

Интегральная характеристика качества атмосферного воздуха городов Европы

© 2023. В. С. Тикуннов, д. г. н., профессор,
С. К. Белоусов, к. т. н., ведущий инженер,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Колмогорова, д. 1,
e-mail: vstikunov@yandex.ru, web-town@mail.ru

В статье представлена методика оценки качества атмосферного воздуха городов Европы. Подходы к интегральной оценке качества атмосферного воздуха в России и в других странах имеют ряд существенных различий в выборе используемых показателей и в методике получения его интегральной характеристики. Используемый в России индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) является кумулятивным и включает в себя опасные загрязнители с малыми абсолютными концентрациями, в то время как широко распространённый в странах Европы и США индекс качества атмосферного воздуха Air Quality Index (AQI), напротив, отражает качество атмосферного воздуха по самому крупному загрязнителю без учёта классов опасности веществ. Это обуславливает слабую совместимость оценок, проведённых в России, и таковых, сделанных в других странах. В исследовании произведён расчёт интегральных индексов AQI и ИЗА, а также осуществлено их сравнение для городов Европы. Проведена классификация городов Европы по загрязнению атмосферного воздуха, а также преимущественным загрязнителям. Выделено 5 классов городов, относительно однородных по уровню загрязнения воздуха и преимущественным загрязнителям. Полученные с использованием двух подходов к оцениванию результаты позволяют уменьшить недостатки каждого из индексов и дать более подробную характеристику качеству атмосферного воздуха городов.

Ключевые слова: интегральные индексы, качество атмосферного воздуха, индекс загрязнения атмосферы, многопараметрическая классификация концентраций загрязнителей.

Integral classification of air quality in European cities

© 2023. V. S. Tikunov ORCID: 0000-0002-1597-6909[†]
S. K. Belousov ORCID: 0000-0001-9481-5160[‡]
Lomonosov Moscow State University,
1, Kolmogorova St., Moscow, Russia, 119991,
e-mail: vstikunov@yandex.ru, web-town@mail.ru

The article presents a method of integral assessment of air quality in European cities. The approaches to the integrated assessment of air quality in Russia and other countries have a number of significant differences in the set of used indicators and in the methodology for obtaining its integral characteristics. The air pollution index (IZA) used in Russia is cumulative and includes hazardous pollutants with low absolute concentrations, while the Air Quality Index (AQI) widely used in Europe and the United States shows the quality of atmospheric air by the largest pollutant without considering the hazard classes of substances. This leads to weak compatibility of assessments made in Russia and those made in other countries. In the study, the Air Quality Index and the Index of Atmospheric Pollution were calculated, as well as their comparison was carried out for European cities. The results obtained using two approaches to the assessment make it possible to reduce shortcomings of indices and give a more detailed characterization of the air quality in cities. The research shows that multiparameter classification made by one of air quality indices perform is weak, but using both indices at the same time significantly improve results. It is possible to make a relevant cities air quality classification by the main pollutants using both AQI and IZA. Cities in air quality classes form clear-cut clusters that strongly correlate with current economical zoning in Europe.

Keywords: integral indices, air quality, air quality index, multiparameter pollutant classification.

Экологическое состояние территории – важнейшая составляющая качества жизни населения. Воздействие комплекса загрязняющих веществ на человека косвенно находит своё отражение в здоровье населения [1]. Качество атмосферного воздуха играет в этом важную роль. Существуют статистически значимые связи между количеством выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и показателем заболеваемости детского населения региона заболеваниями дыхательных путей [2, 3].

В России мониторинг качества атмосферного воздуха осуществляет преимущественно Росгидромет, обладающий самой широкой в стране сетью постов экологического мониторинга. На основе получаемых данных, согласно утверждённым методическим документам (РД 52.04.667-2005), производится расчёт показателей качества атмосферного воздуха в регионе. К таковым относятся 2 единичных показателя (стандартный индекс – СИ, наибольшая повторяемость – НП) и один интегральный (индекс загрязнения атмосферы – ИЗА) [4].

Индекс загрязнения атмосферы является основополагающим для интегральной оценки качества атмосферного воздуха городов [5]. Он рассчитывается путём суммирования индексов для каждого загрязнителя, полученных в результате сравнения среднегодовых его концентраций со значением ПДК с учётом класса вредности вещества. Для стандартизации принято производить расчёт индекса загрязнения атмосферы по 5 загрязнителям (ИЗА₅).

В зависимости от значения ИЗА₅ территориальной единице даётся оценочная характеристика (в зависимости от значений СИ и НП она может экспертным образом корректироваться). Показатель ИЗА₅ характеризует, в первую очередь, длительное загрязнение атмосферы, поскольку основывается на осреднённых за год показателях.

В международной практике оценивания качества атмосферного воздуха широко применяется индекс качества воздуха (Air Quality Index – AQI), разработанный Агентством по охране окружающей среды США (EPA). Список показателей включает в себя концентрации диоксида азота (NO₂), диоксида серы (SO₂), монооксида углерода (CO), озона (O₃), взвешенных веществ размером менее 10 мкм (PM₁₀) и размером менее 2,5 мкм (PM_{2.5}).

