



УДК 502.55 (504.3.054)

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.18>

Анализ подходов к определению уровней загрязнения атмосферного воздуха населенных мест

А. В. Ахтиманкина, В. М. Ерошкин*

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. С целью анализа методологии расчета индексов, позволяющих сделать вывод об уровне загрязнения атмосферного воздуха населенных мест, рассмотрены подходы к расчету таких индексов, как ИЗА, КИЗА (Россия), AQI (США, Австралия), DAQI (Великобритания), CAQI, YACAQI (Европейский союз), AQHI (Канада, Гонконг), PSI (Сингапур). Сделан вывод о применимости данных методов на территории России. Расчетная часть выполнена на основе данных о концентрациях загрязняющих веществ, полученных на автоматических станциях контроля атмосферного воздуха г. Иркутска за 2019 г. Была рассчитана абсолютная и относительная частота встречаемости различных значений индексов. Выявлено, что, несмотря на видимое сходство результатов, анализ необходимо проводить на уровне субиндексов или индексов загрязнения для каждого отдельного вещества. Кроме того, расчет абсолютной и относительной частоты проявления индексов, соответствующих различным уровням загрязнения, показал, что осреднение результатов скрывает проявление опасных уровней загрязнения, которые могут быть критичными для чувствительных групп населения (люди с хроническими заболеваниями, дети, пожилые).

Ключевые слова: индекс загрязнения атмосферы, качество атмосферного воздуха, уровень загрязнения атмосферы.

Для цитирования: Ахтиманкина А. В., Ерошкин В. М. Анализ подходов к определению уровней загрязнения атмосферного воздуха населенных мест // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 44. С. 18–32. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.18>

Original article

Analysis of Approaches to Determining the Atmosphere Pollution Level of Settlements

A. V. Akhtimankina, V. M. Eroshkin*

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to analyze the methodology for calculating indices are used both in the Russian Federation and in a number of foreign countries, that allow us to draw a conclusion about the level of atmospheric pollution. The article considers approaches to the calculation of such indices as IZA, KIZA (Russia), AQI (USA, Australia), DAQI (Great Britain), CAQI, YACAQI (European Union), AQHI (Canada, Hong Kong), PSI (Singapore). The main calculation formulas of the indices, the parameters on the basis of which they are calculated and how the results can be interpreted are described. The conclusion about the applicability of these methods on the territory of Russia is made. The calculation part was made on the basis of data on the concentrations of pollutants obtained

© Ахтиманкина А. В., Ерошкин В. М., 2023

*Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

at automatic atmospheric air monitoring stations in Irkutsk for 2019. In addition, the absolute and relative frequency of occurrence of various index values was calculated. It was found that despite the apparent similarity of the results, the analysis should be carried out at the level of sub-indices or pollution indices for each individual substance. In addition, the calculation of the absolute and relative frequencies of the occurrence of indices corresponding to different levels of pollution showed that averaging the results hides the occurrence of dangerous levels of pollution that may be critical for sensitive population groups (people with chronic diseases, children, the elderly).

Keywords: air pollution index, air quality, air pollution level.

For citation: Akhtimankina A.V., Eroshkin V.M. Analysis of Approaches to Determining the Atmosphere Pollution Level of Settlements. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 44, pp. 18-32. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.18> (in Russian)

Введение

В 2019 г. Иркутск и ряд других городов области в очередной раз попали в список городов с очень высоким уровнем загрязнения атмосферы [Государственный доклад ... , 2020]. Поэтому с каждым годом возрастает потребность в оперативном, эффективном и информативном подходе к расчету уровня загрязнения атмосферы.

На сегодняшний день альтернативными методами оценки уровней загрязнения атмосферного воздуха являются методы математического моделирования [Ахтиманкина, 2017; Методика оперативной оценки ... , 2011; Estimating air pollution ... , 2020], результаты которого представляют интерес для научного сообщества, однако сложны для восприятия обычным пользователем, например проживающим на той или иной территории. Поэтому расчет уровней загрязнения в виде индексов и различных показателей является одним из ключевых средств информирования населения о состоянии окружающей среды, который в настоящее время применяется во многих странах [Расчет индекса загрязнения ... , 2020; Голунков, Аллянова, 2006; Improving the current ... , 2022; Kumar, 2022]. Однако, несмотря на удобство интерпретации и восприятия результатов расчета индексов качества атмосферы, в основе их методики должен быть учет множества факторов – от времени нахождения концентраций, превышающих установленные нормы, в среде до степени опасности вещества и его воздействия на человека. Российская нормативная база по данному вопросу опирается на положения руководящего документа «Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию»¹, который был разработан 18 лет назад.

Отдельным важным вопросом является применение индексов загрязнения атмосферы не как инструмента анализа уже оказанных воздействий на среду и человека, а как метода прогноза [Логвина, Логвин, 2014].

¹ РД 52.04.667-2005 «Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118?ysclid=lj7u2xhx8a342419087>.

