

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРУПНЫХ ГОРОДОВ

Коротков П.А.¹, Трубянов А.Б.², Загайнова Е.А.³, Никоноров К.Н.¹

¹ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола, Россия (424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3), e-mail: KorotkovPA@volgatech.net

²ФГБОУ ВПО «Марийский государственный университет», Йошкар-Ола, Россия (424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1), e-mail: true47@mail.ru

³ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия (424008, Республика Татарстан, ул. Кремлевская, 18), e-mail: katenazag@yandex.ru

В статье рассматривается проблема достоверности результатов оценки экологической эффективности крупных городов развивающихся стран в условиях быстрой урбанизации. Предложена методика верификации результатов оценки экологической эффективности крупных городов. Методика основана на построении классификаций крупных городов по сводному индексу I экологической эффективности и по исходным экологическим индикаторам с последующей оценкой согласованности полученных классификаций с помощью коэффициента внутриклассовой корреляции ICC . В качестве моделей верификации используются методы кластерного анализа: иерархическая процедура метода Уорда и метод K -средних. Проведено тестирование методики по данным 31 крупного города Российской Федерации за 2008, 2009, 2011 гг. Установлено, что результаты оценок экологической эффективности 31 крупного города Российской Федерации являются согласованными.

Ключевые слова: верификация, кластерный анализ, сопоставление, экологическая эффективность

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MODELS OF MAJOR CITIES ENVIRONMENTAL PERFORMANCE MEASUREMENT

Korotkov P.A.¹, Trubyanov A.B.², Zagaynova E.A.³, Nikonorov K.N.¹

¹Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia (424000, Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenina sq. 3), e-mail: KorotkovPA@volgatech.net

²Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia (424000, Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenina sq. 1), e-mail: true47@mail.ru

³Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia (420008, Republic of Tatarstan, Kazan, 18 Kremlyovskaya St.), e-mail: katenazag@yandex.ru

The article deals with the problem of reliability of the results of major cities environmental performance measurement in developing countries in the context of rapid urbanization. The method for verification of the results of major cities environmental performance measurement is suggested. This method is based on classifying major cities by composite environmental performance index I and by initial environmental indicators followed by evaluation of consistency of the obtained results using the intraclass correlation coefficient ICC . Verification models are represented by the following methods of cluster analysis: a hierarchical procedure of Ward method and the k -means method. The method is applied to the data of 31 major Russian cities for 2008, 2009, 2011. It is determined that the results of environmental performance estimates for 31 major Russian cities are consistent.

Keywords: verification, cluster analysis, comparison, environmental performance

Урбанизация сопровождается ростом производительности и уровня жизни, но создает экологические риски, которые могут нивелировать достигнутые положительные результаты. Если развитые страны урбанизовались постепенно, что позволяло им отрабатывать модели роста методом проб и ошибок, то развивающиеся страны не имеют такой возможности и уже сейчас стремятся к экономическому росту, обеспечивающему повышение качества жизни без

ущерба для окружающей среды и природных ресурсов [5]. Для решения этой задачи используются принципы и индикаторы экологической эффективности [4].

Сложилось два основных подхода к определению экологической эффективности: в рамках концепции эко-эффективности и собственно экологической эффективности (результативности) [3]. Опираясь на эти концепции, мы предложили подход к оценке экологической эффективности урбанизированных территорий, согласно которому она определяется относительной экологичностью функционирования города в пределах экологической устойчивости его природной среды и объемом мероприятий в сфере управления окружающей средой. Сообразно с этим была разработана модель оценки экологической эффективности крупных городов, в результате апробации которой был получен рейтинг крупных городов России по значениям сводного индекса I экологической эффективности за 2008, 2009 и 2011 гг. [5].

Логическим продолжением указанной работы является верификация модели оценки экологической эффективности крупных городов. В данной работе предлагается использовать прямой метод верификации, заключающийся в получении близкого результата, но с использованием другой модели оценки.

Объект исследования – достоверность результатов оценки экологической эффективности крупных городов.

Предмет исследования – модели верификации результатов оценки экологической эффективности крупных городов.

