



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ УРБАНИЗАЦИЕЙ РЕГИОНА И ЕГО ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ КООРДИНАЦИИ СВЯЗИ МЕЖДУ НИМИ

Петров Алексей Аверьянович

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент инженерной школы информационных
технологий
Югорского государственного университета,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: a_petrov@ugrasu.ru

Кутышкин Андрей Валентинович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
научно-исследовательской
лаборатории имитационного моделирования
Нижневартовского государственного университета,
Нижневартовск, Россия
E-mail: avk_200761@mail.ru

Предмет исследования: процесс урбанизации реги-
она ХМАО-Югра в период с 2013 по 2022 г.

Цель исследования: оценка влияния процесса ур-
банизации региона ХМАО-Югра с 2013 по 2022 г. на ос-
нове метода оценки степени координации связи между
его подсистемой урбанизации и экологической
подсистемой.

Методы и объекты исследования: для количествен-
ной оценки характеристик показателей использовался
метод оценки степени координации связи совместно с
методом веса информационной энтропии показателей,
характеризующих развитие подсистем урбанизации и
экологии региона.

Основные результаты исследования: на основе
классификации состояний развития степени коорди-
нации сопряжения между подсистемой урбанизации и
экологической подсистемой выявлено, что доминирует
состояние развития степени координации «недоста-
точно сбалансированное развитие» как с отставанием
развития подсистемы урбанизации, так и с отставанием
развития экологической подсистемы, причем состояний
с отставанием развития экологической подсистемы в 1,5
раза больше, чем с отставанием развития подсистемы
урбанизации. Использование метода оценки степени
координации связи между подсистемами урбанизации
и экологии региона совместно с методом веса инфор-
мационной энтропии дает возможность анализа дина-
мики показателей, характеризующих развитие указанных
подсистем с учетом корреляции между ними, нивелируя
при этом субъективизм аналитика.

Ключевые слова: урбанизация региона, эколо-
гия региона, метод оценки степени координации свя-
зи, метод взвешивания информационной энтропии
показателей.

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN REGIONAL URBANIZATION AND ITS ENVIRONMENT WITH USING COUPLING COORDINATION DEGREE METHOD

Alexey A. Petrov

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor
at the School of Information Technology Engineering,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: a_petrov@ugrasu.ru

Andrey V. Kutyskin

Dr. Sc. of Technics, Professor
Chief Researcher of the Research Laboratory
of Simulation
Nizhnevartovsk State University
Nizhnevartovsk, Russia
e-mail: avk_200761@mail.ru

Subject of research: the urbanization process of the
Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra region in the
period from 2013 to 2022.

Purpose of research: is to assess the impact on the
urbanization process of the Khanty-Mansiysk Autonomous
Okrug – Yugra region from 2013 to 2022 based on the method
of assessing the degree of coordination of the relationship
between its urbanization subsystem and the ecological
subsystem.

Methods and objects of research: for a quantitative
assessment of the characteristics of the indicators, the
method of assessing the degree of coordination of the
relationship was used together with the method of the weight
of information entropy of the indicators characterizing the
development of the urbanization and ecology subsystems of
the region.

Main results of research: based on the classification
of the states of development of the degree of coordination
of the interface between the urbanization subsystem and
the ecological subsystem, it was revealed that the state of
development of the degree of coordination of "insufficiently
balanced development" dominates both with a lag in the
development of the urbanization subsystem and with a
lag in the development of the ecological subsystem, and
the number of states with a lag in the development of the
ecological subsystem is 1.5 times greater than with a lag in
the development of the urbanization subsystem. The use of
the method of assessing the degree of coordination of the
connection between the subsystems of urbanization and
the ecology of the region together with the method of the
weight of information entropy makes it possible to analyze
the dynamics of indicators characterizing the development
of these subsystems taking into account the correlation
between them, while leveling out the subjectivity of the
analyst.

Keywords: regional urbanization, regional ecology,
coupling coordination degree method, method of weighing
the information entropy of indicators.