Методологическая основа расчета индексов качества атмосферного воздуха в России и ряде зарубежных стран

Россия. Существующий в Российской Федерации подход основан на отношении среднегодовых концентраций загрязнителей и их среднесуточных предельно допустимых концентраций (ПДК_{с.с.}). Также во внимание принимается класс опасности вещества, а сама формула выглядит следующим образом:

$$I = \left(\frac{q_{cp}}{\text{ПДК}_{с.с.}} \right)^c, \quad (1)$$

где q_{cp} – среднегодовая концентрация примеси, мг/м³; ПДК_{с.с.} – среднесуточная предельно допустимая концентрация примеси, c – константа, принимающая значения 1,5; 1,3; 1,0; 0,85 для соответственно 1, 2, 3, 4-го классов опасности веществ, позволяющая привести степень вредности вещества к степени вредности диоксида серы.

Комплексный ИЗА (I_n), учитывающий n загрязняющих веществ, рассчитывается как сумма значений, полученных в результате расчета I . Из анализа данных наблюдений за загрязнением атмосферы получено, что в атмосфере городов России в среднем имеется 4–5 примесей, которые вносят основной вклад в создание высокого уровня загрязнения, поэтому принимается n равным 5. Комплексный индекс загрязнения атмосферы (КИЗА) имеет шкалу значений, состоящую из четырех уровней – от низкого, при котором КИЗА меньше или равен 5, до очень высокого, когда КИЗА превышает отметку в 14.

США. Американским законодательством предусмотрена регулярная публикация индекса качества воздуха (AQI). Расчет производится для шести веществ: озона (O₃), взвешенных частиц (PM₁₀ и PM_{2,5}), оксида углерода (CO), диоксида серы (SO₂) и диоксида азота (NO₂) [CFR Part 58 ... , 1999].

Для расчета AQI необходимо рассчитать субиндекс по каждому веществу и затем выбрать максимальный из них. Субиндекс – это показатель, рассчитанный для отдельного вещества, расчетная формула которого представлена ниже [Ibid]:

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} \cdot (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo}, \quad (2)$$

где I_p – значение субиндекса загрязнения для загрязняющего вещества p ; C_p – средняя концентрация вещества p за соответствующий период; BP_{Hi} – граница интервала, больше или равная C_p ; BP_{Lo} – граница интервала, меньшая C_p ; I_{Hi} – значение AQI, соответствующее BP_{Hi} ; I_{Lo} – значение AQI, соответствующее BP_{Lo} .

Интервалы значений индекса AQI варьируют в пределах 0–50, что соответствует «хорошему» качеству атмосферного воздуха. Если достигает 301 и выше, то состояние воздуха характеризуется как «опасное».

Австралия. В 2020 г. правительство штата Новый Южный Уэльс приняло решение отказаться от применения индекса качества воздуха (AQI), ис-

пользовавшегося на протяжении 12 лет до этого, и перейти на новую систему категорий качества воздуха (AQC) [About the air ... , 2020].

Категории AQI подразумевают под собой пять цветовых индикаторов, которыми обозначают состояние атмосферы на той или иной территории. Индикаторы варьируются следующим образом: хорошее качество – зеленый, умеренное – желтый, плохое – оранжевый, очень плохое – красный, чрезвычайно плохое – бордовый [Ibid]. Данная шкала сопровождается перечнем советов по планированию активности в течение дня и в совокупности с ним должна помогать людям из чувствительных групп населения: пожилым, детям, беременным женщинам, а также людям с респираторными или сердечными заболеваниями. Категория определяется путем сравнения концентрации загрязняющего вещества с соответствующими табличными значениями.

Показатель AQI рассчитывается по концентрациям шести веществ: озона, диоксида азота, оксида углерода, диоксида серы, а также взвешенных веществ $PM_{2,5}$ и PM_{10} . Так, категории качества воздуха «хорошее» соответствуют значения (за период осреднения 1 час): O_3 менее $0,13 \text{ мг/м}^3$, NO_2 менее $0,15 \text{ мг/м}^3$, CO менее 7 мг/м^3 (за 8 часов), SO_2 менее $0,35 \text{ мг/м}^3$, PM_{10} менее $0,05 \text{ мг/м}^3$, $PM_{2,5}$ менее $0,025 \text{ мг/м}^3$. В свою очередь «чрезвычайно плохое» качество воздуха характеризуется следующими показателями: O_3 более $0,4 \text{ мг/м}^3$, NO_2 более $0,46 \text{ мг/м}^3$, CO более 21 мг/м^3 (за 8 часов), SO_2 более $1,1 \text{ мг/м}^3$, PM_{10} более $0,6 \text{ мг/м}^3$, $PM_{2,5}$ более $0,3 \text{ мг/м}^3$.

Великобритания. Управление по вопросам окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства Великобритании (DEFRA) публикует ежедневный индекс качества воздуха (DAQI) в целях информирования населения о текущем уровне качества воздуха и рекомендации по планированию активности. DAQI был дополнен и изменен в 2012 г. согласно рекомендациям Комитета по воздействию загрязняющих веществ на здоровье человека (COMEAR) [DEFRA. Update on ... , 2013; Review of the ... , 2011].

Индекс рассчитывается на основе данных о концентрациях пяти основных загрязнителей: озона, диоксида азота, диоксида серы, взвешенных веществ PM_{10} и $PM_{2,5}$. Метод расчета состоит в приравнивании данных концентраций соответствующим табличным значениям индекса. При расчете средних концентраций за час, восемь часов и сутки обязательно наличие данных как минимум за 75 % срока [About the air ... , 2020].

