DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2019-37-4
УДК: 004.942
Н. В. Багнюк, О. І. Кузьмич, В. М. Мельник, Г. С. Шепелюк, М. А. Чорний
Луцький національний технічний університет, Волинський коледж НУХТ

ГРАФІЧНИЙ ІНТЕРФЕЙС MATLAB ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ САМООРГАНІЗАЦІЇ В БІОСИСТЕМАХ

Н. В. Багнюк, О. І. Кузьмич, В.М. Мельник, Г.С. Шепелюк, М. А. Чорний. Графічний інтерфейс MATLAB для моделювання процесів самоорганізації в біосистемах. В даній статті наведено проект по розробці графічного інтерфейсу MATLAB та результати моделювання, що дозволяють як візуально, так і кількісно оцінювати стан, функціонування, динаміку і характер взаємин популяцій в біосистемах.
Ключові слова: популяція, динаміка, диференціальні рівняння, програма MATLAB.

Н. В. Багнюк, Е. И. Кузьмич, В. М. Мельник, Г. С. Шепелюк, М. А. Чорный. Графический интерфейс MATLAB для моделирования процессов самоорганизации в биосистемах. В данной статье представлен проект по разработке графического интерфейса MATLAB и результаты моделирования, позволяющие как визуально, так и количественно оценивать состояние, функционирование, динамику и характер взаимоотношений популяций в биосистемах.
Ключевые слова: популяция, динамика, дифференциальные уравнения, программа MATLAB.

N. V. Bagniuk, O. I. Kuzmych, V.M. Melnyk, G.S. Shepelyuk, M. A. Chornij. MATLAB GUI for modeling self-organization processes in biosystems.
This article presents a project to develop the MATLAB graphical interface and simulation results that allow both visually and quantitatively assessing the state, functioning, dynamics and nature of the relationships of populations in biosystems.
Keywords: population, dynamics, differential equations, MATLAB program.

Постановка наукової проблеми.

Бажання людини передбачати події та впливати на майбутнє є невід'ємною частиною еволюції з давніх давен. З розвитком науки та комп'ютерних технологій прогноз та передбачення стало певною мірою можливим, за рахунок побудови математичної моделі та застосування засобів системного аналізу. В цьому аспекті особливо актуальні дослідження в біології, адже вони пов'язані з необхідністю побудови деякої прийнятної математичної моделі біологічного процесу. Перші спроби математично описати біологічні процеси відносяться саме до моделей популяційної динаміки, що має застосування в екології, в мікробіології, імунології, для еволюційних процесів і т.д. Сам термін «популяція» – це сукупність організмів, що займають обмежений ареал, мають спільне походження за фенотипом та географічно ізольовані від інших популяцій даного виду. Важливим питанням вивчення популяції є дослідження її росту – співвідношення народжуваності і смертності та динаміки цього росту. Існує досить багато математичних моделей, що описують динаміку росту популяції для різних природніх умов та інших факторів. У цій статті пропонується огляд методів моделювання, що дозволяють кількісно оцінювати стан, функціонування, динаміку і характер взаємин популяцій в біосистемах.

Одними з поширених методів моделювання процесів розвитку популяцій є методи динамічної теорії систем на базі диференціальних рівнянь, методи якісної теорії систем, комп'ютерної симуляції. На основі цього методу можливе вирішення таких задач аналізу біосистеми як: з'ясування механізмів взаємодії елементів системи, ідентифікація та верифікація параметрів моделі за експериментальними даними, прогноз поведінки системи при різних зовнішніх впливах, оптимальне керування системою відповідно до обраного критерію.

Згідно проведених природніх спостережень за популяціями тварин, коливання чисельності рисей і зайців, що припадає на певну площу соснового лісу Канади мають періодичний характер. Коливання чисельності пов'язані з реакцією популяції на зовнішні впливи і внутрішні зміни в біоценозі. Період і амплітуда коливань залежать від механізмів регуляції чисельності популяції, особливостей виду і від умов його існування. Розглянемо, яким чином модельні експерименти на базі методу диференціальних рівнянь, що застосований в статті до аналізу популяційної динаміки та прогнозу розвитку популяцій, узгоджується з даними цих спостережень (Рис.1) [1]. В контексті даної постановки задачі у цій статті проводиться аналіз методів математичного та комп'ютерного моделювання в застосуванні до процесів популяційної динаміки, наводяться приклади застосування таких моделей в різних галузях науки та перспективи подальших впроваджень. Крім того, порівнюються результати моделювання з результатами природніх спостережень.