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация представляет собой очень
сложный комплексный процесс, который, с
одной стороны, характеризуется концентра-
цией производственных ресурсов и транс-
формацией экономической системы региона,

ростом численности городского населения
за счет снижения сельского и т. д., а с другой
стороны, существенно увеличивает эколо-
гическую нагрузку и негативное влияние на
окружающую среду социально-экономичес-
кой системы города и региона в целом. С по-
зиции системного анализа любой объект или



процесс физического либо абстрактного типа можно рассматривать как систему, состоящую из определенного количества подсистем и элементов. При отсутствии параметрических моделей функционирования подсистем и элементов, как правило, для этого используют комплексы величин – показателей, которые мало связаны друг с другом и наблюдаемы. Изменения данных показателей определяют состояние подсистем и элементов в течение выбранного временного интервала, что упрощает исследование поведения системы в целом. Процесс урбанизации – это, безусловно, большая и сложная система, которую в первом приближении можно представить как совокупность двух взаимосвязанных подсистем – непосредственно подсистемы урбанизации региона (подсистема урбанизации, *U*) и подсистемы, описывающей экологическое состояние региона (экологическая подсистема, *E*). Между этими подсистемами присутствуют как прямые, так и обратные связи, которые оказывают влияние не только на развитие систем, но и определяют координацию взаимодействия между ними. Изучение взаимосвязей между урбанизацией региона и развитием его выделенных подсистем достаточно актуально. При исследованиях в данной области используется достаточно широкий перечень подходов и методов, например, таких, как комбинация модели Кайя и метода индекса логарифмического среднего деления (IPAT Кауа & LDMI, Logarithmic Mean Divisia Index) [1, 2], статистические методы [3, 4], а также метод оценки степени координации связи подсистем (Coupling Coordination Degree Method, CCDM) совместно с методом взвешивания информационной энтропии показателей (МВИЭП) [5–8], описывающих их функционирование. Метод CCDM наиболее интенсивно используется за рубежом, в частности в Китае [8], для оценки связи урбанизации и экологической среды как для городов Китая, так и для его провинций [9–11]. Наряду с этим в работах [5, 7] приведены результаты использования метода CCDM для оценки и анализа взаимосвязи урбанизации и динамики экологической среды регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока в различные периоды времени начиная с 2005 г. по 2017 г. Для регионов Западной Сибири данная проблематика также актуальна, особенно для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО-Югры), который не только обеспечивает большую долю добычи углеводородов в стране, но и характеризуется высокой долей городского населения.

Целью данной работы является оценка и исследование влияния на процесс урбанизации региона ХМАО-Югра с 2013 по 2022 г.

на основе метода оценки степени координации связи между его подсистемой урбанизации и экологической подсистемой. При этом используются такие показатели, как комплексная оценка уровня развития данных подсистем и степень координации связи между ними. Новизной исследования является применение метода оценки степени координации связи между разнородными подсистемами большой системы на основе адаптированной к объекту исследования комплексной системы индексов, характеризующих динамику развития подсистем урбанизации и экологической среды региона, для получения количественных оценок координированности развития данных систем и степени интенсивности связей между ними.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод степени координации связи (CCDM) [6, 8, 9] используется для оценки взаимодействия, взаимного влияния и степени координации функционирования разнородных и разнотипных систем, а также их подсистем в течение некоторого интервала времени. Каждая из них может быть представлена иерархически упорядоченной структурой подсистем и элементов, состояние которых характеризуется некоторым набором/комплексом показателей. Отбор этих показателей осуществляется с учетом ключевых аспектов функционирования систем/подсистем, значимости для описания связей между последними, доступности статистических данных для регистрации показателей и наличия корреляционных связей между ними. Предлагается подсистему (подпроцесс) урбанизации «*U*» представить как совокупность трех subprocesses/субсистем – «Демографическая урбанизация» (*Dem*), «Экономическая урбанизация» (*Econ*) и «Социальная урбанизация» (*Soc*). Подсистему (подпроцесс) экологии региона «*E*» предлагается описать с использованием достаточно часто применяемой концепции «давление на экологическую среду – состояние экологической среды – реакция/изменение экологической среды» [9, 12]. Тогда «*E*» состоит из subprocesses/субсистем «Состояние экологической среды региона, *EcoES*», «Давление на экологическую среду региона, *EcoEP*» и «Реакция экологической среды региона, *EcoEnR*». В таблице 1 приведены агрегированные показатели выделенных subprocesses/субсистем, входящие в эти системы элементы с соответствующими им базисными показателями. Эти подсистемы достаточно часто используются для описания функционирования социально-экономических систем регионального и муниципального уровня [13,

14]. Перечень элементов и соответствующих базисных показателей для этих подсистем варьируется в достаточно широких диапазонах, но в данной работе используется набор показателей, представленный в исследованиях [6, 7], связанных с оценкой взаимосвязи урбанизации и экологической обстановки в регионах Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Исходные данные для расчета базисных показателей фиксируются действующей системой государственной статистики, а их значения приводятся в ежегодно публикуемых статистических справочниках Госкомстата РФ и Управления Федеральной службы государственной

статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу [18, 19], государственных докладах о состоянии окружающей среды РФ Минприроды РФ и МГУ им. М. В. Ломоносова [20], а также докладах об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре Службы по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры [21]. Рассматривался временной интервал с 2013 по 2022 г. Все стоимостные показатели были приведены к сопоставимым ценам 2013 г.