Интегральный индекс AQI – это максимальное значение индекса по всем наблюдаемым загрязнителям из списка. AQI подлежит

ежедневному расчёту, и усреднение на длительный период производится уже по рассчитанному значению индекса, а не по исходным концентрациям. Как и в случае с ИЗА₅, существует оценочная шкала для качественной интерпретации значений индекса [6].

Интегральные индексы ИЗА₅ и AQI достаточно сильно различаются по методике расчёта для того, чтобы их можно было совместно использовать в исследованиях. Каждый из индексов имеет ряд недостатков. Например, ИЗА₅ не учитывает кратковременное очень сильное повышение концентраций загрязнителей, очень зависим от текущей правовой базы и набора загрязнителей, подлежащих мониторингу, на каждой конкретной станции [7]. В то же время AQI не учитывает опасные загрязнители, имеющие малые абсолютные концентрации, а также не является кумулятивным. Массивы данных по AQI недостаточно затрагивают Россию и страны СНГ, и, наоборот, ИЗА редко рассчитывается для зарубежных территорий.

Целью работы было сравнение и совместное применение индексов AQI и ИЗА₅ для уточнения оценки качества атмосферного воздуха городов. Города Европы для этого подходят наилучшим образом, поскольку европейская система мониторинга качества окружающей среды предоставляет достаточный объём данных как в виде концентраций загрязнителей (для расчёта ИЗА₅), так и в виде интегральных данных о качестве атмосферного воздуха (AQI).

Объекты и методы исследования

Данные по текущему значению AQI в городах Европы предоставляются различными государственными структурами, коммерческими и некоммерческими организациями, осуществляющими мониторинг качества атмосферного воздуха. Европейское агентство по окружающей среде (ЕЕА) составляет интерактивную карту European Air Quality Index [8], на которой отображаются текущие и архивные (до 48 ч) значения AQI дискретностью 1 ч для большого количества городов стран Европейского Союза. К сожалению, получить данные по AQI, охватывающие более значительный промежуток времени, не представляется возможным. Проект IQAir также с помощью интерактивной карты [9] предоставляет информацию по значениям AQI городов мира, в том числе Европы, по данным собственных станций и результатам моделирования. Дан-

ные доступны на карте за последние 7 дней, а также в виде таблиц за последний месяц с дискретностью 1 день. Усреднённые значения за год предоставляются только по $PM_{2.5}$. Некоммерческий проект World Air Quality Index (WAQI) предоставляет информацию о значениях AQI в реальном времени для более чем 2000 городов мира. Исходные данные для расчётов берутся из официальных источников национальных агентств по охране окружающей среды. Более того, проект предоставляет архивные данные с 2015 г. по настоящее время по всей величине базы данных [5]. Несмотря на то, что существенным недостатком данного ресурса является очень слабое покрытие данными по территории России (до 2020 г. в базе данных присутствовали только данные по г. Москва), именно данный ресурс позволяет получить наиболее полное покрытие территории Европы исходными данными.

Данные по ИЗА на регулярной основе рассчитываются и публикуются только для территории России в ежегодниках состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России, выпускаемых Главной геофизической лабораторией им. Воейкова. В этих ежегодниках для большинства городов значение ИЗА приводится в качественной интерпретации согласно таблице 2. Значения $ИЗА_5$ для городов Европы возможно вычислить по формуле (1) по усреднённым годовым концентрациям основных загрязняющих веществ, предоставляемым ЕЕА с учётом нормативных значений ПДК по ГН 2.1.6.3492-17.

$$ИЗА_5 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{q_{cp.i}}{ПДК_{c.c.i}} \right)^{c_i}, \quad (1)$$

где $q_{cp.i}$ – среднегодовая концентрация i -го загрязняющего вещества, $ПДК_{c.c.i}$ – его среднесуточная предельно допустимая концентрация, c_i – безразмерный коэффициент, позволяющий привести степень вредности i -го загрязняющего вещества к степени вредности диоксида серы.

Для проведения исследования выбран 2018 г. Среднегодовые значения AQI по каждому из 6 загрязнителей (CO , NO_2 , SO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$, PM_{10}) определены согласно данным WAQI [10] для 196 городов Европы (включая Москву), а расчёты $ИЗА_5$ произведены по данным ЕЕА [8] для 84 городов Европейского союза по 8 загрязнителям (бенз[а]пирен, CO , NO , NO_2 , SO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$, PM_{10}). Значения AQI и ИЗА рассматриваются как по каждому загрязнителю отдельно, так и по интегральному показателю качества атмосферного воздуха. Для 65 городов

Европы одновременно присутствуют значения AQI и ИЗА.

В исследовании применена методика многопараметрической типологии городов [11] по приоритетным загрязнителям по AQI, ИЗА, а также при их совместном использовании. Основным критерием построения модели является гомогенность территориальных единиц, объединяемых в гетерогенные типы. Этот метод предполагает нормировку исходных значений показателя по дисперсиям и математическим ожиданиям.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}. \quad (3)$$

Целью данной нормировки является приведение каждого показателя к стандартному виду (в результате математическое ожидание любого показателя становится равным нулю, а дисперсия – единице).