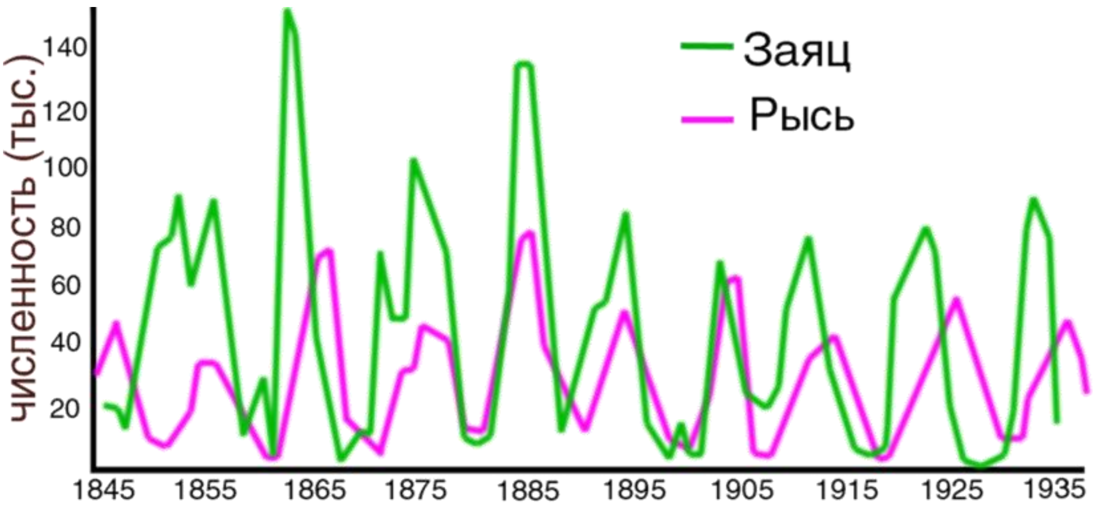

Рисунок 1. Дані природніх спостережень.

Аналіз досліджень.

В якості об’єкта дослідження обрано одну з найбільш відомих моделей опису динаміки популяцій – модель Лотки-Вольтерри, запропоновану в 1931 р. Ця модель (часто її називають моделлю «хижак-жертва») застосовна для опису різних процесів в біології, екології, медицині, в соціальних дослідженнях, в історії, в радіофізики і інших науках. Вона по своїй суті є математичним описом дарвінського принципу боротьби за виживання, викладеного у [2]. Дарвін знайшов підтвердження своїх висновків у працях Мальтуса [3]. В подальшому ці ідеї знайшли розвиток у працях Вольтерри [5], а саме: якщо в системі “хижак-жертва” обидва види знищуються рівномірно і пропорційно числу особин, то середнє число жертв зростає, а хижаків зменшується. Наприклад, під час першої світової війни лов риби в Адріатичному морі було суттєво скорочено, що несподівано призвело до збільшення числа хижаків і зменшення числа жертв.

Дана модель має ряд цікавих і різнопланових застосувань у різних галузях - в біології, екології, медицині, соціальних науках, радіофізиці, ін. [5-10]. Характерним є циклічність процесів, що відбуваються. Так, в праці Арнольда [7] розглядається видозмінена модель Лотки-Вольтерри, що враховує конкуренції жертв за їжу і хижаків за жертв. Дана модель має цікаву інтерпретацію динамічної системи взаємодії законослухняних громадян і соціально небезпечних осіб. Представляє інтерес модель взаємодії забруднення з природнім навколишнім середовищем [6] та модель очистки стічних вод, яка основана на пропозиції розглядати забруднювач як “жертву”, а біологічно активний мул в якості “хижака”, що здатен нейтралізовувати забруднювач через процес біохімічного окислення [8].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів.

Таким чином, проведемо комп’ютерну реалізацію моделі Лотки-Вольтерри з застосуванням програмного середовища MATLAB. При цьому вирішується задача прогнозування систем, що мають широке застосування у екології та біології, аналізу біологічних популяцій. На базі цього можливим є рішення таких практичних задач як збереження зникаючих і рідкісних видів тварин і рослин, прогнозування чисельності промислових популяцій в екосистемі, розробка оптимальних стратегій промислу, вивчення впливу антропогенних факторів на чисельність біологічних видів, і інших.