Таблица 1. Совокупности агрегированных и базисных показателей подсистемы урбанизации и экологической подсистемы региона

Подсистема	Субсистемы и агрегированные показатели	Обозначение	Базисный показатель	Влияние
Подсистема урбанизации региона, U	Демографическая урбанизация, <i>Dem</i>	Dem1	Доля городского населения, %	+
		Dem2	Доля активного населения, %	+
		Dem3	Плотность населения, чел./км ²	+
	Экономическая урбанизация, <i>Econ</i>	Econ1	Подушевой валовой региональный продукт, млн руб./чел.	+
		Econ2	Средний доход на душу населения (руб./мес.)	+
		Econ3	Денежные расходы и сбережения на душу населения (руб./чел.)	+
		Econ4	Уровень безработицы (%)	+
	Социальная урбанизация, <i>SOC</i>	Soc1	Количество высших учебных заведений на 10 000 населения	+
		Soc 2	Численность врачей на 10 000 населения	+
		Soc 3	Количество спортивных сооружений на 10 000 населения	+
		Soc 4	Количество общественных автобусов на 100 000 населения	+
		Soc 5	Объем услуг связи на душу населения (руб./чел.)	+

Экологическая подсистема региона, E	Состояние экологической среды, <i>EcoES</i>	EcoES 1	Площадь лесов на душу населения (га)	+
		EcoES 2	Площадь земель сельскохозяйственного назначения на душу населения (га)	+
	Экологическое давление на окружающую среду, <i>EcoEP</i>	EcoEP 1	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников на душу населения, т	-
		EcoEP 2	Сброс загрязненных вод в поверхностные водоемы на душу населения (м ³)	-
		EcoEP 3	Твердые бытовые отходы на душу населения (кг)	-
	Экологическая реакция окружающей среды <i>EcoEnR</i>	EcoEnR 1	Улавливание загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников на душу населения (кг/чел.)	+
		EcoEnR 2	Объем оборотной и постоянство используемой воды на душу населения (м ³ /чел.)	+
		EcoEnR 3	Площадь высаженных лесов на душу населения (га/чел.)	+

В столбце «Влияние» таблицы 1 приведена качественная характеристика влияния роста значений базисных показателей элементов выделенных подсистем на развитие системы/процесса урбанизации региона. Общее количество базисных показателей подсистемы урбанизации региона равно 12 ($J = 12$), а экологическая подсистема региона состоит из 8 базисных показателей ($I = 8$).

Зависимость для оценки степени взаимосвязи подсистем урбанизации и экологической среды региона имеет следующий вид [16–18]:

$$C(t) = 2 \frac{\sqrt{U(t) \times E(t)}}{[U(t) + E(t)]}, U(t) = \sum_{j=1}^J WU_j \cdot r_j(t); E(t) = \sum_{j=1}^I WE_j \cdot r_j(t), \quad (1)$$

где $C(t)$ – степень взаимосвязи развития подсистем урбанизации и экологии региона для года « t » интервала времени $[t_1, t_N]$ ($0 \leq C(t) \leq 1$); $U(t)$, $E(t)$ – показатели энтропии подсистемы урбанизации и экологической подсистемы для года « t »; WU_j , WE_j – веса j -го показателя подсистемы урбанизации и экологической подсистемы в году « t » соответственно; $r_j(t)$ – нормированный j -й базисный показатель таблицы 1.

Чем ближе значение $C(t)$ к «1», тем интенсивнее связь между подсистемами urba-

низации и экологии среды региона. Комплексная оценка уровня развития этих подсистем $T(t)$ и степень координации связи между ними $D(t)$ определяются выражениями [6, 16–18]:

$$T(t) = \alpha U(t) + \beta E(t); D(t) = \sqrt{C(t) \times T(t)}, \quad (2)$$

где α , β – коэффициенты неопределенности, характеризующие вклад указанных подсистем в процесс урбанизации региона.

Для определения весов базисных WU_j , WE_j и агрегированных показателей используется метод взвешивания информационной энтропии базисных показателей, что позволяет получать более объективные оценки веса различных показателей, избегая субъективной предвзятости иерархического анализа и методов экспертной оценки, а также недостатка информации, вызванного анализом главных компонент. МВИЭП включает следующие процедуры [16–18]:

1. Нормируются базисные показатели таблицы 1 ($j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, I$) с учетом влияния их значений на развитие системы урбанизации в целом:

– показатели, способствующие развитию системы:

$$r_j(t) = \frac{x_j(t) - x_{\min_j}}{x_{\max_j} - x_{\min_j}}; x_{\max_j} = \max_{t=t_1}^{t_N}(x_j(t)); x_{\min_j} = \min_{t=t_1}^{t_N}(x_j(t)); \quad (3)$$

– показатели, оказывающие негативное влияние на развитие системы:

$$r_j(t) = \frac{x_{\max_j} - x_j(t)}{x_{\max_j} - x_{\min_j}}. \quad (4)$$

Здесь $x_j(t)$ – значение j -го или i -го базисного показателя (в зависимости от подсистемы урбанизации или экологической подсистемы региона) для года « t ».