Затем, с учётом результатов нормировки, была проведена процедура многовариантной типологии, которая реализовывалась на основе критерия минимизации внутригрупповых различий городов при выделении разного числа групп. В качестве меры сходства использовались евклидовы расстояния:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{kj})^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (4)$$

Их вычислению предшествовал этап обработки массива данных по методу главных компонент.

Собственно алгоритм типологии таков. Из полученных значений d_{ik} выбирается наибольшее расстояние, а две территориальные единицы, которые оно связывает, становятся ядрами однородных кластеров. Кластеры формируются распределением остальных территорий между двумя ядрами по минимальности евклидовых расстояний. В случае выделения большего числа кластеров, для определения третьего ядра и всех последующих, каждую из всех оставшихся территориальных единиц подставляют в виде ядра, а остальные распределяются между тремя ядрами по минимальности d_{ik} и находится вариант с наименьшими внутригрупповыми различиями. Процедура определения 4-го ядра и формирование типологии с 4-мя типами аналогична вышеописанной и т. д. до максимально возможной величины, задаваемой заранее – t_{max} .

Получаемый ряд группировок можно анализировать на основе абсолютного и относительного коэффициентов неоднородности и с их помощью выбирать оптимальное количество кластеров:

$$A_k = \frac{100 \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{\frac{1}{2}} I_{ik} I_{jk} \right\}}{\sum_{i=1}^{t_{\max}} \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

$$k = t_{\min}, t_{\min} + 1, \dots, t_{\max}$$

$$O_k = \frac{100 \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{\frac{1}{2}} I_{ik} I_{jk} \right\}}{\sum_{i=1}^{t_{\max}} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{\frac{1}{2}} I_{ik} I_{jk}}, \quad (6)$$

$$k = t_{\min}, t_{\min} + 1, \dots, t_{\max} - 1.$$

Резкое возрастание значений A_k или O_k при уменьшении числа выделяемых кластеров свидетельствует о повышении неоднородности внутри выделенных кластеров, и, напротив, плавное возрастание коэффициентов – признак равномерного её увеличения. Порог, за которым следует резкое повышение неоднородности, оптимально принимать за окончательное число кластеров. В качестве окончательного варианта из всего спектра выбираются «наилучшие со статистической точки зрения» варианты типологии [11]. В данном случае чаще всего это были варианты с пятью таксонами.

Результаты и обсуждение

В результате расчётов значений индексов AQI и ИЗА получена матрица размерностью 53×14 , содержащая в себе значения как AQI, так и ИЗА по загрязнителям для городов Европы, из рассмотрения исключены города, в которых наблюдались пробелы по $PM_{2.5}$ – ключевому показателю для расчёта индекса AQI (из 196 городов, для которых был рассчитан индекс AQI, только для 60 максимальное значение было достигнуто не по AQI для $PM_{2.5}$, а в свою очередь из этих 60 только у 9 не было пробелов по $PM_{2.5}$). Анализ единой матрицы показателей качества воздуха подтвердил значительное различие в оценке качества атмосферного воздуха по AQI и ИЗА₅ (рис. 1).

Коэффициент парной корреляции рангов городов по ИЗА₅ и AQI составляет 32,1%, а среднее значение взаимного отклонения рангов составляет 14,2.

По AQI 57% городов можно охарактеризовать низким уровнем воздействия загрязнителей на здоровье (0–50), причём 3,5% городов укладываются в половину необходимого для этого значения индекса AQI (0–25). 43% городов же относятся к среднему уровню воздействия (50–100), из них 32% находятся в первой половине указанного интервала (50–75), а лишь 11% – во второй (75–100). Таким образом, ни один из рассматриваемых городов не характеризуется нездоровым для человека. Значительную дифференциацию значений AQI по загрязнителям можно наблюдать, в основном в отношении PM_{10} и $PM_{2.5}$ (среднее квадратическое отклонение составляет 6,6 и 17,1 соответственно). Значения AQI по остальным загрязнителям более однородны (среднее квадратическое отклонение менее 5).

В результате расчётов произведена многопараметрическая классификация городов по общему уровню AQI и приоритетным загрязнителям. Оптимальное количество классов – 5, поскольку при увеличении их количества до 6 происходит резкое повышение неоднородности внутри классов. На рисунке 1 показано распределение городов по выделенным классам.

Класс № 1 – немногочисленный и включает в себя 8 городов (преимущественно на северных территориях, а также в Испании, Франции и Швейцарии). Эти города характеризуются низкими значениями AQI как по отдельным загрязнителям, так и в общем. Характерной чертой городов, относящихся к первому классу, являются самые низкие значения AQI PM_{10} и $PM_{2.5}$. Города из класса № 1 являются наиболее безопасными для проживания человека с точки зрения качества атмосферного воздуха.

Класс № 2 состоит из одного города – Тузлы (Босния и Герцеговина), отличающегося высоким значением AQI $PM_{2.5}$ и AQI SO_2 . Причём именно высокая концентрация по диоксиду серы, совершенно нехарактерная для городов Европы, даёт основания выделить этот город в отдельный класс. Экологическая ситуация здесь, в общем, не самая благоприятная, однако не является нездоровой согласно классификации AQI.

