровне (например, отдельной страны), в зависимости от того, какому уровню отвечает ее информационное обеспечение и соответствующая этому обеспечению параметризация. В настоящей работе апробация модели и проверка ее адекватности осуществляются на основании информационного обеспечения регионального уровня (Тернопольской области). При этом использованы разные способы параметризации, базирующиеся на непосредственном использовании статистических и экспертных данных, а также результатов решения определенных идентификационных задач и проведенных имитационных экспериментов с моделью.

Особое значение для рассматриваемой модели имеют функции экономического поведения как составные элементы модели: функция  $q_A(s)$  спроса потребителя на основной продукт, функция  $f_A(s)$  выпуска основной продукции в расчете на одно рабочее место в секторе  $A$ , функция  $\varphi_B(s)$  утилизации отходов в расчете на одно рабочее место в секторе  $B$ , функция  $\psi_B(s)$  спроса на утилизацию отходов в расчете на одного собственника утилизационных предприятий. В общем случае все эти функции могут относиться к разным классам, однако в настоящей работе они выбраны в следующем виде:

$$q_A(s) = q_1^* \left( \frac{s}{s + \delta_1 s_1} + \varepsilon_1 s \right) + h(s - s_{\min}) q_2^{**} \left[ \frac{s - s_{\min}}{s - s_{\min} + \delta_2 (s_2 - s_{\min})} + \varepsilon_2 (s - s_{\min}) \right] \quad (1)$$

$$\text{где } h(s - s_{\min}) = \begin{cases} 0, & s \leq s_{\min}, \\ 1, & s > s_{\min}; \end{cases}$$

$$f_A(s) = \begin{cases} f_A^{(0)} s, & f_A^{(0)} s \leq f_{\max}, \\ f_{\max}, & f_A^{(0)} s > f_{\max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\varphi_B(s) = \begin{cases} \varphi_B^{(0)} s, & \varphi_B^{(0)} s \leq \varphi_{\max}, \\ \varphi_{\max}, & \varphi_B^{(0)} s > \varphi_{\max}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi_B(s) = \frac{m_1}{m_2} \varphi_B(s). \quad (4)$$

Очевидно, что каждая из функций (1)–(4) имеет свои «внутренние» параметры, поэтому их идентификация является отдельной задачей. Все параметры наделены

конкретным содержанием. Что касается аргумента  $s$ , то, как отмечалось в первой части работы, он принимает неотрицательные значения, т.е. принадлежит множеству неотрицательных действительных чисел. К параметрам функции (1) принадлежат  $s_1$  — покупательная способность, соответствующая «корзине продовольственных товаров» класса людей, находящихся ниже среднего уровня обеспеченности (при этом считается, что доля расходов на питание составляет почти  $1/(1 + \delta_1)$  части от прожиточного минимума);  $\varepsilon_1$  — коэффициент возрастания спроса на товар долгосрочного потребления, описывающий замещение идентичных товаров более дорогими при возрастании покупательной способности;  $q_1^*$  — потребление на уровне прожиточного минимума;  $s_2$  — значение покупательной способности, определяющее поведение представителей среднего класса (доля расходов у них на товары второй категории составляет почти  $1/(1 + \delta_2)$  части от уровня жизни самых богатых людей), т.е. они пользуются товарами второй категории среднего качества;  $s_{\min}$  — некоторое предельное значение покупательной способности или граница между потреблением товаров первой и второй категорий;  $q_2^{**}$  — потребление товаров второй категории на уровне средних потребностей.

Функция (2) имеет два параметра:  $f_A^{(0)}$  и  $f_{\max}$ , которые являются соответственно фондоотдачей и максимальной фондоотдачей в основном производстве (основные предприятия (ОП) или сектор А). Функции типа (1), (2) использовались в работе [2]. Параметры  $\varphi_B^{(0)}$  и  $\varphi_{\max}$  функции (3) также обозначают фондоотдачу и максимальную фондоотдачу, но только в дополнительном производстве (сектор В). Что касается функции (4), то она в данной работе определяется на основании функции (3). При этом функция (4) имеет дополнительные параметры  $m_1$  и  $m_2$ , обозначающие соответственно количество работников, занятых утилизацией отходов, и количество собственников утилизационных предприятий (УП). Эти параметры в каждом конкретном случае считаются заданными величинами, т.е. не являются решениями определенной задачи идентификации. Параметризация функций (1)–(4) с помощью информационного обеспечения исследуемого региона привела к таким результатам [3, 4]:  $q_1^* = 400$ ;  $\delta_1 = 1$ ;  $s_1 = 5,714$ ;  $\varepsilon_1 = 0$ ;  $q_2^{**} = 2000$ ;  $s_{\min} = 11,428$ ;  $\delta_2 = 1$ ;  $s_2 = 12,857$ ;  $\varepsilon_2 = 0$ ;  $f_A^{(0)} = 21,7$ ;  $f_{\max} = 1700$ ;  $\varphi_B^{(0)} = 15,7$ ;  $\varphi_{\max} = 1300$ .

