

УДК: 502.57+912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-567-579

А. В. Скрипчинский¹, Е. В. Бондарь², В. В. Мовсесова³

МОНИТОРИНГ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДОВ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АННОТАЦИЯ

Для получения надежной оценки состояния окружающей среды городов необходимым условием является анализ качества атмосферного воздуха в ходе осуществления мониторинга. В настоящее время геоинформационный анализ позволяет выявить пространственные закономерности загрязнения атмосферного воздуха. Целью исследования является анализ степени химического загрязнения атмосферного воздуха в городах Ставрополе, Невинномысске, Пятигорске с применением геоинформационных технологий. При подготовке картографической основы жилых и промышленных зон населенных пунктов были использованы космические снимки и векторные данные. Для создания геоинформационных моделей максимальной концентрации веществ и комплексного индекса загрязнения атмосферы была создана база геоданных, которая включала атрибутивные данные о концентрации веществ в векторном слое «точек отбора проб» и обрабатывалась в программе QGIS методом взвешенных расстояний. Для всестороннего анализа были составлены картографические произведения, позволяющие оценить комплексный индекс загрязнения воздуха за каждый изучаемый год, и карта динамики индекса. В статье представлен анализ приоритетных загрязняющих веществ за 2019–2021 гг. в крупных и активно развивающихся промышленных центрах Ставропольского края: Ставрополе, Невинномысске, Пятигорске. В результате исследования установлено, что в период с 2019 по 2021 гг. уровень химического загрязнения атмосферного воздуха в этих трех городах оценивается как низкий, но зарегистрирована устойчивая тенденция к ежегодному увеличению комплексного индекса загрязнения атмосферы. В Ставрополе большой вклад в химическое загрязнение атмосферы города вносят фенол и диоксид азота, повышенные концентрации веществ отмечаются в промышленной зоне города и вдоль основных транспортных магистралей. В Невинномысске основными загрязняющими веществами являются оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, аммиак и фенол. Наибольший вклад в химическое загрязнение атмосферы Пятигорска вносят фенол и диоксид азота. Полученные геоинформационные модели позволяют наглядно выявить основные районы загрязнения воздуха и закладывают основу для расчета показателей качества жизни в городах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг, индекс загрязнения атмосферы, предельно допустимая концентрация, геоинформационное моделирование, теплокарты

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Высшая школа географии и геоинформатики, проспект Кулакова, 16/1 (корпус № 16), Ставрополь, Россия, 355035, e-mail: ron1975@list.ru

² ГАОУ ДО «Центр для одаренных детей «Поиск», структурное подразделение — региональный центр выявления, поддержки и развития способностей и талантов детей и молодежи Ставропольского края «Сириус-26», ул. Артема, 6, Россия, г. Ставрополь, 355017, e-mail: evbondar68@gmail.com

³ ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Факультет медико-биологический, проспект Кулакова, 2 (корпус 23), Россия, г. Ставрополь, 355035, e-mail: viktoriya-movsesova@yandex.ru

Andrey V. Skripchinsky¹, Elena V. Bondar², Victoria V. Movsesova³

MONITORING OF CHEMICAL POLLUTION OF ATMOSPHERIC AIR IN THE CITIES OF STAVROPOL REGION USING GEOINFORMATION TECHNOLOGIES

ABSTRACT

In order to obtain a reliable assessment of the state of the urban environment, it is necessary to analyze the quality of atmospheric air in the process of monitoring. Currently, geoinformation analysis allows identifying spatial patterns of atmospheric air pollution. The purpose of the study is to analyze the level of chemical pollution of atmospheric air in the cities of Stavropol, Nevinnomyssk, Pyatigorsk using geoinformation technologies. Space images and vector data were used to prepare the map basis for residential and industrial settlements zones. A geodatabase was created to build geoinformation models of maximum concentration of substances and complex index of atmospheric pollution. The geodatabase includes attribute data on concentration of substances in the vector layer of “sampling points”. It has been processed in QGIS program, using the weighted distances method. For the integrated analysis, a map of the index dynamics was created and mapping work was carried out in order to assess the integrated air pollution index for each year under study. The article presents the analysis of priority contaminants for 2019–2021 in large and actively developing industrial centers of Stavropol Region, including Stavropol, Nevinnomyssk and Pyatigorsk. As a result of the study, it was established that between 2019 and 2021 the level of chemical pollution of atmospheric air in the cities of Stavropol, Nevinnomyssk, Pyatigorsk was assessed as low. At the same time, a steady trend towards an annual increase in the complex atmospheric pollution index was registered. In Stavropol, phenol and nitrogen dioxide make the major contribution to the chemical pollution of the city's atmosphere. Increased concentrations of substances were noted in the industrial zone of the city as well as along main transportation routes. In Nevinnomyssk, the main contaminants are: carbon oxide, nitrogen oxide, nitrogen dioxide, ammonia and phenol. Phenol and nitrogen dioxide make the greatest contribution to the chemical pollution of the atmosphere of Pyatigorsk. The resulting geoinformation models allow clearly identifying the main areas of air pollution and providing a basis for calculating indicators of the quality of life in cities.