Класс № 3 включает в себя 49 городов (в основном на территории Восточной Европы и Италии). Приоритетные загрязнители здесь –

PM_{2.5}, PM₁₀, O₃. Атмосферный воздух этих городов на общеевропейском фоне характеризуется повышенными значениями AQI по всем загрязнителям, однако же с точки зрения общемировой классификации является достаточно благоприятным для здоровья человека.

Класс № 4 по структуре приоритетных загрязнителей соответствует классу № 3, однако значения AQI в городах класса № 4 ниже таковых для класса № 3. Класс № 4 является самым многочисленным и включает в себя 78 городов, равномерно распространённых по территории Европы. Именно города этого класса можно считать типичными для Европы с точки зрения качества атмосферного воздуха по оценке AQI.

Класс № 5 во многом напоминает класс № 4 с тем отличием, что здесь наблюдаются повышенные концентрации СО и немного меньшие концентрации PM_{2.5}, что, впрочем, не сильно влияет на общую оценку качества атмосферного воздуха в городах (16 городов в классе, не имеющих характерного тренда в пространственном распределении).

Оценка качества атмосферного воздуха по ИЗА₅, как было показано выше, даёт результаты, в значительной мере отличающиеся

от оценки по AQI. Индекс ИЗА₅ рассчитан для 84 городов Европы, 85% из которых попадают в категорию загрязнения атмосферы «низкое», 13% – в категорию «повышенное», и лишь 2% – в категорию «высокое» и «очень высокое». При этом наибольшее значение в итоговом индексе ИЗА₅, в отличие от индекса AQI, имеют концентрации озона и диоксида азота (а не PM₁₀ и PM_{2.5}).

Кроме классификации по суммарному значению ИЗА₅ также проведена многопараметрическая классификация городов по вкладу различных загрязнителей в данный индекс. Выделено 5 классов городов, обладающих схожими характеристиками по ИЗА загрязнителей (рис. 2).

Класс № 1 характеризуется средними значениями индекса ИЗА₅ при максимальной роли озона в его формировании. Значения среднегодовых концентраций других загрязнителей находятся на низком уровне (в сумме – менее 1/3 от ИЗА₅). В класс № 1 входит 23 города, расположенных в Северной Европе, и фрагментарно в остальной её части.

Класс № 2 представлен двумя городами в Польше – Краковом и Вроцлавом. Характерная черта атмосферного воздуха данных