Численность населения в регионе составляла  $n = 1,07$  млн человек.

Экономическое поведение функций (1)–(4) показано на рис. 1.

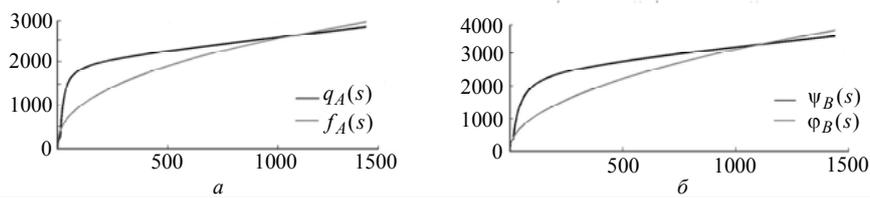


Рис. 1

Все остальные параметры модели (1)–(8) [1], которые не относятся к функциям экономического поведения (1)–(4), были уточнены разными методами идентификации, в частности, параметры  $\beta_i$  ( $i = 2, 3$ ),  $v_i$ ,  $k_i$  ( $i = \overline{1, 9}$ ),  $\gamma_i$ ,  $\chi_i$ ,  $\kappa_i$ ,  $\lambda_i$ , ( $i = 2, 3, 5, 6$ ),  $d_i$  ( $i = 1, 4, 7, 8, 9$ ),  $d$  установлены с помощью статистических данных [5, 6], параметры  $\alpha_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $z_i(t_0)$  ( $i = \overline{1, 9}$ ),  $p_A(t_0)$ ,  $p_B(t_0)$ ,  $\xi(t_0)$ ,  $\lambda$ ,  $\bar{\lambda}$ ,

$\eta$  — на основании экспертных оценок, параметры  $\theta_A$ ,  $\theta_B$  — с помощью имитационных экспериментов. Имитационные, минимальные и максимальные значения этих параметров конкретизированы в таблице параметров. Еще раз подчеркнем важность всех этих параметров для предложенной модели, так как адекватность их значений в конечном итоге определяет адекватность модели и даже уровень ее применения (региональный или макроуровень). Следует также отметить, что задача идентификации модели (1)–(8) [1] и ее модификаций в общем случае является сложной задачей, представляющей отдельный предмет исследования. Ниже остановимся только на задаче изучения эколого-экономической динамики на основании экспериментов с разработанной моделью, что и является целью данной работы.