Цель исследования

Цель работы заключается в разработке и применении методики верификации результатов оценки экологической эффективности крупных городов. В качестве моделей верификации предлагается использовать методы кластерного анализа [2]. Предполагается, что результаты классификации 31 крупного города России по сводному индексу I экологической эффективности будут согласовываться с результатами классификации этих городов по исходным экологическим индикаторам.

Материал и методы исследования

Предлагается использовать алгоритмы кластерного анализа, реализованные в популярных статистических пакетах: иерархическую процедуру метода Уорда и метод K -средних [2].

Исходными данными, характеризующими экологичность функционирования, состояние окружающей среды, управление окружающей средой крупных городов, служат 15 экологических индикаторов за 2008, 2009 и 2011 гг. [5].

Методика верификации результатов оценки экологической эффективности крупных городов России включает следующие этапы.

1. Нормировка исходных данных для получения безразмерных экологических индикаторов X_{ij}^l . Для сохранения преемственности нормировка исходных данных проводится по формулам, аналогичным тем, что использовались в [5].

Нормировка экологического индикатора $x_{ij}^{(l)}$ производится по формуле (1), если он связан с анализируемой интегральной характеристикой экологической эффективности (l) монотонно-возрастающей зависимостью:

$$X_{ij}^l = \frac{x_{ij}^{(l)} - x_{ij \min}^{(l)}}{x_{ij \max}^{(l)} - x_{ij \min}^{(l)}} \cdot N, \quad (1)$$

по формуле (2), если экологический индикатор связан с анализируемой интегральной характеристикой экологической эффективности (l) монотонно-убывающей зависимостью:

$$X_{ij}^l = \frac{x_{ij \max}^{(l)} - x_{ij}^{(l)}}{x_{ij \max}^{(l)} - x_{ij \min}^{(l)}} \cdot N, \quad (2)$$

где $x_{ij}^{(l)}$ ($i = 1, 2, \dots, 15$) – значения i -го экологического индикатора интегральной характеристики l ($l = 1$ – экологичность функционирования; $l = 2$ – состояние окружающей среды; $l = 3$ – управление окружающей средой) за год j ($j = 2008, 2009, 2011$); $x_{ij \min}^{(l)}, x_{ij \max}^{(l)}$ – минимальное и максимальное значения экологического индикатора $x_{ij}^{(l)}$ за год j . Нулевое значение нормированного экологического индикатора X_{ij}^l соответствует самой низкой экологической эффективности, а максимальное ($N = 1$ балл) – самой высокой.

2. Кластерный анализ крупных городов. Кластеризация крупных городов проводится по нормированным экологическим индикаторам и сводному индексу I экологической эффективности. Расчеты выполняются в пакете *Statistica 7.0*.

На первом шаге проводится кластерный анализ крупных городов по нормированным экологическим индикаторам и сводному индексу I экологической эффективности с использованием иерархической процедуры метода Уорда. Результаты классификации служат информационной поддержкой для задания числа кластеров k на следующем шаге.

На втором шаге проводится кластерный анализ крупных городов по нормированным экологическим индикаторам и сводному индексу I экологической эффективности методом K -средних. Число кластеров k изначально задается равным 3, поскольку в практике построения экологических рейтингов изучаемые объекты принято разделять на три подгруппы: лидеры, «средняки» и отстающие. Число кластеров может корректироваться с учетом результатов анализа на предыдущем шаге.

3. Представление результатов кластерного анализа крупных городов. В результате анализа диаграмм средних значений нормированных экологических индикаторов и сводного индекса I экологической эффективности по кластерам k , полученных методом K -средних, кластерам присваиваются наименования (в порядке убывания средних значений): «1» (лидеры), «2» («средняки») и «3» (отстающие). Если присвоение наименований в результате анализа диаграммы средних значений нормированных экологических индикаторов по кластерам k кажется неочевидным, то рассчитывается сводный экологический индикатор для каждого из k кластеров в русле подхода, представленного в [5].