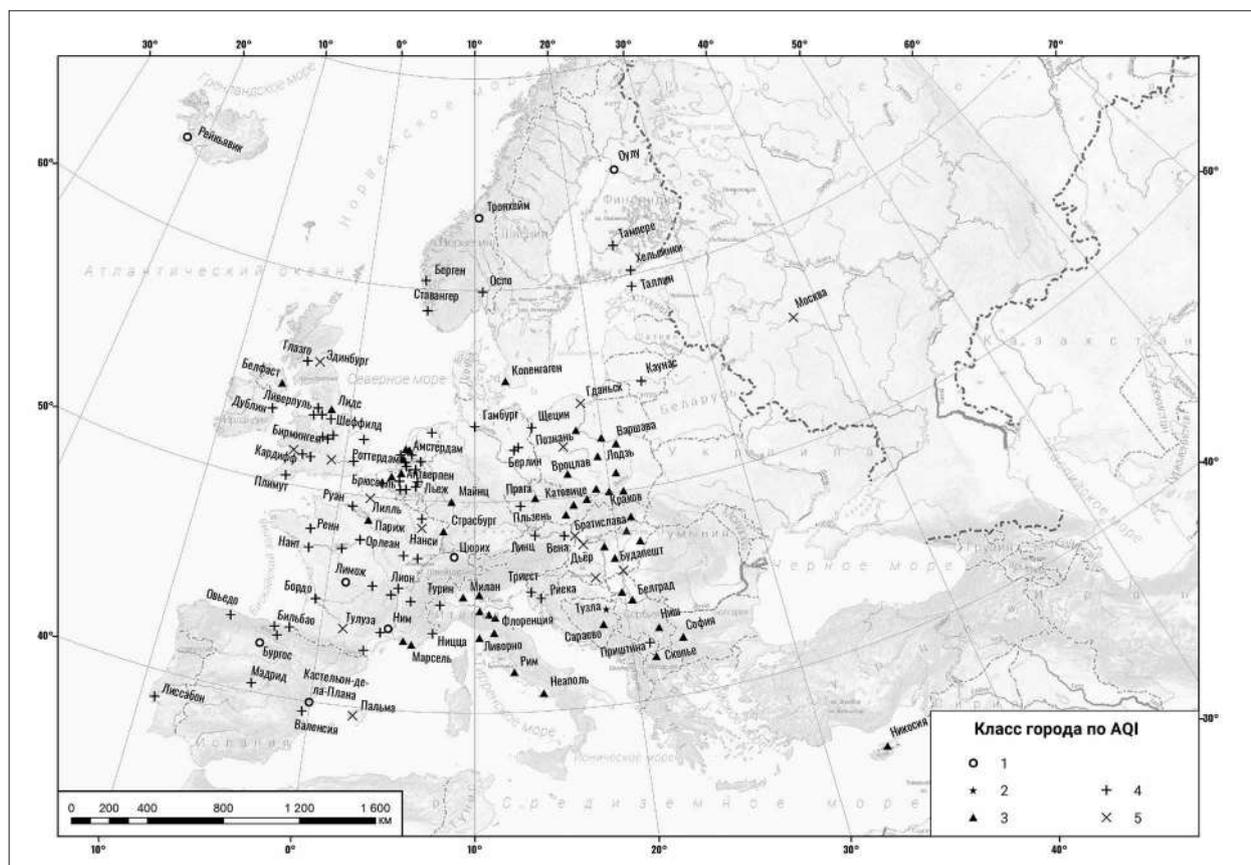


Рис. 1. Классификация городов Европы по значению AQI
 Fig. 1. Classification of European cities by AQI value

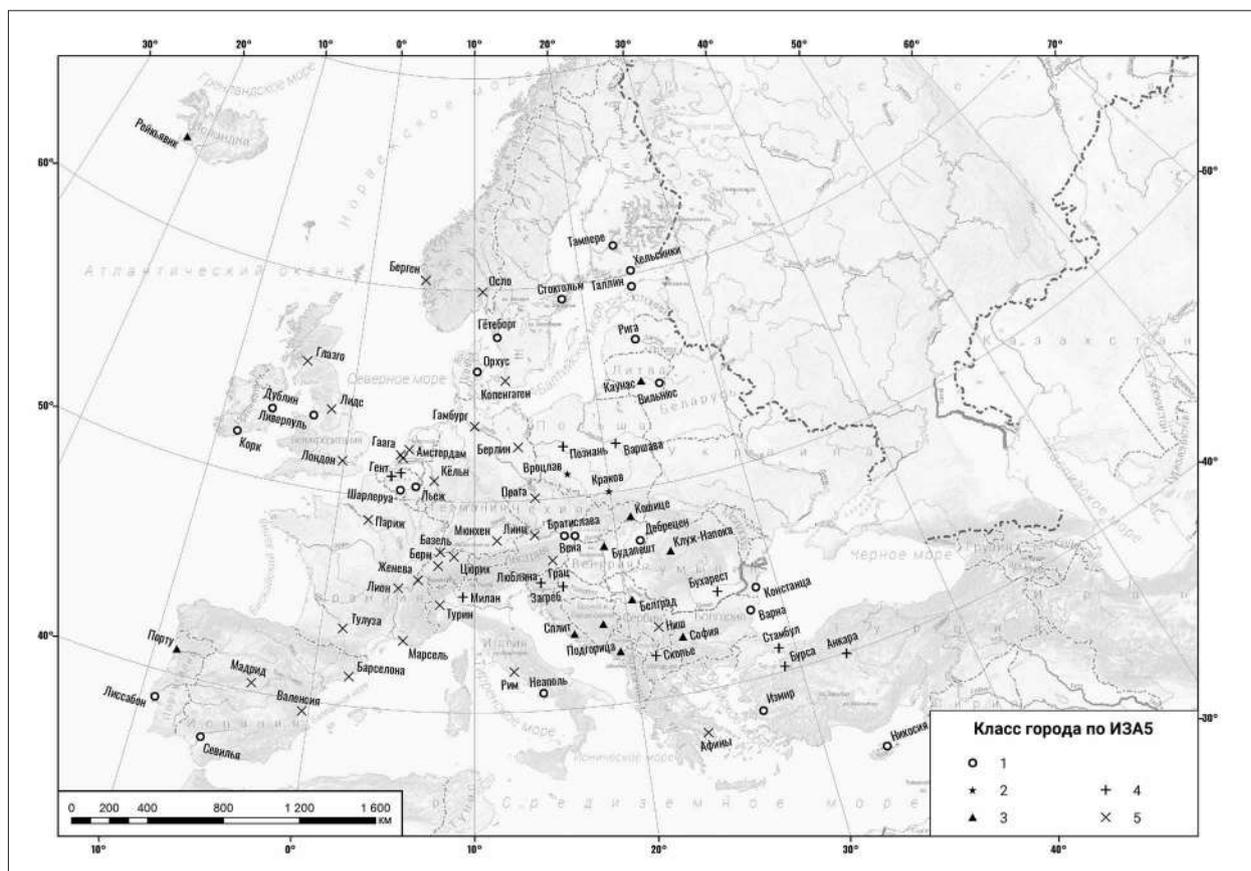


Рис. 2. Классификация городов Европы по значению ИЗА₅
 Fig. 2. Classification of European cities by IZA₅ value

городов – очень большие концентрации бенз[а]пирена, который является веществом наибольшего класса опасности, что обуславливает высокие и очень высокие значения ИЗА₅, (10,10 для Вроцлава и 20,56 для Кракова). Атмосферный воздух в этих городах сильно загрязнён.

Класс № 3 включает в себя 11 городов с наилучшими показателями загрязнения атмосферного воздуха. Практически по всем загрязнителям в городах, входящих в данный класс, отмечаются наименьшие их концентрации, а особенно – по озону и PM_{2.5}. Эти города находятся преимущественно на Балканском полуострове и в Восточной Европе, в то время как согласно классификации по AQI здесь наблюдались повышенные значения индекса.