DAQI разделен на четыре категории и выражается числами от 1 до 10 включительно. Категории – от низкого уровня загрязнения (например, для NO_2 концентрации находятся в пределах от 0 до $0,2 \text{ мг/м}^3$) до очень высокого (для NO_2 концентрация составляет более $0,6 \text{ мг/м}^3$) – группируются по цветам. Низкий уровень загрязнения отображается зеленым цветом, умеренный – желтым, высокий – красным, очень высокий – фиолетовым.

На основе полученного в результате расчета ежедневного индекса формируется прогноз загрязнения воздуха [DEFRA. Update ... , 2013]. Прогноз публикуется метеорологической службой Великобритании каждое утро и рассчитан на текущий день, а также на ближайшие четыре дня.

Европейский союз. Индекс общего качества воздуха (CAQI) используется странами Европейского союза для информирования граждан о состоянии атмосферы с 2006 г. Он представляет собой единое значение, сформированное путем обобщения ряда показаний концентраций разных веществ в атмосферном воздухе [Comparing Urban Air ... , 2012].

Расчет производится для трех основных загрязнителей – NO₂, PM₁₀, O₃, но также он может рассматривать концентрацию PM_{2,5}, CO и SO₂ в воздухе. Для большей актуальности данных их поделили на два типа: фоновая городская концентрация, представляющая собой общее качество воздуха в жилом районе, и придорожные концентрации [Ibid]. Точное значение индекса для вещества определяется с помощью графического метода. А уровни варьируются от очень низкого (CAQI = 0–25) до очень высокого (CAQI более 100). Так, «очень низкому» уровню соответствует концентрация NO₂, равная 0,05 мг/м³, а «очень высокому» – более 0,4 мг/м³.

Представленный индекс используется для оценки уровня загрязнения за час или день. Однако в Европейском союзе также применяется годовой индекс YACAQI, который представляет собой отношение среднегодовых концентраций к максимально допустимым значениям. Он также рассчитывается для фоновых и придорожных концентраций [Ibid].

Для расчета годового индекса YACAQI обязательными являются данные о концентрациях диоксида азота, взвешенных веществ PM₁₀ и озона, побочными веществами оказываются взвешенные вещества PM_{2,5}, бензол, диоксид серы и оксид углерода. Итоговый индекс вычисляется по формуле

$$YACAQI = \frac{\sum_{i=1}^n YACAQI_i}{n}, \quad (3)$$

где $YACAQI_i$ – субиндекс для показателя, n – общее число показателей. В данном случае $n = 4$. Целевой субиндекс, т. е. значение, которое получившийся субиндекс не должен превысить, всегда равен единице.

Канада. Канадский индекс здоровья по качеству воздуха (AQHI) был разработан для информирования населения о том, какое влияние может в данный момент оказывать атмосферный воздух на здоровье. Целью создания индекса являлась возможность помочь гражданам принимать решения по охране собственного здоровья путем сокращения кратковременных неблагоприятных воздействий загрязнения воздуха. Индекс ориентирован на людей, попадающих в «группу риска»: детей, пожилых людей, людей, страдающих от сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний дыхательной системы. Шкала AQHI определяет уровень риска для здоровья – от «малого» до «очень высокого», при этом значение индекса варьируется от 0–3 до значенных, превышающих 10, соответственно.

Расчет индекса AQHI производят лишь для трех ключевых веществ: O₃, NO₂, PM. Причем существуют два варианта индекса – с учетом PM_{2,5} и с учетом PM₁₀. Расчет производится по формулам [A New Multipollutant ... , 2012]:

$$PM_{2,5}AQHI = \frac{1000}{10,4} \cdot \left(e^{0,000871 \cdot C_{NO_2}} - 1 + e^{0,000537 \cdot C_{O_3}} - 1 + e^{0,000487 \cdot C_{PM_{2,5}}} - 1 \right), \quad (4)$$

$$PM_{10}AQHI = \frac{1000}{11,7} \cdot \left(e^{0,000871 \cdot C_{NO_2}} - 1 + e^{0,000537 \cdot C_{O_3}} - 1 + e^{0,000487 \cdot C_{PM_{10}}} - 1 \right), \quad (5)$$

где C – средняя концентрация загрязнителя за последние три часа. Единицами измерения для взвешенных веществ являются мкг/м^3 , а для газов ppb – частицы на миллиард [Ibid].

Полученные значения округляют до целых чисел, а при $AQHI < 0,5$ приравнивают его к единице [Ibid].

Сингапур. В 2014 г. Национальное агентство окружающей среды Сингапура обновило использующийся стандартный индекс загрязнителей (PSI) и условия его расчета [Computation of the ... , 2014]. В настоящее время индекс рассчитывается на основе данных о концентрациях шести приоритетных веществ: озона (O_3), взвешенных частиц PM_{10} , взвешенных частиц $PM_{2,5}$, оксида углерода (CO), диоксида серы (SO_2) и диоксида азота (NO_2). Полученные значения варьируются в интервале от 0 («хорошее» состояние атмосферного воздуха) до 500 («опасное»)

Формула для расчета стандартного индекса загрязнителей выглядит следующим образом:

$$I_i = \frac{I_{i,j+1} - I_{i,j}}{X_{i,j+1} - X_{i,j}} (X_i - X_{i,j}) + I_{i,j}, \quad (6)$$

где I_i – значение индекса загрязнения для загрязняющего вещества i ; X_i – средняя концентрация вещества i ; $X_{i,j+1}$ – граница интервала, больше или равная X_i ; $X_{i,j}$ – граница интервала, меньше X_i ; $I_{i,j+1}$ – значение индекса, соответствующее $X_{i,j+1}$; $I_{i,j}$ – значение индекса, соответствующее $X_{i,j}$. Для каждого интервала индекса установлены значения граничных концентраций.