Интегральный индикатор экологичности функционирования $I_{1,j}^{(k)}$ крупного города за год j кластера k рассчитывается как среднее арифметическое по формуле:

$$I_{1,j}^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{m=13} \bar{X}_{ij}^{(k)}}{m}, \quad (3)$$

где $\bar{X}_{ij}^{(k)}$ ($i = 1, 2, \dots, 15$) – среднее значение i -го нормированного экологического индикатора кластера k за год j ($j = 2008, 2009, 2011$), m – количество экологических индикаторов, характеризующих экологичность функционирования крупного города.

Интегральные индикаторы состояния окружающей среды $I_{2,j}^{(k)}$ и управления окружающей средой $I_{3,j}^{(k)}$ крупного города за год j кластера k принимаются равными значениям \bar{X}_{14} , \bar{X}_{15} .

Сводный экологический индикатор $I_j^{(k)}$ крупного города, входящего в кластер k , за год j рассчитывается как среднее геометрическое по формуле:

$$I_j^{(k)} = \sqrt[3]{\prod_{l=1}^3 (I_{l,j}^{(k)})}, \quad (4)$$

где $I_{l,j}^{(k)}$ ($l = 1, 2, 3$) – интегральные индикаторы экологичности функционирования, состояния окружающей среды и управления окружающей средой крупного города.

4. Оценка согласованности результатов классификации крупных городов по нормированным экологическим индикаторам и сводному индексу I экологической эффективности. Согласованность результатов классификации крупных городов (после присвоения наименований) оценивается с помощью коэффициента внутрикласовой корреляции (ICC , *Intraclass correlation coefficient*). $ICC = \hat{0},40 \hat{a} \hat{1} 0,59$ считается умеренной межэкспертной надежностью, $ICC = \hat{0},60 \hat{a} \hat{1} 0,79$ – большой и $ICC = 0,80$ – выдающейся

надежностью [1]. Расчеты проводятся в *SPSS 18* с использованием односторонней модели случайных эффектов (*one-way random effects model*).

5. Анализ устойчивости классификации и достоверности результатов оценки экологической эффективности крупных городов. Анализ значений *ICC* проводится по следующей схеме:

- 1) анализируется согласованность результатов классификации (после присвоения наименований) крупных городов по нормированным экологическим индикаторам за смежные годы;
- 2) анализируется согласованность результатов классификации (после присвоения наименований) крупных городов по сводному индексу *I* экологической эффективности за смежные годы;
- 3) анализируется согласованность результатов классификации (после присвоения наименований) крупных городов по нормированным экологическим индикаторам и результатов классификации крупных городов по сводному индексу *I* экологической эффективности за одни и те же годы.

При наличии согласованности для пунктов 1) и 2) делается вывод об устойчивости результатов классификации крупных городов. В основе такого вывода лежит простая идея о том, что результаты классификации крупных городов (после присвоения наименований) для смежных лет должны быть схожими. Обратное будет свидетельствовать либо о кардинальном изменении экологической эффективности, что очень странно для столь короткого периода времени, либо об ошибках классификации. При наличии согласованности для пункта 3) делается вывод о достоверности результатов оценки экологической эффективности крупных городов.

Результаты исследования и их обсуждение

Представлен ход реализации методики верификации результатов оценки экологической эффективности 31 крупного города России только за 2008 г. После предварительной нормировки 15 экологических индикаторов [5] по формулам (1) и (2) был проведен кластерный анализ крупных городов России по нормированным экологическим индикаторам (рис. 1) и сводному индексу *I* экологической эффективности (рис. 2) с использованием иерархической процедуры метода Уорда (евклидово расстояние между объектами).