Класс № 4 представляет собой набор городов с повышенным значением ИЗА₅. Причём это достигается равномерно за счёт практически всех наблюдаемых загрязнителей (за исключением озона). Значительные превышения над средними значениями концентраций можно наблюдать по взвешенным частицам PM₁₀ и PM_{2.5}. В данный класс входит 12 городов, расположенных в Турции, Польше,

Италии и Бельгии, что частично соответствует классификации по AQI.

Класс № 5 является эталонным для городов Европы. Сюда входит 36 городов, распределённых по всей её территории. Во всех из них общий уровень загрязнения по ИЗА₅ оценивается как низкий, нет характерных именно для этого класса типов загрязнителей.

Очевидно, что сформированные классы не вполне соответствуют друг другу. Это обстоятельство хоть и усложняет оценку качества атмосферного воздуха городов, но в то же время позволяет произвести более полную и всестороннюю оценку в силу методических различий в подходах к расчёту данных индексов. Поэтому была проведена многопараметрическая классификация 53 городов Европы, для которых рассчитан как индекс AQI, так и ИЗА₅. В данной классификации приняты во внимание совпадающие частные по загрязнителям и интегральные показатели AQI и ИЗА. Подобно предыдущим классификациям выделено 5 классов городов (рис. 3).

Класс № 1 представляет один город из Польши – Краков. Это единственный город по обоим первоначальным классификациям,

в котором качество атмосферного воздуха оценивается как пограничное с нездоровым, либо как нездоровое. Особенную проблему вызывают стабильно повышенные концентрации малых загрязнителей, таких как бенз[а]пирен, а также значительные концентрации $PM_{2.5}$. Поэтому в объединённой классификации качество воздуха для городов данного класса можно представить как пониженное, с увеличенным влиянием малых загрязнителей высокого класса опасности.

Класс № 2 – лучший с точки зрения экологической безопасности по обоим первоначальным вариантам классификации, тяготеет к территориям Северной Европы. Города, входящие в него, характеризуются минимальными значениями индексов AQI и $ИЗА_5$. В объединённой классификации этому классу присваивается значение качества воздуха высокое.

Класс № 3 представляет собой города, имеющие в общем неплохой уровень как по $ИЗА_5$, так и по AQI, однако значительно загрязнённые $PM_{2.5}$ (юг Восточной Европы и Балканский полуостров). По $ИЗА$ этого не видно, в силу неполноты исходных данных, однако оценка AQI чётко указывает на проблемную область в экологической безопасности данных городов. В объединённой классификации качество атмосферного воздуха

данного класса можно охарактеризовать как нормальное, с увеличенным влиянием взвешенных частиц $PM_{2.5}$.

Города класса № 4 находятся в верхней части классификаций среди рассматриваемых городов (города Западной Европы и Пиренейского полуострова). Уровень загрязнения воздуха здесь достаточно невысокий, равномерный, нет одного ярко выраженного загрязнителя. В объединённой классификации качество воздуха данного класса можно принять повышенным.

Класс № 5, наоборот, представляет собой совокупность городов из нижней части классификации (Восточная Европа и Италия), где концентрации значительной части загрязнителей, особенно озона и $PM_{2.5}$, превышают среднее значение по городам Европы. Однако, общий уровень загрязнения атмосферного воздуха в этих городах по общемировым меркам остаётся невысоким. Поэтому в объединённой классификации качество атмосферного воздуха городов данного класса характеризуется как нормальное, с увеличенным влиянием взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и озона.

Карта объединённой классификации городов Европы по AQI и $ИЗА_5$ (рис. 4) показывает, что города одного класса явным образом образуют территориальные кластеры, чего не наблюдалось при первоначальных классифи-