Гонконг. По данным станций контроля воздуха, подразделяющихся на фоновые и придорожные, в Гонконге рассчитывается индекс здоровья и качества воздуха (AQHI). AQHI вычисляется на основе средних концентраций за последние три часа таких веществ, как O_3 , NO_2 , SO_2 , а также взвешенных веществ ($PM_{2,5}$ или PM_{10} – в зависимости от того, какая из концентраций выше) и представляет собой сумму процентного добавочного риска здоровью по всем четырем компонентам [Does the AQHI ... , 2020]:

$$AR_i = [e^{\beta_i C_i} - 1] \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где i – загрязнитель, AR – процентный добавочный риск для отдельного загрязнителя, C – средняя концентрация загрязнителя за последние три часа, мкг/м^3 , β – измеренный коэффициент регрессии, относящийся к каждому загрязнителю [Ibid].

Процентный добавочный риск рассчитывается по формуле

$$AR = \sum_{i=1}^n AR_i, \quad (8)$$

где n – количество веществ, равное 4. На основе полученных значений можно сделать вывод об уровне угрозы. Так, если процентный добавочный риск лежит в диапазоне от 0 до 1,88, т. е. соответствует AQNI, равному 1, то это низкий уровень угрозы здоровью. Если же AQNI равен 10 и более, а значение процентного добавочного риска превысило 19,37, то это серьезный уровень угрозы здоровью.

Таким образом, главным отличием российского подхода от большинства зарубежных является период осреднения данных о концентрации загрязнителей. Данный факт связан с разными предназначениями индексов. В России по значениям КИЗА и ИЗА сравнивают уровни загрязнения атмосферы в разных городах, составляя списки самых загрязненных за прошедший год. Также по значениям КИЗА может быть проведен анализ динамики улучшения или ухудшения ситуации в отдельно взятом населенном пункте при условии, что ПДК необходимых веществ не изменялись, иначе анализ будет некорректен. Минусом такого подхода, несомненно, можно назвать отсутствие возможности анализа эффектов краткосрочного воздействия загрязнителей на человека.

Европейский годовой индекс YASAQI также используют для сравнения между собой уровней загрязнения в разных городах ЕС по итогам прошедшего года. Однако с помощью специализированных ресурсов граждане ЕС могут сравнить состояние атмосферы в городах и в реальном времени, ориентируясь на значения индекса SAQI.

Часть рассмотренных индексов (например, AQNI Канады, AQI США, AQС Австралии, DAQI Великобритании) дают прогноз о состоянии воздуха на ближайшее время и, как правило, предусматривают советы по планированию активности для уязвимых групп в частности и для населения в целом. Такой подход гарантирует хорошую осведомленность населения о текущем состоянии атмосферы, однако может быть неверно интерпретирован при попытке анализа данных на протяжении длительного срока, поскольку в большинстве своем индексы учитывают эффекты краткосрочного влияния поллютантов на здоровье человека.

В то же время не все подходы могут быть рассмотрены на практике для оценки их применимости в качестве альтернативы ИЗА (КИЗА). К примеру, подходы к оценке загрязнения атмосферы, применяемые в Канаде и Гонконге, не подойдут по причине слишком специфической формулы: индексы были разработаны специально для этих стран на основе данных статистики обращений в больницы и смертности среди населения страны и соотношения этих данных с концентрациями тех или иных веществ в атмосфере на протяжении полутора десятков лет. Таким образом, коэффициенты, которые используются в формулах расчета индексов, должны быть рассчитаны заново для нового региона. Также стоит отметить, что канадский метод никак не привязан к установленным в стране ПДК.

Подход к расчету индекса PSI (Сингапур) практически во всем дублирует подход, применяемый в США.

Таким образом, для оценки практической применимости изученных методов были отобраны следующие подходы к расчету индекса загрязнения атмосферы: индексы AQI (США), DAQI (Великобритания), AQC (Австралия), SAQI (Европейский союз), годовой индекс YACAQI (Европейский союз). Теоретически наиболее эффективным подходом выглядит индекс AQI (США), так как при его расчете учитывается достаточно много веществ, он принимает во внимание влияние веществ на здоровье человека, а также имеет довольно широкую шкалу значений.

Материалы исследования

Исходными данными для расчета индексов загрязнения атмосферного воздуха альтернативными методами послужили значения концентраций, зафиксированные в таблице загрязнения атмосферного воздуха за 2019 г., полученные по результатам мониторинга на пяти автоматических станциях контроля, расположенных на территории г. Иркутска.