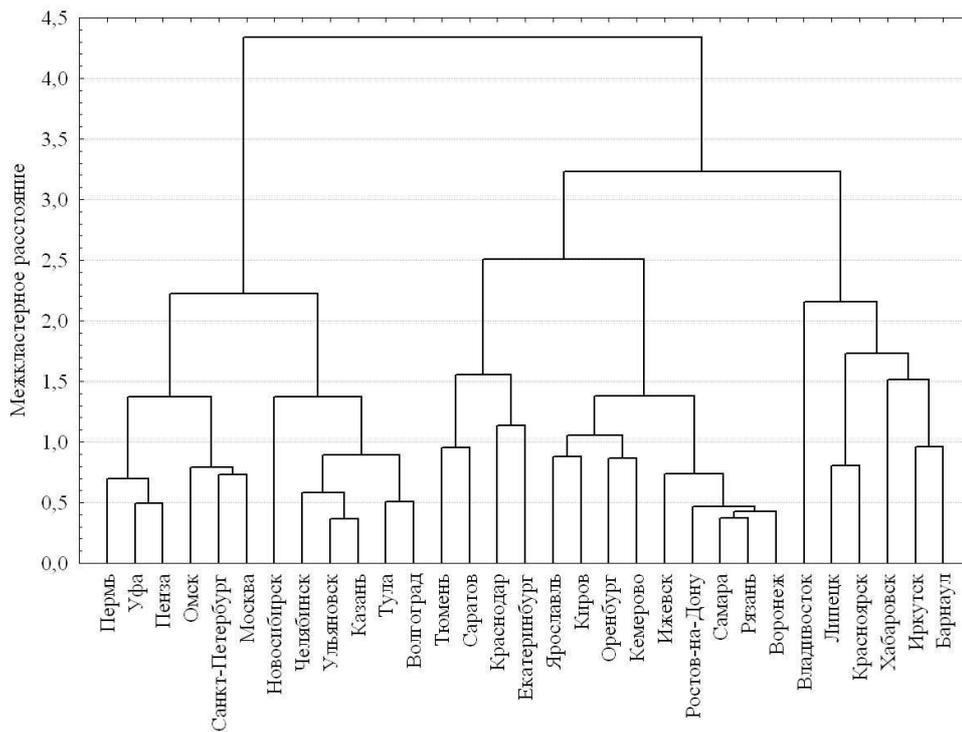


Рис. 1. Дендрограмма кластеризации 31 крупного города по 15 нормированным экологическим индикаторам

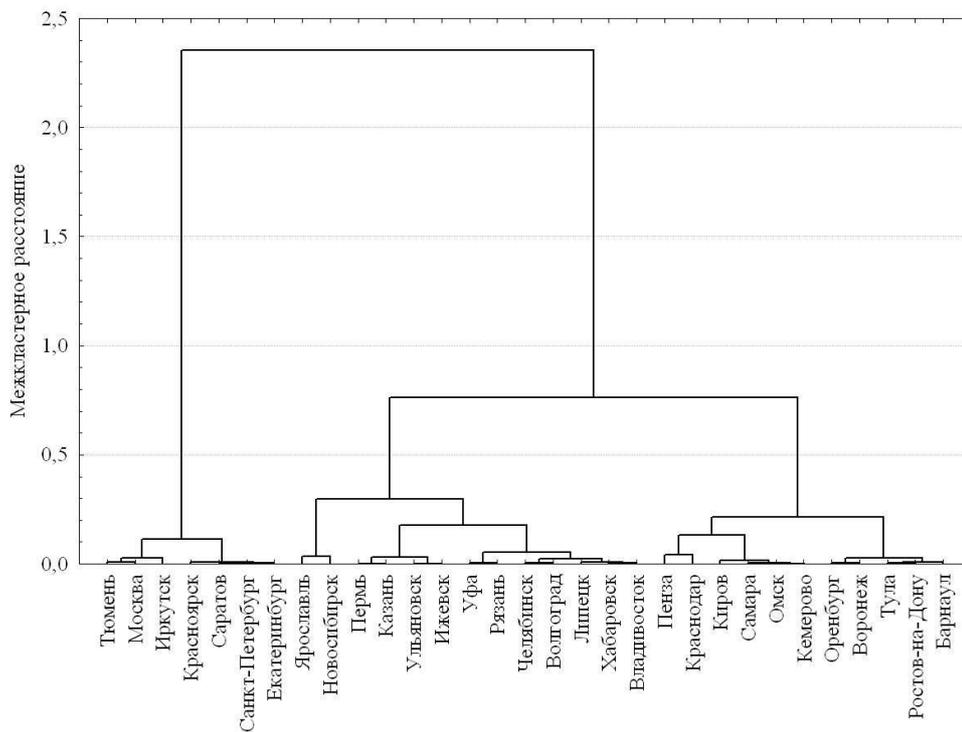


Рис. 2. Дендрограмма кластеризации 31 крупного города по сводному индексу I экологической эффективности

Видно, что на обоих рисунках можно выделить 3 основных кластера.