KEYWORDS: monitoring, air quality index, maximum acceptable concentration, geoinformation systems, heatmaps

ВВЕДЕНИЕ

Условием безопасного устойчивого развития и управления урбанизированными территориями является наличие оперативной, полной и достоверной информации о качестве атмосферного воздуха [Низамутдинов и др., 2021; Бондаренко и др., 2022; Liang Gong, 2020]. Анализ масштабов техногенного воздействия на атмосферный воздух

¹ North Caucasus Federal University, Higher School of Geography and Geoinformatics, 16/1 (building number 16), Kulakov ave., Stavropol, 355035, Russia, e-mail: ron1975@list.ru

² State Autonomous Educational Institution of Additional Education “Poisk” Centre for Gifted Children, structural department “Sirius-26”, 6, Artema str., Stavropol, 355017, Russia, e-mail: evbondar68@gmail.com

³ North Caucasus Federal University, Faculty of Biomedical Sciences, 2 (building 23), Kulakov ave., Stavropol, 355035, Russia, e-mail: viktoriya-movsesova@yandex.ru

осуществляется в соответствии с Федеральным законом № 96-ФЗ Российской Федерации «Об охране атмосферного воздуха»¹.

Правительством Ставропольского края принята государственная программа «Охрана окружающей среды»², в которой утверждается, что для «достижения целей в сфере охраны окружающей среды и экологической безопасности в крае» к первоочередным «задачам государственного управления относится развитие территориальной системы экологического мониторинга».

В рамках подпрограммы «Государственный мониторинг природных ресурсов, реализация экологических проектов» ведется мониторинг состояния атмосферного воздуха с помощью специализированного передвижного поста в Ставрополе, Невинномысске и Пятигорске.

Геоинформационное моделирование загрязнения атмосферного воздуха является важным инструментом для выполнения региональных экологических программ [Мовсесова, 2009; Штриплинг и др., 2010; Пашкевич, Петрова, 2017; Pinault et al., 2016; Toja-Silva et al., 2017; Chang et al., 2018, Basly, Wald, 2000; Feißel et al., 2022]. Моделирование распространения загрязняющих веществ и смесей в атмосферном воздухе города требует комплексного учета факторов, влияющих на качество атмосферы [Ung et al., 2000; Mejri, 2020; Wu et al., 2023]. Каждый из этих факторов имеет свои специфические особенности, что приводит к необходимости использования для их учета разнообразных картографических моделей и баз геоданных [Липилин, Евтушенко, 2022; Apte et al., 2017].

Комплексная работа в рамках реализации государственной программы «Охрана окружающей среды» и, в целом, национального проекта «Экология» позволит достичь национальной цели страны — комфортной и безопасной среды для населения края. Целью исследования является анализ степени химического загрязнения атмосферного воздуха в городах Ставрополе, Невинномысске, Пятигорске с применением геоинформационных технологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования состояния атмосферного воздуха проводились в течение 2019–2021 гг. с помощью передвижной экологической лаборатории Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Ставропольского края в трех городах: Ставрополе, Невинномысске и Пятигорске.

При выборе места для базирования исходили из возможности получения следующей информации: уровень загрязнения воздуха, характерный для данного района населенного пункта в зоне жилой застройки, концентрация примесей в конкретной точке, находящейся под влиянием выбросов отдельного промышленного предприятия, крупной автомагистрали.