В расчете были учтены данные о концентрациях семи веществ: диоксида серы, озона, взвешенных веществ, PM₁₀, PM_{2,5}, диоксида азота, оксида углерода, среднегодовые концентрации которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Среднегодовые концентрации веществ (\bar{q}) и средние квадратические отклонения (σ) за 2019 г. в г. Иркутске, мг/м³

Наименование вещества	$\bar{q} \pm \sigma$
Взвешенные вещества	0,23±0,10
SO ₂	0,03±0,02
O ₃	0,03±0,02
PM ₁₀	0,05±0,03
NO ₂	0,02±0,02
CO	0,54±0,20
PM _{2,5}	0,0017±0,0001

Для практической части исследования было решено рассчитывать зарубежные индексы, используя те же значения табличных интервалов, что и за рубежом, т. е. подставлять имеющиеся значения концентраций в формулу так, как если бы эти значения были получены в той стране, методом которой производится расчет.

По каждому из зарубежных методов были составлены таблицы с абсолютной и относительной частотой встречаемости тех или иных значений индекса.

Стоит отметить малую выборку данных по PM_{2,5} и относительно малую выборку по PM₁₀. Это связано с тем, что отбор проб производился максимум один раз в сутки, а контроль осуществляется только на одной станции.

Также следует указать на отсутствие в таблицах наблюдений данных о бенз(а)пирене – основном загрязнителе воздушной среды г. Иркутска. Это,

несомненно, скажется на корректности оценки уровня загрязнения атмосферы, но поскольку ни в одном рассматриваемом зарубежном подходе концентрация бенз(а)пирена не учитывается, это позволит сравнить подходы в более близких условиях.

Следующим моментом, на котором хотелось бы заострить внимание, являются временные интервалы, для которых установлены зарубежные нормативы. В зарубежных странах используют такие временные промежутки, как час, три часа, восемь часов, сутки, а также год, в качестве времени осреднения концентраций [National Environment Protection ... , 2013; National air quality ... , 2000]. В Австралии даже используют четырехчасовой интервал. Отсюда вытекает одна из главных причин прибегать в данной работе к ряду допущений. Российские нормативы предельно допустимых концентраций рассчитаны либо на долгосрочное пребывание определенной концентрации поллютанта в воздухе – год и более (ПДК_{с.с.}, ПДК_{с.г.}), либо на краткосрочное воздействие на организм человека – 20–30 мин (ПДК_{м.р.}). Из-за этого отсутствия широкого спектра временных промежутков и придется приравнивать зарубежные нормативы для одного, трех, четырех, восьми часов к ПДК_{м.р.}.

Обсуждение результатов

Расчет ИЗА и КИЗА. Для расчета уровня загрязнения атмосферы были посчитаны среднегодовые концентрации следующих поллютантов: взвешенных веществ, диоксида серы, озона, взвешенных веществ PM₁₀, диоксида азота, оксида углерода, взвешенных веществ PM_{2,5}. Далее согласно формуле (1) были рассчитаны ИЗА для каждого загрязнителя. В результате расчетов были получены следующие значения (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные значения ИЗА

Название вещества	Значение ИЗА
Взвешенные вещества	1,52
SO ₂	0,60
O ₃	1,05
Взвешенные вещества PM ₁₀	0,77
NO ₂	0,54
CO	0,18
Взвешенные вещества PM _{2,5}	0,05

Затем были отобраны пять наибольших значений ИЗА (в выборку не попали ИЗА для оксида углерода и взвешенных веществ PM_{2,5}), и путем сложения получен комплексный индекс загрязнения атмосферы. Он достиг значения 4,48, что соответствует низкому уровню загрязнения атмосферы. Само собой, данный результат не соответствует реальной картине, так как в подборке данных отсутствовал бенз(а)пирен.

Тем не менее с данным результатом и будет проводиться сравнение при расчете методами, применяемыми за рубежом.

Расчет индекса AQI. Как уже было сказано ранее, нормативная база, а также неполнота имеющихся данных не позволяют полноценно рассчитать зарубежные индексы, поэтому в ходе выполнения работы пришлось прибегнуть к допущению: из-за того что в имеющейся выборке данных встречаются периодические пробелы, а данные по некоторым веществам имеются лишь в сравнительно небольшом объеме, было принято решение рассчитать только субиндексы, т. е. значения индекса для отдельных веществ, которые по смысловой нагрузке соответствуют российскому ИЗА.

В ходе работы были посчитаны субиндексы для каждого имеющегося значения концентраций. Результатами расчетов служат данные в табл. 3–5 – с абсолютными и относительными показателями частоты.

Таблица 3

Частота появлений значений субиндексов AQI

Состояние воздуха	O ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀	CO	SO ₂	NO ₂
Хорошее	2755	103	582	6982	6462	6425
Умеренное	10	0	188	12	457	138
Вредное для чувствительных групп	2	0	9	0	83	5
Вредное	0	0	1	0	1	0
Очень вредное	0	0	0	0	0	0
Опасное	0	0	1	0	0	0

Таблица 4

Относительная частота появлений значений субиндексов AQI, %

Состояние воздуха	O ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀	CO	SO ₂	NO ₂
Хорошее	99,57	100,00	74,52	99,83	92,27	97,82
Умеренное	0,36	0,00	24,07	0,17	6,53	2,10
Вредное для чувствительных групп	0,07	0,00	1,15	0,00	1,19	0,08
Вредное	0,00	0,00	0,13	0,00	0,01	0,00
Очень вредное	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Опасное	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00