Таблица

Параметр	Имитационное значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Параметр	Имитационное значение	Минимальное значение	Максимальное значение
$v_1$	0,22	0,02	0,35	$k_7$	0,15	0,05	0,35
$v_2$	0,1	0,02	0,35	$k_8$	0,15	0,05	0,35
$v_3$	0,06	0,02	0,35	$k_9$	0,15	0,05	0,35
$v_4$	0,16	0,02	0,35	$\chi_2$	0,15	0,05	0,35
$v_5$	0,05	0,02	0,35	$\chi_3$	0,15	0,05	0,35
$v_6$	0,04	0,02	0,35	$\chi_5$	0,15	0,05	0,35
$v_7$	0,24	0,02	0,35	$\chi_6$	0,15	0,05	0,35
$v_8$	0,08	0,02	0,35	$\kappa_2$	0,15	0,05	0,35
$v_9$	0,05	0,02	0,35	$\kappa_3$	0,15	0,05	0,35
$\alpha_1$	1,0	0,5	1,0	$\kappa_5$	0,15	0,05	0,35
$\alpha_2$	0,2	0,1	0,4	$\kappa_6$	0,15	0,05	0,35
$\alpha_3$	0,05	0,03	0,25	$d_1$	937,5	300,0	1687,5
$\alpha_4$	1,0	0,2	1,0	$d_4$	1558,75	580,0	2465,0
$\alpha_5$	0,2	0,1	0,4	$d_7$	1020,0	680,0	2210,0
$\alpha_6$	0,1	0,05	0,2	$d_8$	3062,5	700,0	3937,5
$\alpha_7$	1,0	0,5	1,0	$d_9$	1417,5	675,0	2362,5
$\alpha_8$	1,0	0,5	1,0	$z_1(t_0)$	3000	2000	5000
$\alpha_9$	1,0	0,5	1,0	$z_2(t_0)$	12000	3000	17000
$\beta_2$	0,3	0,15	0,6	$z_3(t_0)$	18000	7000	21000
$\beta_3$	0,05	0,03	0,15	$z_4(t_0)$	3000	1000	6000
$\gamma_2$	0,5	0,25	0,8	$z_5(t_0)$	10000	25000	95000
$\gamma_3$	0,9	0,45	0,95	$z_6(t_0)$	19000	14000	44000
$\gamma_5$	0,5	0,25	0,7	$z_7(t_0)$	3000	1000	7500
$\gamma_6$	0,8	0,4	0,9	$z_8(t_0)$	4000	1000	9000
$\sigma_1$	1,0	1,0	9,0	$z_9(t_0)$	6000	2500	9500
$\sigma_2$	1,0	1,0	9,0	$p_d(t_0)$	12	6	100
$\sigma_3$	1,0	1,0	9,0	$p_B(t_0)$	21	5	105
$\sigma_4$	1,0	1,0	9,0	$\xi(t_0)$	40	25	75
$\sigma_5$	1,0	1,0	9,0	$\theta_A$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_6$	1,0	1,0	9,0	$\theta_B$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_7$	1,0	1,0	9,0	$\lambda_2$	0,15	0,05	0,25
$\sigma_8$	1,0	1,0	9,0	$\lambda_3$	0,15	0,05	0,25
$\sigma_9$	1,0	1,0	9,0	$\lambda_5$	0,15	0,05	1,0
$k_1$	0,15	0,05	0,35	$\lambda_6$	0,15	0,05	1,0
$k_2$	0,15	0,05	0,35	$\lambda$	0,12	0,05	0,4
$k_3$	0,15	0,05	0,35	$\bar{\lambda}$	0,14	0,05	0,4
$k_4$	0,15	0,05	0,35	$d$	10,0	0,0	50,0
$k_5$	0,15	0,05	0,35	$\eta$	0,11	0,05	1,5
$k_6$	0,15	0,05	0,35				

### Анализ результатов вычислительных экспериментов

Для изучения динамики эколого-экономической системы с моделью (1)–(8) [1] проведено большое количество вычислительных экспериментов, цель которых — установить основные тенденции и закономерности развития исследуемой системы и разработать соответствующие рекомендации относительно регуляторных мероприятий, направленных на улучшения показателей ее динамики. При этом решены две задачи: построение и анализ решений модели (средне- и долгосрочных) и их фазовых траекторий, позволяющих изучить зависимости между отдельными переменными и соответствующие особенности их динамики; исследование зависимости решений модели от ее параметров.

Анализ решений модели, в частности среднесрочных решений, полученных для имитационных значений параметров, отображающих ретроспективный период времени с 1990 по 2012 г., фактически подтвердил основные тенденции и особенности, которые наблюдались в экономике региона на протяжении этого периода. В частности, цена агрегированного продукта и тариф на утилизацию отходов монотонно возрастали, причем темп возрастания цены был выше, чем тарифа (рис. 2):  $a — p_A(t)/p_B(t)$ ,  $b — p_B(t)/p_A(t)$ , что связано с инфляционными процессами, которые больше обусловлены производством основного продукта и его потреблением, чем расходами на переработку отходов.

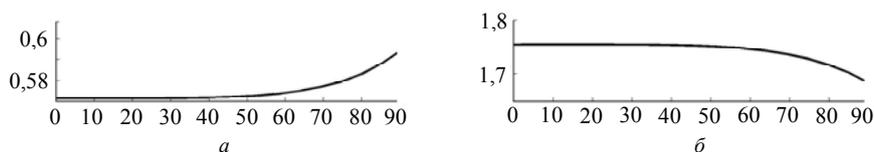


Рис. 2

Все динамические переменные, которые описывают финансовые возможности (накопления), кроме накоплений собственников больших ОП (большие ОП в этот период фактически приостанавливали свою деятельность), также возрастали, что указывает на некоторый резерв экономического развития региона. К такому выводу приходим также после дополнительного анализа производных показателей, вычисленных на основании решений модели, и проекций фазовой траектории модели на плоскости разных переменных. Заметим, что анализ проекций фазовой траектории позволяет найти закономерности, которые сложно установить, изучая соответствующие показатели только как динамические переменные, т.е. переменные, зависящие от времени. Например, проекции фазовой траектории модели (1)–(8) [1] на плоскости:  $a — [z_5, z_4]$ ;  $b — [z_9, z_5]$ ;  $в — [z_8, z_5]$ ;  $г — [p_B, z_5]$  (рис. 3) дают возможность оценить все направления изменения соответствующих переменных и их взаимозависимости, на основании которых можно сделать выводы, что в исследуемой эколого-экономической системе на заключительном отрезке времени рассматриваемого периода начинается процесс, полезный в социальном и экологическом смысле (увеличиваются финансовые возможности работников и собственников малых УП, причем увеличение капиталобеспечения утилизационных предприятий уменьшает количество отходов; наблюдается также возрастание накоплений работников с бюджетным финансированием и госслужащих), т.е. возникают тенденции «уравновешенного возрастания» экономических и экологических показателей.