2. Определяется информационная энтропия j -го или i -го (базисного) показателя:

$$e_j = -\frac{1}{N} \sum_{t=t_1}^{t_N} [X_j(t) \cdot \ln X_j(t)]; X_j(t) = \frac{r_j(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_N} r_j(t)}. \quad (5)$$

При $X_j(t) = 0 \rightarrow \ln X_j(t) = 0$.

3. Рассчитывается вес j -го или i -го базисного показателя:

- подсистема урбанизации:

$$WU_j = g_j \left(\sum_{j=1}^J g_j \right)^{-1}, J = 12 \text{ (таблица 1);} \quad (6)$$

- подсистема экологии региона:

$$WE_i = g_i \left(\sum_{i=1}^I g_i \right)^{-1}, I = 8 \text{ (таблица 1).} \quad (7)$$

Здесь $g_j = 1 - e_j$ – рассеивание информационной энтропии j -го или i -го базисного показателя.

Оценка значений агрегированных показателей (таблица 1) каждой из подсистем осуществляется по следующим зависимостям:

$$Dem(t) = \sum_{j=1}^{J_{Dem}} WU_j \cdot r_j(t); Econ(t) = \sum_{j=1}^{J_{Econ}} WU_j \cdot r_j(t); Soc(t) = \sum_{j=1}^{J_{Soc}} WU_j \cdot r_j(t). \quad (8)$$

$$EcoES(t) = \sum_{i=1}^{IEcoES} WE_i \cdot r_i(t); EcoEP(t) = \sum_{i=1}^{IEcoEP} WE_i \cdot r_i(t); \quad (9)$$

$$EcoEnR(t) = \sum_{i=1}^{IEcoEnR} WE_i \cdot r_i(t).$$

Здесь $J_{Dem}, \dots, IEcoEnR$ – количество базовых показателей, входящих в соответствующий укрупненный показатель (таблица 1).

Рост значений всех расчетных агрегированных показателей характеризует снижение неопределенности энтропии функционирования рассматриваемых подсистем, что положительно характеризует как снижение дисперсии значений показателей, так и изменения структуры соответствующих подсистем. В работах [6, 16–18] на основании значений $D(t)$, $U(t)$ и $E(t)$ была предложена классификация состояний развития степени координации сопряжения между подсистемой урбанизации и экологической подсистемой региона (таблица 2). Для значений непосредственно степени координации связи $D(t)$ выделено четыре состояния развития региона: сбалансированное развитие, недостаточно сбалансированное развитие, слабо сбалансированное и несбалансированное развитие. Каждое

Таблица 2. Классификация состояний развития степени координации сопряжения между подсистемой урбанизации и экологической подсистемой региона

Виды состояния связи между подсистемами	Значение показателя $D(t)$	Критерий типа состояния	Характеристика типа состояния связи между подсистемами
Сбалансированное развитие (СБР)	$0,7 < D(t) \leq 1$	$E(t) - U(t) > 0,1$	Сбалансированное развитие региона с отстающим развитием подсистемы урбанизации (СБР1)
		$U(t) - E(t) > 0,1$	Сбалансированное развитие региона с отстающим развитием экологической подсистемы региона (СБР2)
		$0 \leq U(t) - E(t) \leq 0,1$	Сбалансированное развитие подсистем урбанизации и экологии региона (СБР3)
Недостаточно сбалансированное развитие (НДСБР)	$0,5 < D(t) \leq 0,7$	$E(t) - U(t) > 0,1$	Недостаточно сбалансированное развитие региона с отстающим развитием подсистемы урбанизации (НДСБР1)
		$U(t) - E(t) > 0,1$	Недостаточно сбалансированное развитие региона с отстающим развитием его экологической подсистемы (НДСБР2)
		$0 \leq U(t) - E(t) \leq 0,1$	Недостаточно сбалансированное развитие региона с одинаковым развитием его подсистем урбанизации и экологии (НДСБР3)