Отбор и анализ проб атмосферного воздуха осуществлялся на предмет содержания оксида и диоксида азота, аммиака, диоксида серы, сероводорода, оксида углерода, массовой концентрации фенола, бензола, толуола, этилбензола, хлорбензола, о-ксилола, суммы п- и м- ксилолов, стирола, предельных, непредельных и ароматических углеводородов, а также взвешенных веществ (пыли) и сажи. Одновременно с отбором проб воздуха учитывали

¹ Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.1999 № 96-ФЗ (последняя редакция). Электронный ресурс: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971/ (дата обращения 24.02.2024)

² Государственная программа Ставропольского края «Охрана окружающей среды». Утверждена Постановлением Правительства Ставропольского края от 30.12.2023 № 839-п. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/407050847#64U0IK> (дата обращения 24.02.2024)

метеорологические параметры: направление и скорость ветра, температуру воздуха, состояние погоды и подстилающей поверхности.

Загрязнение воздуха определяли по значениям средних и максимальных разовых концентраций загрязняющих веществ (ЗВ). Степень загрязнения оценивается при сравнении фактических концентраций с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) ЗВ.

В соответствии с существующими методами оценки уровень загрязнения атмосферного воздуха считается: низким при значении индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) ниже 5, повышенным при ИЗА от 5 до 6, высоким при ИЗА от 7 до 13, очень высоким при ИЗА равном или больше 14.

В ходе исследования наибольший показатель составил около 5. Нами было принято решение для пространственного выделения уровней загрязнения атмосферы использовать следующую градацию загрязнения воздушной среды: низкий, повышенный, высокий, очень высокий, со значениями, представленными на рисунках 1–5.

Базовым ГИС-пакетом для проведения исследования послужил QGIS (версия 3.16). В качестве вспомогательного программного обеспечения применялись Adobe Illustrator и Adobe Photoshop. Контроль качества атмосферного воздуха осуществляли в соответствии с ГОСТ 17.2.3.01-86¹. Для обработки статистических данных применяли унифицированную программу расчёта загрязнения атмосферы (УПРЗА «Эколог»). Расчеты ИЗА и КИЗА (комплексный индекс загрязнения атмосферы) проводились в соответствии с Руководящим документом РД 52.04.667-2005².

В результате на основании полученных данных о загрязнении атмосферного воздуха в городах была создана база геоданных, включающая атрибутивные данные о концентрации веществ в векторном слое «точек отбора проб», которые обрабатываются в программе QGIS методом взвешенных расстояний. На основании среднегодовых показателей загрязненности воздуха городов Ставропольского края, построены карты динамики.

В целом всю технологию работы можно представить в следующем виде:

1. Создание картографической основы в ГИС.
2. Определение жилых и промышленных зон, а также дорожных покрытий, влияющих в той или иной степени на загрязнение атмосферного воздуха.
3. Подтверждение информации об оцифровываемых зонах средствами ГИС (аэрокосмические снимки, векторные карты).
4. Создание общей начальной картографической модели исследуемого города.
5. Преобразование данных протоколов результатов измерений предельно допустимых концентраций частиц в воздухе для внесения их в базу данных (БД) ГИС.
6. Создание итоговой картосхемы оценки состояния загрязняющим веществом.

Для выделения зон промышленных объектов и зон жилой застройки были использованы методы визуального дешифрирования сервиса “Yandex Satellites”, также были использованы данные подложки “Open Street Map” (OSM Standart) как подтверждающие точность дешифрирования.

¹ ГОСТ 17.2.3.01-86 Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200012789> (дата обращения 24.02.2024)

² РД 52.04.667-2005 Руководящий документ. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118> (дата обращения 24.02.2024)

Все пункты отбора проб имеют топографическую привязку к определенному адресу, поэтому в отдельном точечном слое нами были отмечены все существующие в период проведения измерения точки. Данные, хранящиеся в отчете в формате PDF, были перенесены в таблицу Excel. В данной таблице в первой колонке были выписаны адреса, в следующих — загрязняющее вещество и год, в который проводились отборы проб. Впоследствии был осуществлен перенос данных из Excel в QGIS, где была создана база геоданных.

В качестве дополнительного эффекта визуализации создаваемых картографических моделей в QGIS был использован стиль «теплокарты». В зависимости от высокой показательности точек, находящихся в определенном диапазоне друг от друга, высчитывается среднее значение и происходит окраска выбранным цветом методом «взвешенных расстояний» с эффектом изменения оттенка от низких показателей к высоким, и наоборот (рис. 1).