Розглянемо диференціальну модель боротьби за існування двох популяцій Лотки-Вольтерра. При цьому спочатку будується математична модель системи або процесу. Далі відбувається моделювання системи шляхом пошуку розв’язку систем диференціальних рівнянь та засобами системного аналізу. Можна спостерігати реакцію системи на різні вхідні дані та робити висновки про поведінку реальної системи за модельованим прототипом.

Нехай на деякій замкнутій території мешкають два види: вегетаріанці-жертви, що харчуються рослинами, які є в достатній кількості і хижаки, що полюють на жертв. Побудуємо чисельний розв'язок (динаміку) системи Лотки-Вольтерра в MATLAB. Створимо графічний інтерфейс програми з використанням інструментарію GUI.

Розглянемо випадок, коли система має вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = x(\alpha - \beta y) \\ \dfrac{dy}{dt} = -y(\gamma - \delta x) \end{cases}.$$

Динаміка системи має вигляд неправильних еліпсів. Особлива точка – центр. Поблизу особливої точки фазові траєкторії є еліпсами. При заданні значень змінних $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ було враховано, що вибір вектора початкових умов (вектора y0, см. нижче) залежить від координат точки перетину прямих $\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\alpha}{\beta}$.

Графічний інтерфейс програми показаний на Рис.2. В лівій частині вікна GUI (Graphical User Interface) знаходиться блок задання параметрів системи, а саме – час моделювання, початкові чисельності хижаків і жертв. В середній частині вікна задаються модельні параметри, такі як коефіцієнти розмноження та вимирання обої популяцій відповідно. В лівій частині вікна внизу показано часові залежності динаміки обох популяцій, а в правій нижній частині – фазові траєкторії.

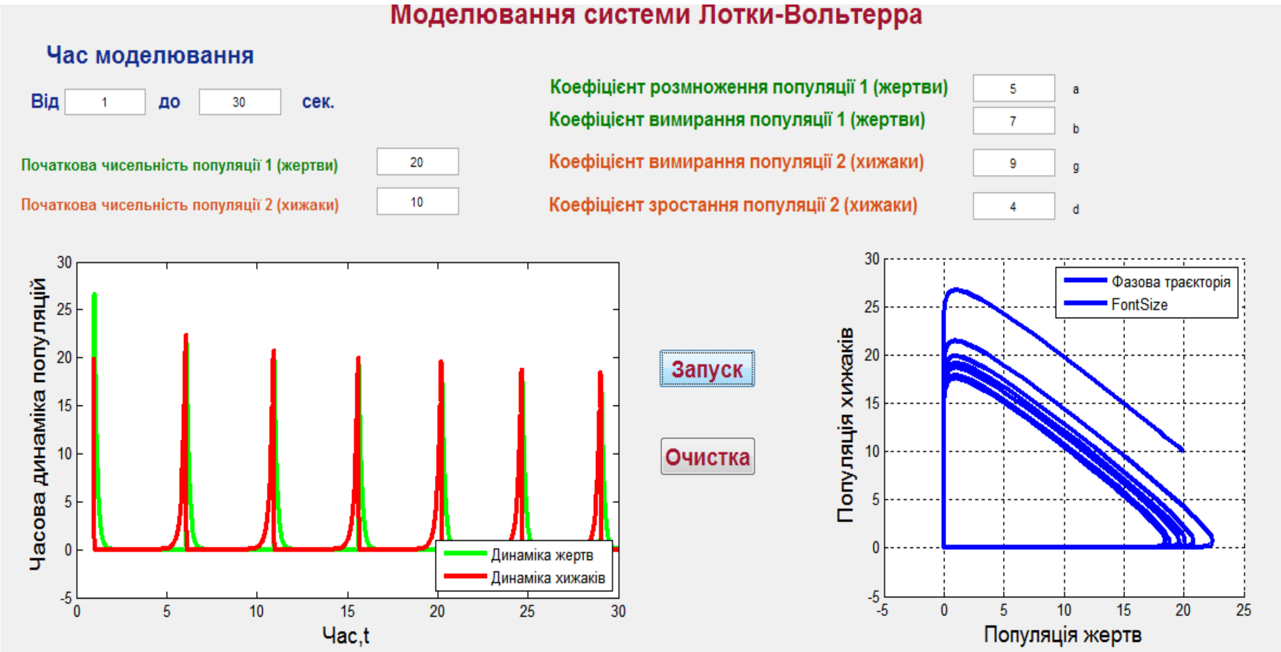

Рисунок 2 – Графічний інтерфейс в програмі MATLAB

Задання значень змінних $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, виконано описом їх з допомогою функції *syms*. Використовуючи солвер *ode45* програми MATLAB побудуємо графіки.