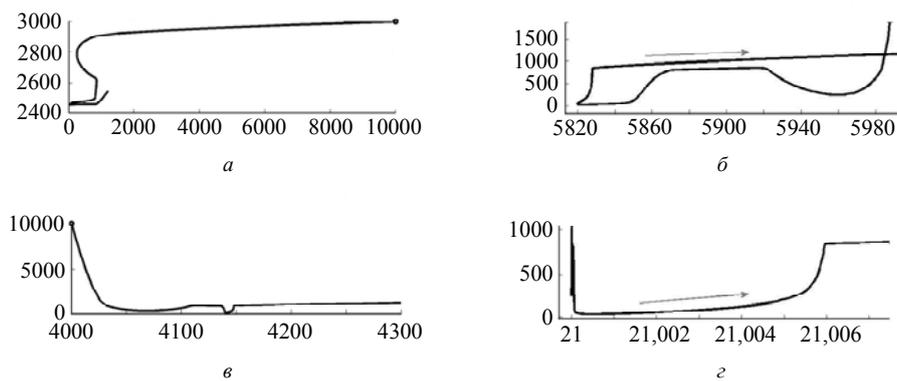


Рис. 3

Долгосрочные решения модели (1)–(8) [1] и их характеристики служат для составления прогноза возможной динамики эколого-экономической системы в случае, когда эта система не будет подвержена влиянию резких воздействий внешних факторов или изменению своей структуры. Эти решения соответствуют периоду с 1990 по 2028 г. Анализ долгосрочных решений позволил сделать ряд интересных выводов, касающихся будущего эколого-экономической динамики региона в случае неизменности экономических условий. В частности, приблизительно через десятилетие в исследуемой экономике существенно возрастет темп увеличения финансовых возможностей малых УП, объемы потребления возрастут только в группах собственников УП и малых ОП, накопления всех групп общества с постоянными доходами возрастут, но их покупательная способность снизится, что обусловлено высоким темпом увеличения цены на основной продукт, для преодоления некоторых нежелательных эффектов и стабилизации соотношений между ОП и УП в экономике региона необходимо возобновить деятельность больших ОП.

С помощью вычислительных экспериментов с предложенной моделью [1] изучена также зависимость средних во времени значений решений модели от изменения значений всех ее параметров в окрестности их имитационных значений. Осуществлена экономическая и эколого-экономическая интерпретация найденных зависимостей и выявлен ряд закономерностей, свойственных экономическим, экологическим и социальным процессам, происходящим в эколого-экономической системе с низкой финансовой возможностью большинства участников экономики. Кроме того, установлены значения параметров, наиболее желательные в плане эколого-экономического равновесия, условия нарушения такого равновесия, обстоятельства возникновения характерной неустойчивости в эколого-экономической системе региона и направления ее преодоления. Некоторые из этих выводов можно получить, проанализировав, например, графики зависимости средних значений решений от параметра  $\beta_2$  (рис. 4): *а* —  $z_1, z_2, z_3$ ; *б* —  $z_4, z_5, z_6$ ; *в* —  $z_7, z_8, z_9$ ; *г* —  $p_A, p_B, \xi$ . Не имея возможности в рамках этой работы детально изложить содержательную часть описания зависимости решений модели от их параметров, в частности и от параметра  $\beta_2$ , заметим только, что она содержит полезную информацию для лиц, занимающихся тактическим и стратегическим управлением, а также принимающих реальные решения в области эколого-экономического взаимодействия.

