УДК 622.85

АВЕРИН Е.Г., ПАРФЕНЮК А.С. (Донецкий Национальний технический университет)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ УРБОЭКОСИСТЕМ

У статті розглядається ентропійний підхід до оцінки стану урбоекосистем. Пропонована методика дозволяє одержувати комплексні оцінки стану урбоекосистем для обґрунтування управлінських рішень по поліпшенню екологічної обстановки.

В статье рассматривается энтропийный подход к оценке состояния урбоэкосистем. Предлагаемая методика позволяет получать комплексные оценки состояния урбоэкосистем для обоснования управленческих решений по улучшению экологической обстановки.

In the article considers entropy approach for state estimation of urbaecosystems. This method allows to take complex state estimation of urbaecosystems for motivation of the management decisions for improvement ecological situation.

В последние годы, в крупных городах мира все чаще стали появляться симптомы экологического кризиса. Возникновение все более опасных конфликтных ситуаций между природными и антропогенными сферами связано, в первую очередь, с урбанизацией территории, загрязнением окружающей среды и бурным ростом промышленной деятельности. С экологической точки зрения, именно в мегаполисах проявляется наиболее негативное изменение природной среды. По прогнозам ООН урбанизация и бурный рост городов приведут к тому, что к 2020 году более 80% населения мира будет проживать на городских территориях.

Проблема комплексной оценки состояния крупных территориальных природно-промышленных комплексов достаточно сложна, так как основывается на анализе большого количества картографической информации и баз данных эколого-экономических показателей. В настоящее время не существует общей теории, которая характеризовала бы развитие городов. Основным направлением в оценке экологического состояния урбанизированных экосистем сегодня является использование экологических индикаторов и индексов. Эти величины считаются обобщенными показателями, характеризующими состояние и динамику развития экосистем.

В основе способа описания состояния экосистем с использованием экологических индикаторов и индексов лежат экспертные методы. При этом, вопрос о информативности индикаторов и индексов, а также их связей между собой при описании процессов развития систем остается открытым (сложение индексов с учетом весов показателей, принятое при анализе устойчивого развития стран и регионов, не всегда дает необходимый результат и теоретически не обосновано). В данной теории отсутствуют базовые методические предпосылки, связанные с использованием законов сохранения субстанций, или применением специальных форм уравнений состояний, которые отличались бы системным единообразием. Подобный подход используется в структурно-логических схемах построения моделей в термодинамике. Такой подход предполагает, что при взаимодействии сложной системы с окружающей средой каждому взаимодействию особого рода приводится в соответствие некоторая величина – координата состояния. Координаты состояния полностью характеризуют состояние системы. Каждой координате отвечает одна степень свободы присущая системе. Число и род степеней свободы определяется структурой системы. Изменение координат указывает на изменение состояния системы. Кроме этого каждому взаимодействию данного рода и, следовательно, каждой координате состояния сопоставляется некоторая величина, которая называется потенциалом взаимодействия. Потенциалы обычно являются функциями координат состояния и могут быть представлены в виде уравнений: [1]

$$P_k = P_k(x_1, x_2, ..., x_n),\ k = 1, 2, ..., n, \tag{1}$$

где P_k – потенциалы; x_k – координаты.

Количество воздействия, оказывающее влияние на систему, обычно определяется в виде:

$$\partial E_k = P_k \cdot \partial x_k \tag{2}$$

Соответствующие потенциалы и координаты в виде уравнений (2) определяют конкретный вид переносимой энергии и входят в закон сохранения и превращения энергии в качестве параметров. Основное уравнение для изменения внутренней энергии (U) системы в качестве фундаментального закона через потенциалы и координаты представляют в следующем виде:

$$\partial U = \sum P_k \cdot \partial x_k \qquad (3)$$

При использовании такого подхода для описания процессов развития городов очень важен выбор координат для тех или иных видов воздействий. Будем считать, что основной координатой, характеризующей процессы развития городов, является время (ф). В свою очередь основной фактор, характеризующий воздействие городов на природную среду, связан с количеством населения (*N*). Определим количество воздействия, оказывающее влияние на урбоэкосистему, в виде:

$$\partial Q = N \cdot \partial \tau \qquad (4)$$

Используем основополагающее понятие энтропии системы. Энтропию введем через вероятность состояния системы в предположении, что существует аддитивная функция состояния системы (*S*) причем вероятности состояний частей системы перемножаются, а энтропии складываются [1].