На Рис.2 зображено графік залежності чисельності хижаків від чисельності жертв при різних початкових умовах. Червоною точкою позначено точку рівноваги системи, якою є точка перетину прямих $\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\alpha}{\beta}$. На Рис. 3 показано фазові траєкторії чисельностей популяцій, а на Рис.4 зображено графік залежності числа жертв від часу та графік залежності числа хижаків від часу в одному вікні при варіюванні параметрів моделі.

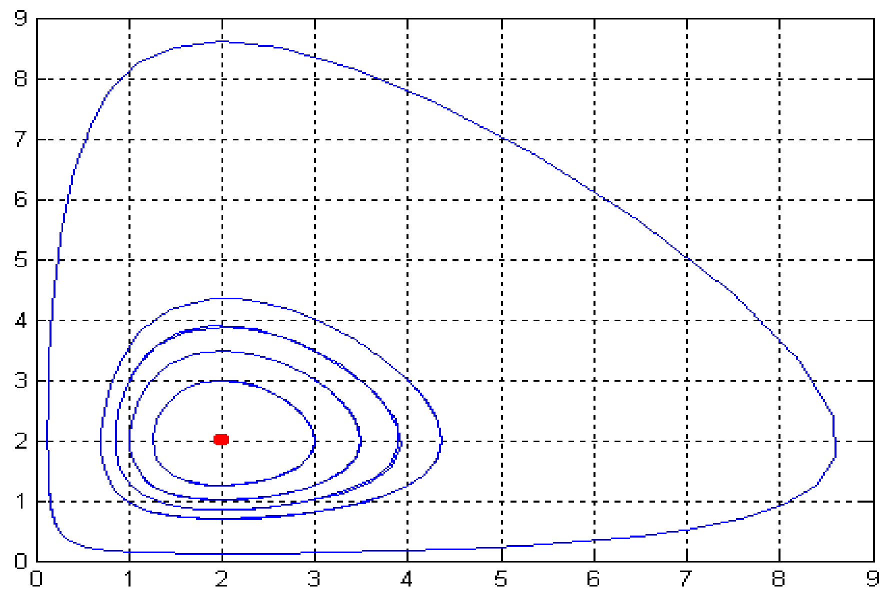

Рисунок 3 – Графік залежності числа жертв від числа хижаків

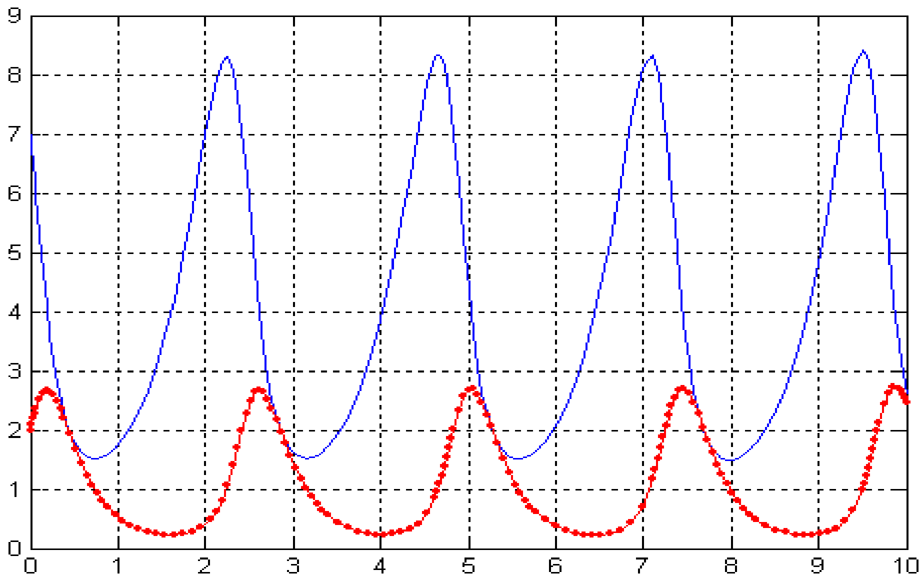

Рисунок 4 – Часові залежності числа жертв (графік з більшою амплітудою вгорі) та числа хижаків (внизу).