Слабо сбалансированное развитие (СлСБР)	$0,3 < D(t) \leq 0,5$	$E(t) - U(t) > 0,1$	Слабо сбалансированное развитие региона со слабым развитием его подсистемы урбанизации (СлСБР1)
		$U(t) - E(t) > 0,1$	Слабо сбалансированное развитие региона со слабым развитием его экологической подсистемы (СлСБР2)
		$0 \leq U(t) - E(t) \leq 0,1$	Слабо сбалансированное развитие региона с одинаковым развитием его подсистем урбанизации и экологии (СлСБР3)
Несбалансированное развитие (НеСБР)	$0 < D(t) \leq 0,3$	$E(t) - U(t) > 0,1$	Несбалансированное развитие региона с затрудненным развитием подсистемы урбанизации (НеСБР1)
		$U(t) - E(t) > 0,1$	Несбалансированное развитие региона с затрудненным развитием его экологической подсистемы (НеСБР2)
		$0 \leq U(t) - E(t) \leq 0,1$	Несбалансированное развитие региона с одинаковым развитием его подсистем урбанизации и экологии (НеСБР3)

состояние детализируют соотношения значений $U(t)$ и $E(t)$, определяя доминирование развития подсистемы урбанизации или экологической подсистемы региона (тип состояния). Постоянная «0,1», присутствующая в зависимостях с $U(t)$ и $E(t)$, предназначена для формирования нечеткой границы между значениями $U(t)$ и $E(t)$, т. к. реализация равенства $U(t) = E(t)$ маловероятна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1 и 2 представлены расчетные значения укрупненных показателей $Dem(t)$, $Econ(t)$, $Soc(t)$, $EcoES(t)$, $EcoEP(t)$ и $EcoEnR(t)$ (таблица 1) подсистемы урбанизации и экологической подсистемы ХМАО-Югры,

рассчитанные согласно (8) и (9) для интервала с 2013 по 2022 г. Значения $Econ(t)$ и $Soc(t)$ (рисунок 1) характеризуются достаточно устойчивым ростом на фоне снижения значений показателя $Dem(t)$ с 2013 по 2017 г. и последующего устойчивого, но слабого роста. Значения показателя $EcoES(t)$ (рисунок 2) – состояние экологической среды региона – демонстрируют устойчивое снижение в течение всего временного интервала, которое обусловлено тем, что население округа устойчиво растет на фоне незначительных изменений площадей сельхозугодий и площади лесов. Экологическое давление на окружающую среду $EcoEP(t)$ (рисунок 2) также характеризуется устойчивым ростом начиная с 2014 г., что, в свою очередь,

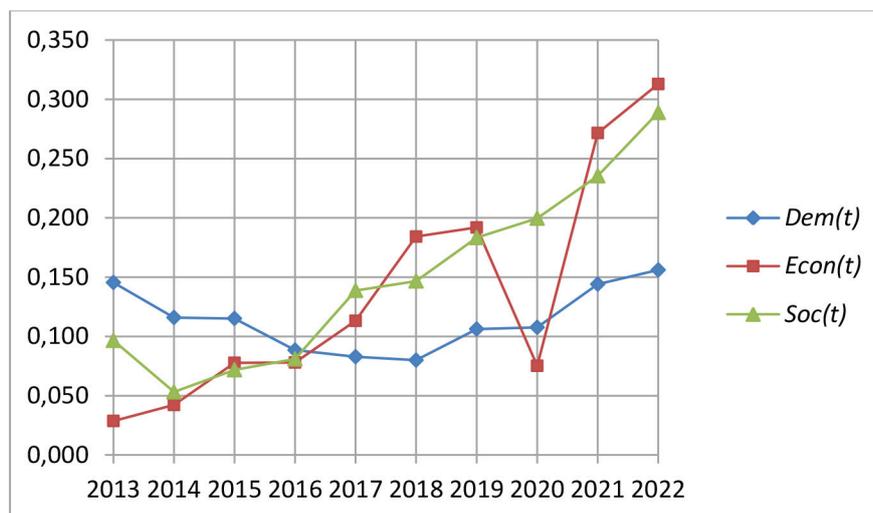


Рисунок 1. Динамика значений укрупненных показателей $Dem(t)$, $Econ(t)$ и $Soc(t)$ системы урбанизации региона ХМАО-Югра в период с 2013 по 2022 г.