В термодинамике показано [1,2,3], что если при описании системы выполняется условие:

$$P^n \cdot x = const, \qquad (5)$$

то энтропия состояния системы может быть представлена в виде:

$$S = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln P + \alpha_2 \cdot \ln x \qquad (6)$$

Уравнение (5) называется изоэнтропой, где величина *S* сохраняет неизменное значение. В термодинамике коэффициенты $б_0$, $б_1$, $б_2$ зависят от температуры, которая специально вводится для описания термодинамических процессов, через уравнение состояния вида:

$$P \cdot V = const \cdot T \qquad (7)$$

Абсолютная шкала температуры является линейной и характеризует переход системы в другое качество (смену фаз состояния) при тепловом воздействии на систему.

В случае, если для крупных городов выполняется экспериментальная закономерность вида (5), то энтропия такой системы должна выражаться через зависимость (6). При этом необходимо ввести некий аналог «температуры» - параметр и, который бы характеризовал переход городских систем в новое качество в шкале времени. Данную шкалу и примем также линейной относительно основных реперных точек: при времени возникновения города будем считать условно население равное нулю и величину и также равную нулю; при переходе города в состояние мегаполиса ($N = 10^6$ чел.) примем и равную 100 или 1000 баллов. Для относительных измерений термодинамических показателей шкалы температур привязываются обычно к конкретным веществам. Например, шкала Цельсия построена на основе использования фазовых переходов для воды. Аналогичным образом шкалу и для относительных измерений показателей городов необходимо привязать к конкретному городу из изучаемого класса городов, например, Донецку.

Для количественного описания закономерности (6) проведен следующий численный эксперимент:

1. Для городов имеющих население до 1 млн. человек определяем данные динамики изменения населения от времени с момента возникновения города.
2. По экспериментальным данным ф, и, *N* находим уравнение вида ($N \cdot \tau = R_k \cdot \theta$) для каждого города, где постоянная $R_к$ будет характеризовать динамику развития каждого *к*-того города. По аналогии данную величину можно назвать индивидуальной постоянной динамики развития города.
3. По экспериментальным данным определяем уравнение изоэнтропы вида (5) на основе которого можно найти уравнение энтропии вида (6).

Покажем как на основе получения закономерностей вида (5) можно получить зависимость (6). На рисунке 1 представлена зависимость численности населения от времени при условии, что время отсчитывается с момента возникновения города.

Из приведенного графика получаем зависимость численности населения от времени для города Донецка:

$$N = A \cdot \tau^{n} = e^{4,244} \cdot \tau^{1,978} \tag{8}$$

Аналогично для Мариуполя зависимость численности населения от времени имеет вид:

$$N = e^{-10,410} \cdot \tau^{4,341} \tag{9}$$

Для Краматорска зависимость численности населения от времени имеет вид:

$$N = e^{-16,879} \cdot \tau^{6,127} \tag{10}$$

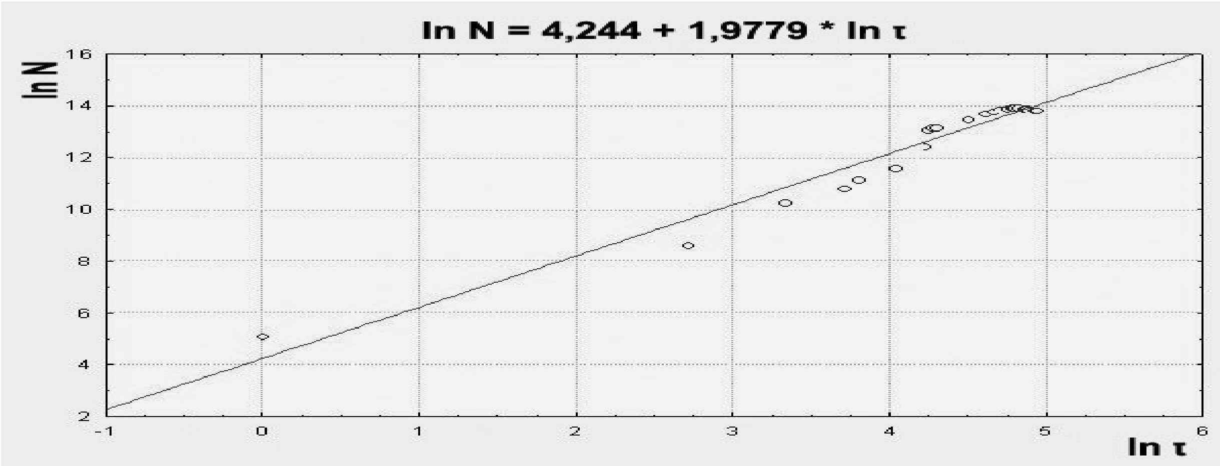

Рисунок 1 – Зависимость численности населения от времени для г. Донецка

Результаты обработки экспериментальных данных, характеризующих динамику изменения численности для городов Украины, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры уравнений (8-10)

№, п\п	Город	Значение констант в уравнениях (8-10)	
		Величина А	Величина n
1	Донецк	$e^{4,244}$	1,978
2	Мариуполь	$e^{-10,410}$	4,341
3	Краматорск	$e^{-16,879}$	6,127

Исходя из приведенных результатов, можно получить функции изменения энтропии вида:

$$\Delta S = \alpha_1 \cdot \ln N / N_0 + \alpha_2 \cdot \ln \tau / \tau_0, \tag{11}$$

где N_0 и ф $_0$ – некоторые начальные параметры состояния принятые за точку отсчета.

Из термодинамики известно, что при справедливости закономерностей (5) и (7) выполняется соотношение:

$$R_x = \alpha_2 - \alpha_1 \text{ и } n = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \tag{12}$$

откуда

$$\alpha_1 = \frac{R_x}{n-1} \tag{13}$$

Таким образом, экспериментально можно определить величины б$_1$ и *n*. При этом величина *n* определяется на основе поиска эмпирических закономерностей вида:

$$N \cdot \tau^n = const\,, \tag{14}$$

Величина R_x определяется исходя из установления подобия демографических процессов для различных городов, по отношению к городу принятому за эталон. При этом используется зависимость вида $N \cdot \tau = R_k \cdot \theta$.

Основная идея описания процессов, происходящих в урбоэкосистемах, связана с известной формулировкой Больцмана: природа стремится от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным. Как показал Больцман увеличение энтропии системы в необратимых самопроизвольных процессах и одновременное увеличение вероятности состояния системы взаимосвязано между собой: [4]

$$S = \varphi(W) \tag{15}$$

При определении вида зависимости (15) используют гипотезы по аддитивности энтропии и мультипликативности вероятности состояния систем. Основные допущения при выводе уравнения (15) заключаются в следующем. Допустим, имеются две системы, обладающие соответственно энтропиями S_1 и S_2,и вероятностями W_1 и W_2. Пусть эти две системы образуют суммарную систему с энтропией S и вероятностью W. Энтропия обладает, как известно, свойством аддитивности, откуда следует, что

$$S = S_1 + S_2 \tag{16}$$

Так как события лежащие в основе формирования состояний систем являются совместными и независимыми, то вероятность состояния общей системы подчиняется правилу умножения вероятностей:

$$W = W_1 \cdot W_2 \tag{17}$$

Последнее равенство следует из того, что каждое состояние одной из систем в совокупности с любым состоянием другой дает состояние суммарной системы. Это основная закономерность, определяющая дальнейший вывод зависимостей.