На следующем этапе проводился кластерный анализ крупных городов по нормированным экологическим индикаторам (рис. 3) и сводному индексу I экологической эффективности (рис. 4) методом K -средних. Число кластеров k задавалось равным 3 из теоретических соображений и с учетом указанных результатов классификации.

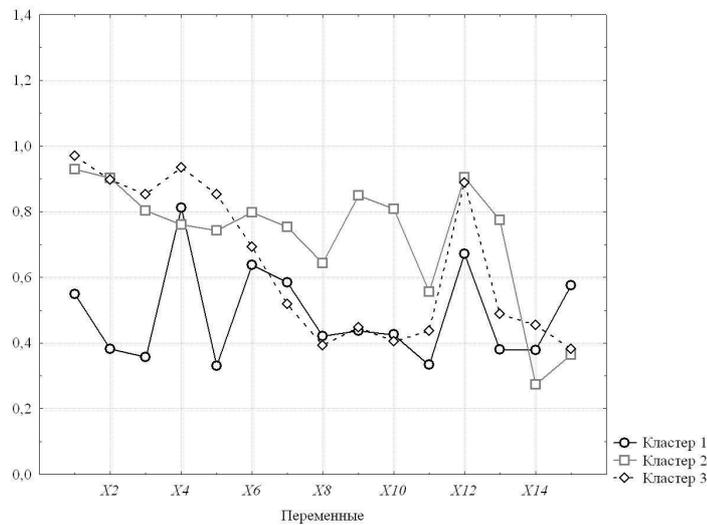


Рис. 3. Средние значения 15 экологических индикаторов по трем кластерам

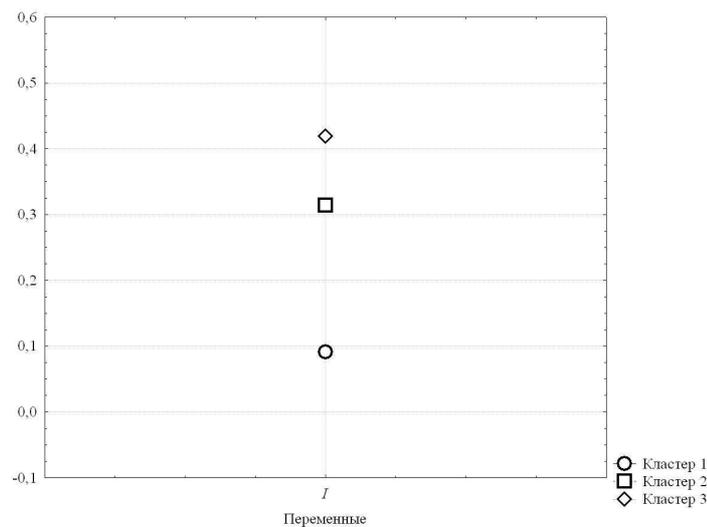


Рис. 4. Средние значения сводного индекса I экологической эффективности по трем кластерам

Из рисунка 4 видно, что кластеру 1 можно присвоить наименование «3» (отстающие), кластеру 2 – наименование «2» («средняки»), кластеру 3 – наименование «1» (лидеры). Графический анализ рисунка 3 не позволяет однозначно определить, каким кластерам присвоить наименования: лидеры, «средняки», отстающие. Для решения этой проблемы по средним значениям нормированных экологических индикаторов (табл. 1) для трех кластеров рассчитывались по формулам (3) и (4) интегральные индикаторы и сводный индикатор.