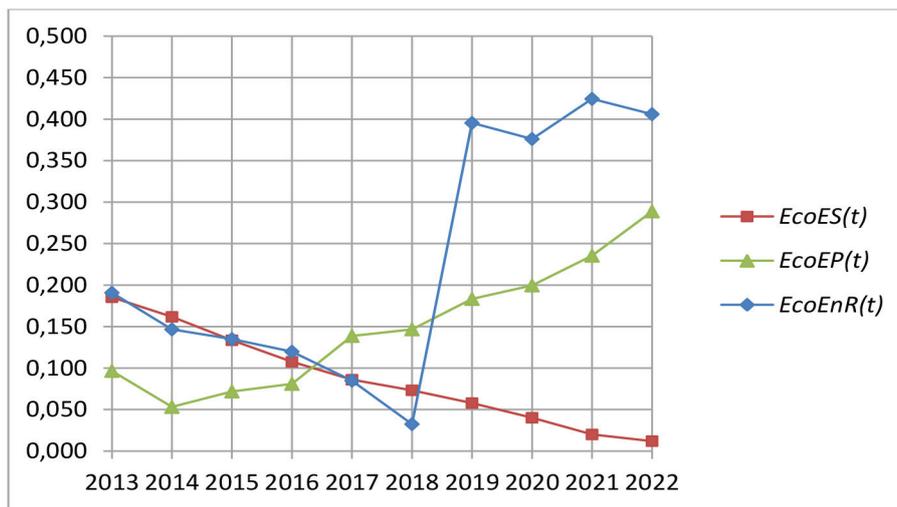


Рисунок 2. Динамика значений укрупненных показателей $EcoES(t)$, $EcoEP(t)$ и $EcoEnR(t)$ экологической системы ХМАО-Югры в период с 2013 по 2022 г.

обусловлено наличием восходящих трендов значений объемов загрязняющих атмосферу выбросов от стационарных источников и объемов твердых бытовых отходов. Это связано в том числе и с ростом населения региона.

Увеличение сброса недостаточно очищенных сточных вод в водоемы округа также обусловлено этим же фактором. Так, по данным Службы по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, только половина населенных пунктов имеет канализационно-очистные сооружения [25]. Значения же показателя $EcoEnR(t)$ с 2013 по 2018 г. снижаются, но начиная с 2019 г. они существенно увеличились и далее сформировали

незначительный восходящий тренд. Такая динамика обусловлена, во-первых, активизацией деятельности хозяйствующих субъектов и администрации округа по нейтрализации выбросов вредных веществ, загрязняющих атмосферу от стационарных источников; во-вторых, влиянием пандемии на региональную экономику, в том числе и снижением трудовой маятниковой миграции; в-третьих, увеличением оборотного и повторного использования воды в населенных пунктах округа и интенсификации лесовосстановительных работ. В таблице 3 совместно приведены расчетные значения величин $U(t)$, $E(t)$, $C(t)$, $T(t)$, $D(t)$ и классификация состояний связи между подсистемами урбанизации и экологической подсистемой ХМАО-Югры в период с 2013 по 2022 г.

Таблица 3. Расчетные значения $U(t)$, $E(t)$, $C(t)$, $T(t)$, $D(t)$ и классификация состояний связи между подсистемами процесса урбанизации ХМАО-Югры в период с 2013 по 2022 г.

Год, t	$U(t)$	$E(t)$	$C(t)$	$T(t)$	$D(t)$	Тип состояния связи между подсистемами
2013	0,271	0,530	0,946	0,393	0,616	НДСБР1
2014	0,211	0,466	0,927	0,278	0,560	НДСБР1
2015	0,265	0,459	0,963	0,323	0,590	НДСБР1
2016	0,247	0,377	0,978	0,242	0,553	НДСБР1
2017	0,335	0,275	0,995	0,232	0,551	НДСБР2
2018	0,411	0,236	0,963	0,258	0,558	НДСБР2
2019	0,521	0,507	0,993	0,739	0,735	СБР2
2020	0,483	0,462	0,989	0,498	0,665	НДСБР2
2021	0,651	0,488	0,990	0,807	0,751	СБР2
2022	0,758	0,541	0,986	0,874	0,800	СБР2