Система диференційних рівнянь Лотки-Вольтерра розв'язувалась в програмі MatLab з такими початковими значеннями: початкова чисельність популяції жертв становила 7 вим.од., популяція хижаків – 2 вим.од. Початкові коефіцієнти приросту чисельності популяції рівні $\alpha = 4$.

Графік на Рис. 2 демонструє залежність числа хижаків від числа жертв в цьому випадку (фазова залежність), та на Рис. 3 часові графіки популяцій. Далі при зростанні числа жертв до 8 вим.од. на графіку (Рис. 3) бачимо суттєве зменшення амплітуд фазових коливань.

На графіках фазових траєкторій (Рис. 2) також показано особливі точки для кожного випадку, які відповідають стаціонарному стану системи. Стаціонарний стан знаходимо наступним чином. Якщо чисельність популяції стала, то її похідна по часу рівна нулю. Тобто

$$\begin{cases} 0 = x(\alpha - \beta y) \\ 0 = -y(\gamma - \delta x) \end{cases}.$$

Звідси, $x_1 = 0, y_1 = 0, x_2 = \gamma/\delta, y_2 = \alpha/\beta$.

Отже, результати моделювання показують, що чисельності популяцій відчувають не співпадаючі по фазі коливання (Рис.2). Зі зростанням коефіцієнта народжуваності жертв спостерігаємо циклічну зміну амплітуд коливань обох популяцій. При $\alpha = \beta$ чисельність популяції залишеться сталою при умові відсутності хижаків. В цьому випадку розв'язком рівняння (1) є рівноважна величина $N(t) = N(0)$. Рівновага між народжуваністю і смертністю нестійка у тому сенсі, що навіть невелике порушення рівності $\alpha = \beta$ призводить з часом до все більшого відхилення функції $N(t)$ від рівноважного значення $N(0)$. При $\alpha < \beta$ чисельність популяції зменшується і прямує до нуля при $t \to \infty$. При $\alpha > \beta$ чисельність зростає по експоненціальному закону, і прямує до нескінченності при $t \to \infty$.

Таким чином, розроблений програмний продукт придатний для дослідження важливого питання вивчення популяції - дослідження її росту, тобто співвідношення народжуваності і смертності та динаміки цього росту. Також, є можливість прогнозувати поведінку системи для різних природніх умовах та інших факторах, які можна врахувати через модифікацію моделі. Програмний продукт дозволяє кількісно оцінювати стан, функціонування, динаміку і характер взаємин популяцій в біосистемах, що добре узгоджується із природніми спостереженнями (Рис.1).

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Дані результати моделювання, що отримані з допомогою розробленого програмного продукту дозволяють як візуально, так і кількісно оцінювати стан, функціонування, динаміку і характер взаємин популяцій в біосистемах. З результатів моделювання видно, що графіки часових залежностей числа хижаків від числа жертв демонструють періодичний характер. Це добре узгоджується з експериментальними вимірюваннями (Рис.1). У природних умовах зміна чисельності популяції носить коливальний характер, коливання чисельності пов'язані з реакцією популяції на зовнішні впливи і внутрішні зміни в біосистемі. Період і амплітуда коливань залежать від механізмів регуляції чисельності популяції, особливостей виду і від умов його існування.