Таблица 1

Средние значения 15 нормированных экологических индикаторов по трем кластерам

Экологические индикаторы	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
X_1 – удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от стационарных источников: всего на единицу объема промышленного производства, т/руб.	0,549	0,929	0,970
X_2 – удельные выбросы вредных веществ от стационарных источников: твердые вещества на единицу объема промышленного производства, т/руб.	0,382	0,902	0,897
X_3 – удельные выбросы вредных веществ от стационарных источников: диоксид серы (SO_2) на единицу объема промышленного производства, т/руб.	0,357	0,802	0,853
X_4 – удельные выбросы вредных веществ от стационарных источников: оксиды азота (NO_2) на единицу объема промышленного производства, т/руб.	0,812	0,761	0,935
X_5 – удельные выбросы вредных веществ от стационарных источников: оксид углерода (CO) на единицу объема промышленного производства, т/руб.	0,330	0,742	0,852
X_6 – удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от автомобильного транспорта: всего на душу населения, кг/чел.	0,639	0,798	0,693
X_7 – удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от автомобильного транспорта: твердые на душу населения, кг/чел.	0,584	0,754	0,520
X_8 – Удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от автомобильного транспорта: диоксид серы (SO_2) на душу населения, кг/чел.	0,422	0,643	0,392
X_9 – удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от автомобильного транспорта: оксиды азота (NO_2) на душу населения, кг/чел.	0,436	0,849	0,448
X_{10} – удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от автомобильного транспорта: оксид углерода (CO) на душу населения, кг/чел.	0,426	0,808	0,405
X_{11} – удельный сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты на единицу объема промышленного производства млн куб. м/млн руб.	0,671	0,904	0,888
X_{12} – вывезено спецтранспортом бытового мусора с территорий городов на душу населения, куб. м/чел.	0,380	0,774	0,488
X_{13} – удельный вес площади зеленых насаждений в общей площади земель в пределах городской черты, %	0,379	0,273	0,455
X_{14} – уровень загрязнения, баллов	0,333	0,556	0,438
X_{15} – доля текущих затрат на охрану окружающей среды в объеме промышленного производства, %	0,575	0,364	0,382

Значение сводного экологического индикатора для кластера 1 составило $I^{(1)} = 0,436$ балла, для кластера 2 – $I^{(2)} = 0,527$ балла, для кластера 3 – $I^{(3)} = 0,466$ балла. Соответственно, кластеру 1 можно присвоить наименование «3» (отстающие), кластеру 2 – наименование «1» (лидеры), кластеру 3 – наименование «2» («средняки»).

Аналогичным образом выполнялись расчеты за 2009 и 2011 гг.

На следующем этапе для оценки согласованности результатов классификации крупных городов по нормированным экологическим индикаторам ($K_{2008}, K_{2009}, K_{2011}$) и результатов классификации крупных городов по сводному индексу I ($I_{2008}, I_{2009}, I_{2011}$)

экологической эффективности рассчитывались значения коэффициента внутриклассовой корреляции *ICC* (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента внутриклассовой корреляции *ICC*

	K_{2008}	K_{2009}	K_{2011}	I_{2008}	I_{2009}	I_{2011}
K_{2008}	1	0,482	0,234	0,398	-	-
K_{2009}	0,002	1	0,403	-	0,379	-
K_{2011}	0,096	0,010	1	-	-	0,728
I_{2008}	0,011	-	-	1	0,853	0,542
I_{2009}	-	0,015	-	0,000	1	0,478
I_{2011}	-	-	0,000	0,001	0,003	1

Примечание: над главной диагональю указаны коэффициенты внутриклассовой корреляции *ICC*, под главной диагональю – соответствующие уровни значимости коэффициентов внутриклассовой корреляции *ICC*

Видно, что результаты классификации крупных городов по 15 нормированным экологическим индикаторам за смежные и близкие годы (2008–2009, 2009–2011) умеренно согласуются между собой: *ICC* статистически значимы ($p \leq 0,05$), изменяются в диапазоне от 0,403 до 0,482. Сравнение этих коэффициентов корреляции показало, что они между собой значимо не различаются ($p = 0,71$). Результаты классификации крупных городов по сводному индексу *I* экологической эффективности за смежные и близкие годы (2008–2009, 2009–2011) имеют выдающуюся (0,853) и умеренную (0,478) согласованность: *ICC* статистически значимы ($p \leq 0,05$), между собой значимо различаются ($p = 0,007$). Полученные оценки свидетельствуют о корректности проведенной классификации.