Таблица 5

Максимальные и средние значения субиндекса AQI

Показатель	O ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀	CO	SO ₂	NO ₂
Максимальные значения субиндекса	150	29	360	70	156	107
Средние значения субиндекса (округленные до целого)	14	7	40	5	15	11

Как следует из результатов расчета, состояние воздуха, судя по субиндексам, можно назвать хорошим. Субиндексы по веществам как минимум в 74,5 % случаев оказывались в «хорошем» диапазоне, и средняя величина индекса за год, если бы такая велась, равнялась бы 40. В целом данный результат сравнительно равен полученному значению КИЗА, однако при анализе абсолютных величин видно, что около сотни раз в году фиксировалось вредное для чувствительных групп состояние воздуха, еще дважды вредное и один раз – опасное. Это говорит о том, что усредненные за год показатели скрывают опасность, которую несут кратковременные неблагоприятные

условия. Для наглядности сравнения с КИЗА можно сложить пять наибольших среднегодовых значений субиндексов (по PM_{10} , O_3 , CO , NO_2 и SO_2). Получим значение, равное 87, что, согласно американской шкале, говорит об умеренном качестве воздуха. Данный результат можно объяснить более жесткими нормативами предельно допустимых концентраций в США.

Расчет индекса AQС. В ходе работы были определены категории качества воздуха для всех значений концентраций. Также были рассчитаны абсолютная и относительная частота появления значений AQС (табл. 6, 7).

Таблица 6

Частота появления значений AQС

Качество воздуха	O_3	NO_2	CO	SO_2	PM_{10}	$PM_{2,5}$
Хорошее	2763	6553	6992	6990	530	103
Умеренное	4	14	2	13	217	0
Плохое	0	1	0	0	31	0
Очень плохое	0	0	0	0	3	0
Чрезвычайно плохое	0	0	0	0	0	0

Таблица 7

Относительная частота появления значений AQС, %

Качество воздуха	O_3	NO_2	CO	SO_2	PM_{10}	$PM_{2,5}$
Хорошее	99,86	99,77	99,97	99,81	67,86	100,00
Умеренное	0,14	0,21	0,03	0,19	27,78	0,00
Плохое	0,00	0,02	0,00	0,00	3,97	0,00
Очень плохое	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	0,00
Чрезвычайно плохое	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Большинство полученных значений соответствует «хорошему» качеству воздуха, что совпадает с полученным по КИЗА результатом. Как минимум 99,8 % значений каждого из веществ, кроме взвешенных веществ PM_{10} , попали в наилучшую категорию качества воздуха. Для взвешенных веществ PM_{10} данный показатель оказался равным 67,9 %. Здесь, впрочем, тоже видно, что среднее «хорошее» значение «скрывает» в себе почти несколько десятков значений, сигнализирующих, согласно австралийской классификации, о «плохом» качестве воздуха.

Расчет индекса DAQI. В ходе расчетов были определены индексы для каждого значения концентрации, в результате получены абсолютные и относительные показатели частоты (табл. 8, 9).

По данным расчета преимущественно имеем индекс, равный единице, для всех загрязнителей, кроме взвешенных веществ PM_{10} , в этом случае самым часто встречающимся значением будет 3, что, однако, тоже соответствует низкому уровню загрязнения воздуха. В целом данный результат сопоставим со значением КИЗА. О низком уровне загрязненности говорят более 98,2 % значений. Ярко выделяется наибольшее значение концентрации PM_{10} , при которой значение индекса выросло до 10, что говорит о более жестких нормативах.

Таблица 8

Частота появления значений DAQI

Уровень загрязнения воздуха	Индекс	O ₃	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
Низкий	1	1702	6113	6429	53	103
	2	793	424	458	237	0
	3	256	26	83	240	0
Умеренный	4	11	5	21	88	0
	5	3	0	9	52	0
	6	1	0	3	33	0
Высокий	7	1	0	0	21	0
	8	0	0	0	8	0
	9	0	0	0	15	0
Очень высокий	10	0	0	0	34	0

Таблица 9

Относительная частота появления значений DAQI, %

Уровень загрязнения воздуха	Индекс	O ₃	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
Низкий	1	61,51	93,07	91,80	6,79	100,00
	2	28,66	6,46	6,54	30,35	0,00
	3	9,25	0,40	1,19	30,73	0,00
Умеренный	4	0,40	0,08	0,30	11,27	0,00
	5	0,11	0,00	0,13	6,66	0,00
	6	0,04	0,00	0,04	4,23	0,00
Высокий	7	0,04	0,00	0,00	2,69	0,00
	8	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00
	9	0,00	0,00	0,00	1,92	0,00
Очень высокий	10	0,00	0,00	0,00	4,35	0,00

Выводы

Результаты расчетов с применением различных методов показали, что осреднение значений за год может сильно искажать реальную картину уровня загрязнения, а также ставить под угрозу жизни людей, входящих в группы риска (чувствительные группы). Наблюдается необходимость введения в России дополнительных индексов загрязнения атмосферы – за более короткие, чем год, промежутки времени. Данный вывод напрямую вытекает из наблюдения: чтобы особо чувствительные к повышенным концентрациям группы людей могли избежать нежелательных рисков, необходимо их оперативно информировать, например, путем составления прогноза на следующий день или предоставления возможности проверить текущее состояние атмосферы.