За умов модифікації моделі даний програмний продукт може бути використаний екологами для аналізу проблем екосистем, наприклад, небезпеки промислового вилову тварин,і прийняття рішень щодо можливих рішень таких проблем, за яких екосистемі не буде нанесено шкоди. Цікавою інтерпретацією моделі Лотки-Вольтерри, яка буде предметом подальших досліджень є модель взаємодії забруднення з навколишнім середовищем, яка розглядалась у [6]. Ситуацію «забруднення-природа» можна трактувати як окремий випадок моделі Лотки-Вольтерра «хижак-жертва», коли природнє середовище виступає в якості жертви, а популяція забруднювача – в якості хижака. Головне припущення, що лежить в основі такої моделі, полягає в тому, що навколишнє середовище активно абсорбує і переробляє забруднення аж до певної межі. З якісних міркувань в системі «навколишнє середовище – забруднення» можливі три наступних принципово різні сценарії взаємодії, які можна дослідити на базі розробленого програмного продукту та аналізу фазових траєкторій. Серед них наступні: а) при малих викидах забруднення, довкілля його повністю переробляє (стійка ситуація), б) при збільшенні викидів забруднення в залежності від зовнішніх умов і випадкових причин навколишнє середовище може знаходитися в задовільному стані, а може і загинути (бістабільна ситуація). Нарешті, третій випадок відповідає ситуації екологічної катастрофи - повного вимирання природнього середовища, що взаємодіє із забрудником. Припустимо, що загальний фон забруднення і стан навколишнього середовища можна характеризувати наступними змінними: концентрацією забруднення і щільністю біомаси, відповідно. У тому випадку, якщо існує постійно діюче джерело забруднення, процес еволюції забруднення можна описати рівнянням, що містить параметри потужності джерела забруднення за одиницю часу, а також коефіцієнт природного знищення забруднення. Дана динамічна система функціонує так, що з часом концентрація забруднення змінюється природним чином. Тоді процес взаємодії забруднювача з навколишнім середовищем можна описати системою рівнянь динаміки і ставити задачу прогнозу та аналізу стану рівноваги такої екологічної системи, що і планується реалізувати в наступних дослідженнях.

Список бібліографічного опису.

1. Яблоков Я.В. Популяционная экология. -М.: Высш. шк., 1987. -303 с.
2. Ch. Darvin. Autobiography.- New York: Norton, 1958.-120 p.
3. Malthus T.H. An assay on the principle of population, as it affects the future improvement of society. – Penguin: Harmondsworth, 1978.- pp. 613–637.
4. Братусь А.С Динамические системы и модели биологии //А.С. Новожилов, А.П. Платонов.- М.: Физматлит, 2010.-400 с.
5. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование.-М.: Наука, 1976.-288 с.
6. Трубецков Д. И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. — 2011. — Т. 19. — № 2. — с. 69–88.
7. Арнольд В.И. Жесткие и мягкие модели// Природа.-1998.- №4.-с.3.
8. Братусь А.С. Математические модели взаимодействия загрязнения с окружающей средой / А.С. Мещерин, А.С. Новожилов// Вестник МГУ. Сер. вычислительная математика и кибернетика.-2001.-Т.6.-с.140.
9. Занг В.Б. Синергетическая экономика. Время и перемены в нелинейной экономической теории.-М: Мир, 1999.-335 с.
10. Малков С.Ю. Социальная самоорганизация и исторический процесс: возможности математического моделирования. -М: Либроком /URSS, 2009.

References.

1. Yablokov Ya. V. Population ecology. -M .: Higher. school., 1987. -303 p.
2. Sh. Darvin. Autobiography.- New York: Norton, 1958.-120 p.
3. Malthus T.H. An assay on the principle of population, as it affects the future improvement of society. - Penguin: Harmondsworth, 1978.- pp. 613-637.
4. Bratus A.S. Dynamic systems and models of biology // A.S. Novozhilov, A.P. Platonov.- M .: Fizmatlit, 2010.-400 p.
5. Volterra V. The mathematical theory of the struggle for existence.-M .: Nauka, 1976.-288 p.
6. Trubetskov D. I. Phenomenon of the Lotka-Volterra mathematical model and similar ones. Izvestiya of High Schools. Applied nonlinear dynamics. - 2011. - Vol. 19. - No. 2. - p. 69–88.
7. Arnold V.I. Hard and soft models // Nature.-1998.- No. 4.-p.3.
8. Bratus A.S. Mathematical models of the interaction of pollution with the environment / A.S. Mescherin, A.S. Novozhilov // Bulletin of Moscow State University. Ser. Computational Mathematics and Cybernetics.-2001.-Vol.6.-p.140.
9. Zang V.B. Synergetic economy. Time and Changes in Nonlinear Economic Theory.-M: Mir, 1999.-335 p.
10. Malkov S.Yu. Social self-organization and the historical process: the possibilities of mathematical modeling. -M: Librocom / URSS, 2009.