На фоне роста значений характеристики развития подсистемы урбанизации $U(t)$ показатель $E(t)$ развития экологической подсистемы региона с 2013 по 2018 г. снижается, что, с одной стороны, указывает на определенную эффективность мер, принимаемых регионом в экологической области. В 2019 г. значения $E(t)$ резко возрастают и, претерпев незначительное снижение в 2020 и 2021 гг., продолжают свой рост. Незначительная коррекция значений $E(t)$ в 2020–2022 гг. обусловлена адаптацией реакции экологической подсистемы на функционирование социально-экономической системы региона в условиях ограничений пандемии. Аналогичная адаптация присутствует и в развитии подсистемы урбанизации, что отражается ростом значений $U(t)$ в этот временной отрезок. Значения $C(t)$ в течение всего интервала с 2013 по 2022 г. близки к «1», что говорит о существенной связи между функционирующими подсистемой урбанизации и экологической подсистемой региона. Динамика значений комплексной оценки уровня развития данных подсистем $T(t)$ аналогична динамике значений показателей $U(t)$ и $E(t)$ при принятых значениях весовых коэффициентов α и β (2). Зависимость (2) $T(t)$ при $\alpha = 0,5$ и $\beta = 0,5$, что означает одинаковую значимость подсистем урбанизации и экологического состояния региона при комплексной оценке их развития, представляет собой среднеарифметическую значений показателей $U(t)$ и $E(t)$, что предопределяет схожесть характера изменений $T(t)$ и $U(t)$, $E(t)$. Таким образом, значения $T(t)$ демонстрируют после незначительного спада с 2013 по 2016 г., что обусловлено снижением значений $E(t)$, устойчивый рост, определяемый ростом значений как $U(t)$, так и $E(t)$. Локальное снижение значений $T(t)$, $U(t)$ и $E(t)$ обусловлено влиянием пандемии на социально-экономическую и, как следствие, экологическую подсистему округа.

За рассматриваемый временной интервал значение показателя $D(t)$ не опускалось ниже 0,5, что говорит об устойчивой и высокой степени координации связи между подсистемой урбанизации и экологической подсистемой ХМАО-Югры. В целом, согласно принятой классификации, преобладают состояния «недостаточно сбалансированное развитие» степени координации сопряжения между развитием рассматриваемых подсистем.

С 2013 по 2016 г. степень координации связи между подсистемой урбанизации и экологической подсистемой округа характеризовалась отстающим развитием подсистемы урбанизации. В 2017, 2018 и 2020 гг. степень координации характеризуется уже

затрудненным развитием его экологической подсистемы. В 2019, 2021 и 2022 гг. степень координации сопряжения между рассматриваемыми подсистемами характеризуется как сбалансированное развитие подсистемы урбанизации при отставании развития экологической подсистемы региона. В 2020 г. значение $D(t)$ снизилось до уровня, соответствующего состоянию «недостаточно сбалансированное развитие», что обусловлено влиянием пандемии на функционирование обеих подсистем. В дальнейшем и подсистема урбанизации, и экологическая подсистема региона адаптировались к этим условиям, и состояния степени координации связи между данными подсистемами поднялись до уровня «сбалансированное развитие».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основании ретроспективных данных с 2013 по 2022 г. о социально-экономической системе ХМАО-Югры и состоянии экологии округа методом оценки степени координации связи между системами урбанизации и экологического состояния региона были получены расчетные значения таких показателей, как степень связи данных систем $C(t)$, комплексная оценка уровня их развития $T(t)$ и степень координации связи между ними $D(t)$. Для оценки значений указанных показателей использовались предварительно рассчитанные на основе метода веса информационной энтропии величины $U(t)$ и $E(t)$, которые характеризуют за обозначенный временной интервал динамику показателей, описывающих функционирование рассматриваемых систем. Динамика $U(t)$ определяется в первую очередь изменениями показателей экономической $Econ(t)$ и социальной $Soc(t)$ урбанизации, влияние же демографической урбанизации $Dem(t)$ незначительно. На изменения значений $E(t)$ наибольшее влияние оказали показатели экологического давления на окружающую среду $EcoEP(t)$ и экологической реакции окружающей среды $EcoEnR(t)$. Расчетные значения $C(t)$ близки к «1», что говорит о наличии очень высокой степени связи между системами урбанизации и экологической системой региона. Восходящий тренд значений $T(t)$ указывает на повышение уровня развития данных систем за рассматриваемый период времени. Используя расчетные значения $U(t)$, $E(t)$ и $D(t)$, была проведена классификация состояний развития степени координации сопряжения между системой урбанизации и экологической системой, согласно которой, во-первых, присутствует устойчивая и высокая координация сопряжения между этими системами