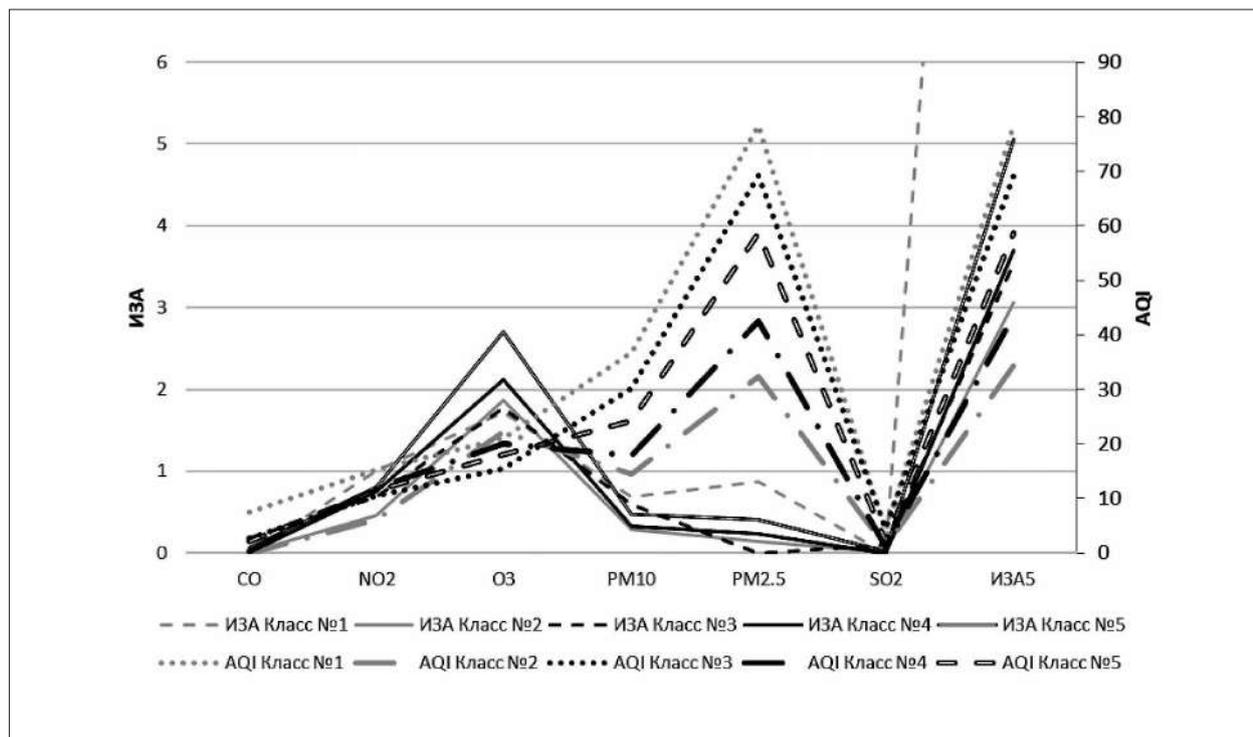


Рис. 3. Усреднённые значения $ИЗА_5$ и AQI для классов городов
 Fig. 3. Average AQI and $ИЗА_5$ values for city classes

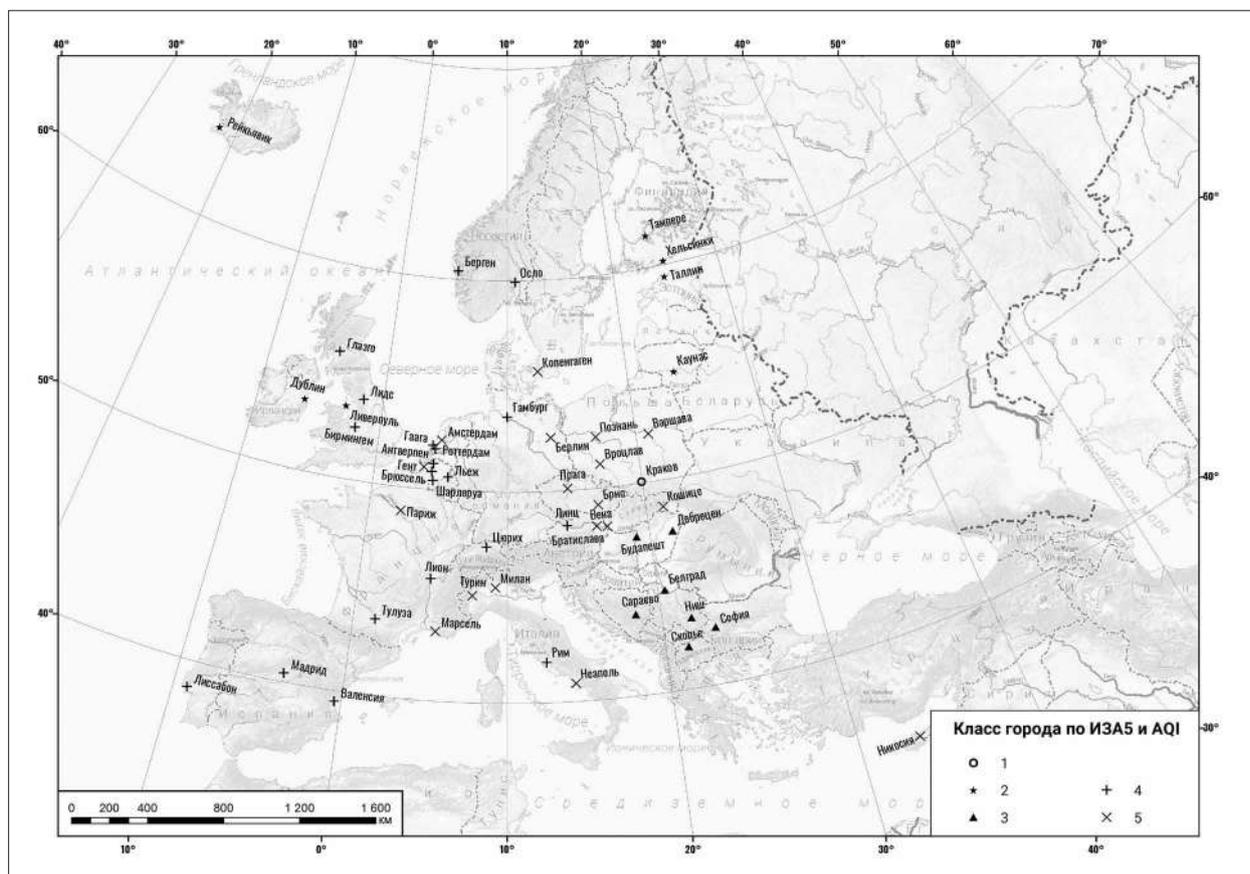


Рис. 4. Объединённая классификация городов Европы по AQI и $ИЗА_5$
 Fig. 4. United classification of European cities by AQI and $ИЗА_5$ value

кациях. Характер пространственного распределения этих кластеров в значительной степени коррелирует с экономико-географическим районированием Европы и объясняется уровнем экономического развития, структурой экономики и особенностями экологической политики государств.