Вместе с тем обращает на себя внимание отсутствие корреляции результатов классификации по 15 нормированным экологическим индикаторам за 2008–2011 гг. ($p = 0,096$), что кажется вполне логичным, поскольку за 3 года связь могла исчезнуть. Однако за те же годы результаты классификации крупных городов по сводному индексу *I* умеренно согласуются между собой (0,542). Можно предположить, что данное противоречие возникает вследствие того, что сводный индекс *I* экологической эффективности обладает высокой устойчивостью и слабо реагирует на изменения исходных экологических индикаторов. Это позволяет получать классификации, сохраняющие между собой умеренные связи даже при разнице в 3 года. Требуется проведение дополнительных исследований по проверке устойчивости (чувствительности) сводного индекса *I* экологической эффективности крупных городов.

Результаты классификации крупных городов по 15 нормированным экологическим индикаторам имеют умеренную (0,398 для 2008 г. и 0,379 для 2009 г.) и большую (0,728 для

2011 г.) согласованность с результатами классификации крупных городов по сводному индексу I экологической эффективности за одни и те же годы (2008–2008, 2009–2009, 2011–2011). Все внутриклассовые коэффициенты корреляции являются статистически значимыми ($p \leq 0,05$). ISS для 2008 г. и 2009 г. между собой значимо не различаются ($p = 0,934$). ISS для 2011 г. значимо не различается с ISS для 2008 г. ($p = 0,065$) и с ISS для 2009 г. ($p = 0,054$). Таким образом, проведенный анализ показал, что результаты оценок экологической эффективности 31 крупного города России, полученные в [5], можно признать достоверными.

Выводы и заключение

В работе предложена методика верификации результатов оценки экологической эффективности крупных городов на основе сопоставления классификации крупных городов по сводному индексу I экологической эффективности и классификации крупных городов по исходным экологическим индикаторам. Проведено тестирование методики по данным 31 крупного города России за 2008, 2009, 2011 гг. Установлено, что результаты классификации крупных городов по нормированным исходным экологическим индикаторам согласуются с результатами классификации крупных городов по сводному индексу I экологической эффективности. Методика может использоваться в практической деятельности для верификации результатов количественных исследований экологической эффективности урбанизированных территорий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках проекта проведения научных исследований «Оценка экологической эффективности крупных городов развивающихся стран в условиях быстрой урбанизации», проект № 14-36-01223.

Список литературы

1. Анализ надежности в SPSS. URL: <http://moodle.herzen.spb.ru/pluginfile.php>
2. Калинина В.Н., Соловьев В.И. Введение в многомерный статистический анализ: Учебное пособие / ГУУ. М., 2003. 66 с.
3. Коротков П.А. Концептуальные подходы к оценке экологической эффективности // Современные проблемы и перспективы социально-экономического развития предприятий, отраслей, регионов. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – С. 283–288.
4. Коротков П.А., Никоноров К.Н. Показатели экологической эффективности урбанизированных территорий: общий обзор // Международный научный институт «Educatio». – 2014. – Ч. 3, № 3. – С. 62–66.

5. Korotkov P.A. The Approach to Major Cities Environmental Performance Measurement / P.A. Korotkov, L.P. Bakumenko, T.V. Sarycheva // Mediterranean Journal of Social Sciences. – 2015. Vol 6, № 3 S7. – P. 333–344. DOI: 10.5901/mjss.2015.v6n3s7p333.

Рецензенты:

Рыжаков Е.Д., д.э.н., профессор экономики и финансов, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет» г. Йошкар-Ола;

Корепанов Д.А., д.с.-х.н., профессор кафедры экологии, почвоведения и природопользования, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.