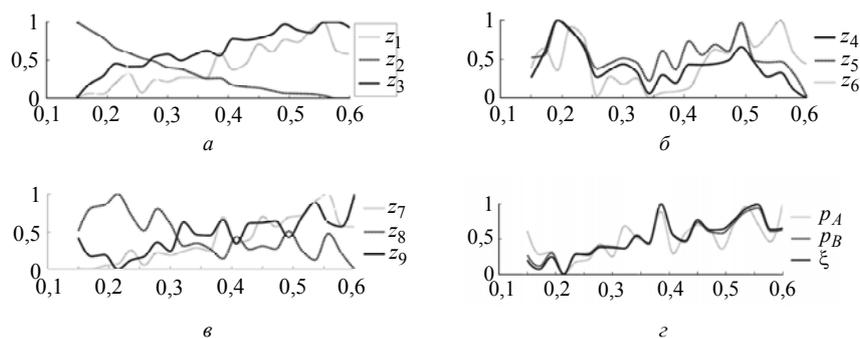


Рис. 4

### Заключение

Экспериментальные исследования с моделью (1)–(8) [1] подтвердили ее эффективность при изучении процессов экологизации экономики и гармонизации взаимоотношений между ее социально-экономическими и эколого-экономическими слагаемыми, что особенно важно в экономически структурированном обществе. Получен ряд содержательных выводов и общих рекомендаций, касающихся процессов эколого-экономического взаимодействия разного уровня агрегирования, в частности подтверждено, что общество и государство должны активно участвовать в процессах экологизации экономики, влиять на структуру расходов собственников ОП и УП, контролировать динамику инфляционных процессов, стимулировать развитие предприятий малого и среднего бизнеса, поддерживать деятельность больших предприятий, устанавливать экономически обоснованные ставки налогов, регулировать доли расходов собственников предприятий и отдельных граждан на утилизацию отходов, устанавливать адекватные экологические стандарты, добиваться сбалансированной динамики уровня жизни своих граждан и создавать условия для солидаризации всех общественных групп в плане эколого-экономической политики и построения экономики устойчивого развития.

Отметим еще одно важное обстоятельство. Модель (1)–(8) [1] и ее всевозможные модификации являются имитационными моделями эколого-экономической динамики, которые в конечном счете предназначены для имитационного изучения сложных динамических систем. Поддержка управления такими системами требует наличия определенных знаний об их поведении, которые, как правило, можно получить только на основании вычислительных экспериментов с моделью. В случае эколого-экономической системы именно эти знания позволяют разработать мобильные регуляторные механизмы ее управления.

*В.С. Григорків, М.В. Григорків*

### МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕКОЛОГО- ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ЕКОНОМІЧНОЇ СТРУКТУРИЗАЦІЇ СУСПІЛЬСТВА.

#### Частина 2

Проаналізовано прикладне забезпечення моделі динаміки еколого-економічної системи з урахуванням економічної структуризації суспільства та

результати проведених з моделлю експериментальних досліджень. Зроблено ряд важливих висновків і рекомендацій щодо регуляторних механізмів керування реальними еколого-економічними системами.

*V.S. Grygorkiv, M.V. Grygorkiv*

## MODELING THE DYNAMICS OF ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEMS BASED ON ECONOMIC STRUCTURING OF A SOCIETY. Part 2

The authors have analyzed the software application for the model of dynamics of eco-economic system based on economic structure of a society and the results of the experimental studies. It is established a number of important conclusions and recommendations on regulatory mechanisms managing the actual eco-economic systems.

1. *Григорків В.С., Григорків М.В.* Моделирование динамики эколого-экономических систем с учетом экономической структуризации общества. Часть 1 // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». — 2015. — № 2. — С. 128–137.
2. *Чернавский Д.С., Старков Н.И., Щербаков А.В.* О проблемах физической экономики (Обзоры актуальных проблем) // Успехи физических наук. — 2002. — 172, № 9. — С. 1045–1066.
3. *Паучок В.К., Буяк Л.М., Григорків М.В.* Параметризація математичних моделей еколого-економічних систем у просторі показників економічної структури суспільства, цін та забруднення довкілля (на прикладі Тернопільської області) // Інноваційна економіка. — 2013. — № 7(45). — С. 329–334.
4. *Матвійчук Я.М., Буяк Л.М.* Регуляризована ідентифікація функцій економічної поведінки за експериментальними даними // Науковий вісник Чернівецького торговельно-економічного інституту. Вип. 4. Економічні науки. — 2007. — С. 316–321.
5. *Довкілля Тернопільщини за 2011 рік: статистичний збірник / за редакцією В.І. Савчука.* — Тернопіль : Головне управління статистики у Тернопільській області, 2012. — 139 с.
6. *Статистичний щорічник Тернопільської області за 2012 рік / За ред. В.Г. Кирича.* — Тернопіль : Головне управління статистики у Тернопільській області, 2013. — 439 с.

*Получено 22.09.2014*

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. НАН Украины А.А. Чикрием.