Заключение

Значительные различия в используемых показателях и методиках их интегрирования в итоговый индекс при оценке степени загрязнённости атмосферы по $ИЗА_5$ и AQI вызывает методические сложности при попытке совместной оценки качества воздуха в городах. Но вместе с тем, это же позволяет точнее и полнее оценивать качество воздуха в городах, где возможен расчёт как индекса $ИЗА_5$, так и индекса AQI.

Исследование показало, что применение многопараметрических классификаций по отдельности для каждого из данных индексов не позволяет чётко и однозначно выделять типологические особенности классов в силу пробелов в исходных данных и специфиче-

ских проблем, определяемых методическими особенностями расчёта индексов. В то же время такая классификация, учитывающая оба индекса с их составными частями по отдельным загрязнителям, даёт чёткую картину качества атмосферного воздуха в городах как с точки зрения их типологического описания, так и с точки зрения пространственного распределения полученных классов городов по территории Европы.

По результатам многопараметрической классификации значений индексов AQI и $ИЗА_5$ выделено 5 классов городов Европы, относительно однородных по структуре и уровню загрязнения атмосферного воздуха. Данные классы на карте образуют чётко определяемые территориальные кластеры, в значительной степени коррелирующие с устоявшимися экономико-географическими районами Европы.

Результаты исследования являются важным шагом к решению задачи совместного анализа качества воздуха городов России и других стран мира, в том числе Европы, в условиях недостаточности данных благодаря выявлению закономерностей в возможных

значениях индексов AQI и ИЗА₅ для каждого класса городов по качеству атмосферного воздуха.

Статья подготовлена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-47-01001).

Литература

1. Регионы и города России: Интегральная оценка экологического состояния / Под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов Н.В., 2014. 560 с.
2. Калинин С.И., Торопова С.И. Статистические методы анализа взаимосвязи качества атмосферного воздуха и состояния здоровья детского населения Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 143–148.
3. Зайнуллин В.Г., Боднар И.С. Экологически обусловленная заболеваемость детского населения Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 2. С. 128–133.
4. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2019 г. Ежегодник. С-Пб.: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2020. 249 с.
5. Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В. Экологический портрет российских городов // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 6–18.
6. Air Quality Index Basics [Электронный ресурс] <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/> (Дата обращения: 07.06.2021).
7. Какарека С.В. Оценка суммарного загрязнения атмосферного воздуха // География и природные ресурсы. 2012. № 2. С. 14–20.
8. European Air Quality Index Map [Электронный ресурс] <https://eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index> (Дата обращения: 07.06.2021).
9. IQAir Air Quality Map [Электронный ресурс] <https://iqair.com/air-quality-map> (Дата обращения: 07.06.2021).
10. World Air Quality Index Data Platform [Электронный ресурс] <https://aqicn.org/data-platform/covid19> (Дата обращения: 07.06.2021).

11. Тикун В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). Москва-Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. 367 с.

References

1. Regions and cities of Russia: the integrated assessment of the environment / Ed. N.S. Kasimov. Moskva: IP Filimonov N.V., 2014. 560 p. (in Russian).
2. Kalinin S.I., Toropova S.I. Statistical methods for analyzing the relationship between the quality of atmospheric air and the health status of the child population of the Kirov Region // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-143-148
3. Zainullin V.G., Bodnar I.S. Environmentally caused disease of children population of the Komi Republic // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 2. P. 128–133 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-2-128-133
4. The state of air pollution in cities on the territory of Russia in 2019. Yearbook. Sankt-Peterburg: FGBU “GGO Rosgidrometa”, 2020. 249 p (in Russian).
5. Bitukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Ecological portrait of Russian cities // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2011. No. 4. P. 6–18 (in Russian).
6. Air Quality Index Basics [Internet resource] <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/> (Accessed: 07.06.2021).
7. Kakareka S.V. Assessment of the total air pollution // Geografiya i prirodnye resursy. 2012. No. 2. P. 14–20 (in Russian).
8. European Air Quality Index Map [Internet resource] <https://eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index> (Accessed: 07.06.2021).
9. IQAir Air Quality Map [Internet resource] <https://iqair.com/air-quality-map> (Accessed: 07.06.2021).
10. World Air Quality Index Data Platform [Internet resource] <https://aqicn.org/data-platform/covid19> (Accessed: 07.06.2021).
11. Tikunov V.S. Classifications in geography: renaissance or fading? (Experience of formal classifications). Moskva-Smolensk: Izdatelstvo SGU, 1997. 367 p. (in Russian).