($D(t) > 0,5$); во-вторых, доминирует состояние развития степени координации сопряжения «недостаточно сбалансированное развитие» как с отставанием развития системы урбанизации, так и с отставанием развития экологической системы; в-третьих, состояний развития степени координации с отставанием развития экологической системы в 1,5 раза больше, чем с отставанием развития системы урбанизации. Использование метода оценки степени координации связи между системами урбанизации и экологии региона позволяет осуществлять анализ взаимодействия социально-экономических систем и окружающей среды. Применение же метода веса информационной энтропии при анализе динамики значений показателей, характеризующих функционирование указанных систем, обеспечивает оценку весов показателей, учитывая корреляцию между ними и нивелируя субъективизм аналитика, повышая тем самым объективность этих оценок. Такие показатели, как степени связи изменений обозначенных систем и координации между ними, а также комплексная оценка их развития позволяют количественно оценить существующие взаимосвязи между системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ding, Y. Examining the effects of urbanization and industrialization on carbon dioxide emission: evidence from China's provincial regions / Y. Ding, F. Li // *Energy*. – 2017. – Iss. 125. – P. 533–542.
- Мари́ев, О. С. Моделирование влияния урбанизации на загрязнение атмосферы в российских регионах / О. С. Мари́ев, Н. Б. Давидсон, И. А. Борзова // *Журнал экономической теории*. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 627–641.
- Identifying spatiotemporal interactions between urbanization and eco-environment in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River, China / Y. Yu, Y. Tong, W. Tang, Y. Yuan, Y. Chen // *Sustainability*. – 2018. – Iss. 10 (2). – P. 290.
- Грачев, С. А. Влияние урбанизации на параметры развития территорий / С. А. Грачев // *Экономика, предпринимательство и право*. – 2023. – № 7 (13). – С. 2427–2442.
- Investigation of a coupling model of coordination between low-carbon development and urbanization in China / Q. J. Song, N. Zhou, T. L. Liu [et al.] // *Energy Policy*. – 2018. – Iss. 121. – P. 346–354.
- Comprehensive assessment of the coupling coordination degree between urbanization and ecological environment in the Siberian and Far East Federal Districts, Russia from 2005 to 2017 / J. Zheng, Y. Hu, T. Boldanov [et al.] // *Peer J*. – 2020. – Iss. 8. – P. e9125.
- Urbanization and sustainability under transitional economies: a synthesis for Asian Russia / P. L. Fan, J. Q. Chen, Z. T. Ouyang [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2018. – Iss. 13(9). – P. 095007.
- Examining the coordination between urbanization and eco-environment using coupling and spatial analyses: a case study in China / N. N. Liu, C. Z. Liu, Y. F. B. W. Xia, Da // *Ecological Indicators*. – 2018. – Iss. 93. – P. 1163–1175.
- Space-time indicators in interdependent urban-environmental systems: a study on the Huai river Basin in China / Y. T. Guo, H. W. Wang, P. Nijkamp, J. G. Xu // *Habitat International*. – 2015. – Iss. 45. – P. 135–146.
- Examining the relationship between urbanization and the eco-environment using a coupling analysis: case study of Shanghai, China / J. He, S. Wang, Y. Liu, [et al.] // *Ecological Indicators*. – 2017. – Iss. 77. – P. 185–193.
- Xu, D. The spatiotemporal coupling characteristics of regional urbanization and its influencing factors: taking the Yangtze River Delta as an example / D. Xu, G. L. Hou // *Sustainability*. – 2019. – Iss. 11 (3). – P. 822.
- Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of New Zealand environment / K. F. D. Hughey, R. Cullen, G. N. Kerr, A. J. Cook // *Journal of Environmental Management*. – 2004. – Iss. 70 (1). – P. 85–93.
- Третьякова, Е. А. Оценка показателей устойчивого развития регионов России / Е. А. Третьякова, М. Ю. Осипова // *Проблемы прогнозирования*. – 2018. – № 2 (167). – С. 24–35.
- Алферова, Т. В. Устойчивое развитие региона: подходы к отбору показателей оценки / Т. В. Алферова // *Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика»*. – 2020. – Т. 15, № 4. – С. 494–511.
- He, J. Examining the relationship between urbanization and the eco-environment using a coupling analysis: Case study of Shanghai, China / J. He, S. Wang, Y. Liu [et al.] // *Ecological Indicators*. – 2017. – Iss. 77. – P. 185–193.
- Wu, Y. Analysis on the coupling characteristics of urban ecological structure and local economy in the Yellow River Basin / Y. Wu // *3C Empresa. Investigación y pensamiento crítico*. – 2023. – Iss. 12 (2). – P. 73–90.
- Wei, D. Coupling and Coordination Development Between Urbanization and Eco-environment in National New Areas / D. Wei, Z. Mengjie // *The 3rd International Conference on Big Data and Social Sciences (ICBDSS 2022) will be held on August 19–21, 2022, in Hulunbuir, China, AHCS 8. Hulunbuir, 2023*. – P. 852–864.
- Регионы России. Социально-экономические показатели // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 14.08.2024).
- Ханты-Мансийский автономный округ – Югра // Управление Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, ХМАО-Югре и ЯНАО. – URL: https://72.rosstat.gov.ru/ofstat_xmao (дата обращения: 18.08.2024).
- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году : Государственный доклад. – Москва : Минприроды России. – URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_

okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_/ (дата обращения: 20.08.2024).

21. Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре // Служба по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений. – URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/> (дата обращения: 25.08.2024).