Сопоставление результатов расчетов логичнее проводить на уровне ИЗА, используемого в России, и субиндексов, расчет которых подразумевают методики расчета американского индекса AQI и британского DAQI.

На данный момент из-за отсутствия подходящей нормативной базы, а также из-за частой нехватки данных возможность применения каких-либо зарубежных методик на территории России в их утвержденном виде и без введения определенных допущений находится под большим вопросом.

В то же время нельзя отказываться от существующего подхода к расчету ИЗА и КИЗА, так как в настоящее время это единственный утвержденный способ определения уровня загрязнения атмосферы, позволяющий отслеживать динамику изменения качества атмосферы из года в год и сравнивать уровни загрязнения на различных территориях Российской Федерации, однако модернизация данного показателя является вполне актуальной задачей.

Список литературы

Ахтиманкина А. В. Оценка атмосферного загрязнения выбросами предприятий промышленных центров Иркутской области : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36. Иркутск, 2017. 183 с.

Голунов Ю. В., Аллянова В. А. Определение индекса загрязнения городской атмосферы по выбросам источников // Экология и промышленность России. 2006. № 11. С. 26–28.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году». Иркутск : Мегапринт, 2020. 314 с.

Логвина О. А., Логвин С. Г. Об использовании интегрированного показателя для прогноза загрязнения атмосферы // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 5(21). С. 231–238.

Методика оперативной оценки уровня загрязнения воздушной среды промышленными предприятиями / Э. М. Соколов, В. М. Панарин, А. А. Горюнокова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 6-2. С. 511–520.

Расчет индекса загрязнения атмосферы города Красноярска с применением инструмента «сводные расчеты» / Н. А. Черных [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2020. № 4(64). С. 34.

About the air quality categories // NSW Department of Planning, Industry and Environment. 2020. URL: <https://www.environment.nsw.gov.au/topics/air/understanding-air-quality-data/air-quality-categories> (дата обращения: 12.11.2022).

A New Multipollutant, No-Threshold Air Quality Health Index Based on Short-Term Associations Observed in Daily Time-Series Analyses / D. M. Stieb, R. T. Burnett, M. Smith-Doiron [et al.] // Journal of the Air & Waste Management Association. 2012. Vol. 58. P. 435–450.

CFR Part 58: Appendix G to Part 58. Uniform Air Quality Index (AQI) and Daily Reporting : Federal Register. 1999. Vol. 64, N 149. P. 42547–42549.

Comparing Urban Air Quality across Borders / S. van den Elshout, H. Bartelds, H. Heich, K. Léger // CiteAir. 2012. 58 p. URL: https://www.airqualitynow.eu/download/CITEAIR-Comparing_Urban_Air_Quality_across_Borders.pdf (дата обращения: 14.11.2020).

Computation of the Pollutant Standards Index (PSI) // National Environmental Agency of Singapore. 2014. URL: [https://www.haze.gov.sg/docs/default-source/faq/computation-of-the-pollutant-standards-index-\(psi\).pdf](https://www.haze.gov.sg/docs/default-source/faq/computation-of-the-pollutant-standards-index-(psi).pdf) (дата обращения: 10.11.2020).

DEFRA. Update on Implementation of the Daily Air Quality Index / E. Connolly [et al.]. URL: <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports> (дата обращения: 12.11.2022).

Does the AQHI reduce cardiovascular hospitalization in Hong Kong's elderly population / T. G. Mason, C. M. Schooling, J. J. Ran [et al.] // Environment International. 2020. Vol. 135. P. 141–153.

Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area / P. V. Amosov [et al.] // Minerals and Mining Engineering = Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2020. N 5. P. 80–89.

Improving the current air quality index with new particulate indicators using a robust statistical approach / P. L. Fung, S. Sillanpää, J. V. Niemi [et al.] // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 844. P. 1–14.

Kumar K. P. A critical evaluation of air quality index models (1960–2021) // Environ Monitor-ing Assess. 2022. P. 194, 324.

National air quality objectives and European Directive limit and target values for the protection of human health // COMEAP. 2000. URL: https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/Air_Quality_Objectives_Update.pdf (дата обращения: 12.11.2022).

National Environment Protection (Ambient Air Quality) Measure // Australian Government Federal Register of Legislation. 2013. URL: <https://www.legislation.gov.au/Details/C2004H03935> (дата обращения: 12.11.2022).

Review of the UK Air Quality Index // A report by the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. 2011. URL: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130502165249> (дата обращения: 15.11.2022).