Таким образом, исходя из того, что энтропия каждой системы связана одной и той же функциональной зависимостью с вероятностью данной системы: S_1 = ц(W_1); S_2 = ц(W_2); S = ц(W), то можно написать следующее уравнение:

$$\varphi(W_1 W_2) = \varphi(W_1) + \varphi(W_2) \tag{18}$$

Дифференцируя это соотношение по W_1 и по W_2 , получаем:

$$\varphi''(W)W + \varphi'(W) = 0 \tag{19}$$

Решение уравнение (19) приведено в источнике [4] и имеет следующий вид:

$$S = k \cdot \ln W \tag{20}$$

Для термодинамических систем *к*онстанта k является постоянной Больцмана.

Рассматривая систему, включающую три подсистемы, при тех же допущениях, можно получить следующее дифференциальное уравнение для определения вида функции (15)

$$\varphi'''(W)W^2 + 3\varphi''(W)W + \varphi'(W) = 0 \tag{21}$$

Применяя метод индукции можно показать, что для системы состоящей из n подсистем соответствующее дифференциальное уравнение для определения энтропии как функции вероятности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}&\varphi^{n}(W)W^{n-1}+a_1\varphi^{n-1}(W)W^{n-2}+a_2\varphi^{n-2}(W)W^{n-3}+\ldots\\&\ldots+a_{n-1}W\varphi''(W)+a_n\varphi'(W)=0\end{aligned} \tag{22}$$

где a_i константы представляющие собой натуральные числа.

Данное уравнение не интегрируется в квадратурах и его решение может быть получено только численными методами. Численный анализ различных решений уравнения (22) показывает, что при изменении величины S от $-\infty$ до $+\infty$, величина W представляет собой S-образную функцию.

Из эмпирических фактов следует, что вероятность состояния системы в зависимости от энтропии часто представляют в виде нормального закона распределения.

$$W=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{s}e^{-\frac{t^2}{2}}dt \tag{23}$$

Учитывая основные результаты, полученные при выводе формулы (11) представим уравнение (23) в виде:

$$W=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\alpha_0+\alpha_1\cdot\ln N+\alpha_2\cdot\ln\tau}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)\cdot dt \tag{24}$$

Таким образом, обработку экспериментальных данных характеризующих динамику изменения населения городов Украины необходимо проводить по следующей методике.

Создается массив данных характеризующий изменение населения различных городов Украины в зависимости от времени. Данные нормируются по отношению к выбранному эталону и группируются для определения вероятностных распределений. С целью проверки соответствия их логарифмически нормальному закону распределения. Далее определяются относительные частоты (вероятности) в зависимости от времени и численности населения. Относительные частоты инверсным преобразованием вида (23) переводятся в эмпирические значения энтропии S. По полученным данным строится зависимость вида (11).

Проведенный анализ показывает, что если мы имеем n показателей характеризующих развитие городов, то вероятностное состояние системы можно искать в виде:

$$W=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\ln\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)\cdot dt \tag{25}$$

Построение зависимости вида (25) позволит разработать комплексные показатели для экологической оценки развития природно-промышленных комплексов по конечному набору индикаторов x_i. При этом оценка весовых показателей a_i будет проводиться по экспериментальным данным относительных частот характеризующих многомерную функцию распределения вида (25) в зависимости от индикаторов x_i.

Предполагаемая методика оценки развития урбоэкосистем по различным эколого-экономическим показателям, позволяет получить комплексные оценки состояния крупных территориальных природно-промышленных комплексов, для обоснования управленческих решений по улучшению экологической обстановки урбоэкосистем.

Библиографический список:

1. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 384 с.: ил.

2. Майков В.П. Энтропийные методы моделирования технологических процессов: Учебное пособие. – М.: МИХМ, 1982. – 88 с.
3. Путилов К.А. Термодинамика. – М.: «Наука», 1971. – 375 с.
4. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. Учебник для вузов. Изд. 2-е. – М: «Энергия», 1974. – 447 с.