References

Ahtimankina A.V. *Ocenka atmosfernogo zagryazneniya vybrosami predpriyatij promyshlennykh centrov Irkutskoj oblasti. Dis. ... kand. geogr. nauk* [Evaluation of atmospheric pollution by emissions from enterprises of industrial centers of the Irkutsk region. Cand. sci. diss.]. Irkutsk, 2017, 183 p. (in Russian)

Golunkov Yu.V., Allyanova V.A. Opredelenie indeksa zagryazneniya gorodskoj atmosfery po vybrosam istochnikov [Determination of the urban air pollution index by source emissions]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2006, no. 11, pp. 26-28. (in Russian)

Gosudarstvennyj doklad "O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Irkutskoj oblasti v 2019 godu" [State report "On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2019"]. Irkutsk, Megaprint Publ., 2020, 314 p. (in Russian)

Logvina O.A., Logvin S.G. Ob ispolzovanii integrirovannogo pokazatelya dlya prognoza zagryazneniya atmosfery [On the use of an integrated indicator for forecasting atmospheric pollution]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus], 2014, no. 5(21), pp. 231-238. (in Russian)

Sokolov E.M., Panarin V.M., Goryunkova A.A. [et al.]. Metodika operativnoj ocenki urovnya zagryazneniya vozduшной sredy promyshlennymi predpriyatiyami [Methods of operational assessment of the level of air pollution by industrial enterprises]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical science], 2011, no. 6-2, pp. 511-520. (in Russian)

Chernyh N.A., Burma A.V., Nedre A.Yu. et al. Raschet indeksa zagryazneniya atmosfery goroda Krasnoyarska s primeneniem instrumenta "svodnye raschety" [Calculation of the atmospheric pollution index of the city of Krasnoyarsk using the "summary calculations" tool]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Don's engineering bulletin], 2020, no. 4(64), pp. 34. (in Russian)

About the air quality categories. *NSW Department of Planning, Industry and Environment*, 2020. Available at: <https://www.environment.nsw.gov.au/topics/air/understanding-air-quality-data/air-quality-categories> (date of access: 12.11.2022).

Stieb D.M., Burnett R.T., Smith-Doiron M. [et al.]. A New Multipollutant, No-Threshold Air Quality Health Index Based on Short-Term Associations Observed in Daily Time-Series Analyses. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, vol. 58, pp. 435-450.

CFR Part 58: Appendix G to Part 58. Uniform Air Quality Index (AQI) and Daily Reporting: Federal Register, 1999, vol. 64, no. 149, pp. 42547-42549.

van den Elshout S., Bartelds H., Heich H., Léger K. Comparing Urban Air Quality across Borders. *CiteAir*, 2012. Available at: https://www.airqualitynow.eu/download/CITEAIR-Comparing_Urban_Air_Quality_across_Borders.pdf (date of access: 14.11.2020).

Computation of the Pollutant Standards Index (PSI). *National Environmental Agency of Singapore*, 2014. Available at: [https://www.haze.gov.sg/docs/default-source/faq/computation-of-the-pollutant-standards-index-\(psi\).pdf](https://www.haze.gov.sg/docs/default-source/faq/computation-of-the-pollutant-standards-index-(psi).pdf) (date of access: 10.11.2020).

Connolly E., Fuller G., Baker T. [et al.]. *DEFRA. Update on Implementation of the Daily Air Quality Index*, 2013. Available at: <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports> (date of access: 12.11.2022).

Mason T.G., Schooling C.M., Ran J.J. [et al.]. Does the AQHI reduce cardiovascular hospitalization in Hong Kong's elderly population. *Environment International*, 2020, vol. 135, pp. 141-153.

Amosov P.V., Baklanov A.A., Makarov D.V. [et al.]. Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area. *Minerals and Mining Engineering = Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyy zhurnal*, 2020, no. 5, pp. 80-89.

Fung P.L., Sillanpää S., Niemi J.V. [et al.]. Improving the current air quality index with new particulate indicators using a robust statistical approach. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 844, pp. 1-14.

Kumar K.P. A critical evaluation of air quality index models (1960-2021). *Environ Monitoring Assess.*, 2022, pp. 194, 324.

National air quality objectives and European Directive limit and target values for the protection of human health. *COMEAP*, 2000. Available at: https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/Air_Quality_Objectives_Update.pdf (date of access: 12.11.2022).

National Environment Protection (Ambient Air Quality) Measure. *Australian Government Federal Register of Legislation*, 2013. Available at: <https://www.legislation.gov.au/Details/C2004H03935> (date of access: 12.11.2022).

Review of the UK Air Quality Index. A report by the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. 2011. Available at: https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130502165249/http://www.hpa.org.uk/webc/HPAwebFile/HPAweb_C/1317137023144 (date of access: 15.11.2022).

Сведения об авторах

Ахтиманкина Анастасия Владимировна
кандидат географических наук, доцент
кафедры гидрологии и природопользования,
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: anastasiya.ahitimankina@mail.ru

Ерошкин Вадим Михайлович
магистрант
кафедра гидрологии и природопользования,
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: mr.dosia69@gmail.com

Information about the authors

Ahtimankina Anastasiia Vladimirovna
Candidate of Sciences (Geography),
Associate Professor of the Department of
Hydrology and Environmental Management
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003, Russian
Federation
e-mail: anastasiya.ahitimankina@mail.ru

Eroshkin Vadim Mihajlovich
Undergraduate, Department of Hydrology
and Environmental Management
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003, Russian
Federation
e-mail: mr.dosia69@gmail.com

Код научной специальности: 1.6.21.

Статья поступила в редакцию **13.02.2023**; одобрена после рецензирования **13.03.2023**; принята к публикации **13.06.2023**
The article was submitted **February, 13, 2023**; approved after reviewing **March, 13, 2023**; accepted for publication **June, 13, 2023**