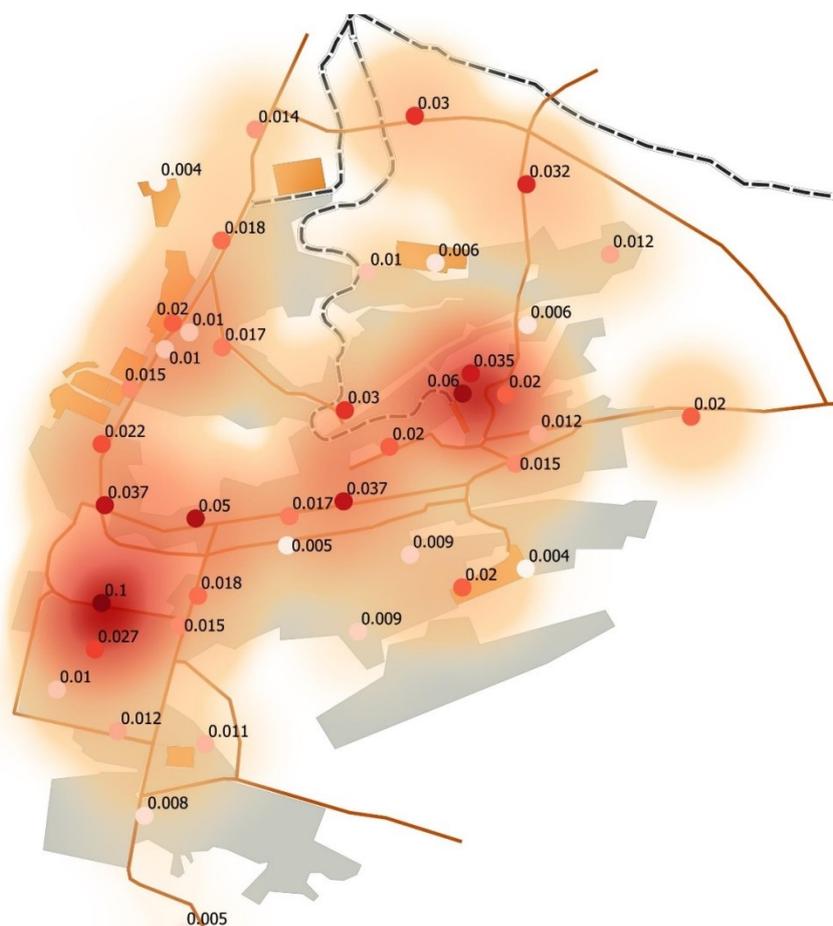


Рис. 1. Итоговая картосхема загрязнения диоксидом углерода г. Ставрополя в 2019 г.

Fig. 1. Final map of carbon dioxide pollution of Stavropol in 2019

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных замеров было выявлено, что основными загрязняющими веществами в городе Ставрополе являются оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, аммиак, фенол.

По данным о максимальной концентрации химических веществ за 2019–2021 гг. созданы геоинформационные модели, позволяющие выявить основные зоны концентрации

веществ. Основными зонами концентрации оксида углерода выступают северо-западная промышленная зона и основные транспортные улицы Ленинского района города. Максимальная концентрация оксида углерода составила $7,5 \text{ мг/м}^3$ в 2019 г., что составляет 1,5 ПДК максимально разовой (м. р.), на протяжении 2020–2021 гг. превышение уровня ПДК м. р. не выявлено. Мониторинговые исследования выявили изменение районов концентрации оксида углерода. К 2021 г. появляются новые центры концентрации в таких вернакулярных районах, как Перспективный, Ботаника и Мамайка. Значительно возрастают значения концентрации вещества в районе Старомарьевского шоссе.

Основные районы концентрации оксида азота соответствуют также промышленной зоне северо-запада города, транспортным улицам Ленинского и Юго-западного района. В период с 2019 по 2021 гг. происходит пространственное расширение площади отличной от нуля концентрации оксида азота, приуроченное к основным транспортным артериям города. На протяжении 2019–2021 гг. превышение уровня ПДК м. р. не выявлено. Аналогичная картина зафиксирована по содержанию диоксида азота и аммиака. Наблюдается общий тренд пространственной концентрации веществ, наиболее отчетливо заметный на примере диоксида азота — смещение центра концентрации на основные места скопления транспорта.

Для оценки суммарного загрязнения воздушной среды в целом по городу использовали информацию об уровне загрязнения атмосферы в г. Ставрополе и рассчитали индекс загрязнения атмосферы (табл. 1) по пяти веществам с наибольшими нормированными значениями ПДК с учетом их класса опасности.

Табл. 1. Показатели ИЗА, рассчитанные по данным о средних концентрациях примесей за 2019–2021 гг. в г. Ставрополь

Table 1. Indicators and FOR, calculated from data on average concentrations of impurities for 2019–2021 in Stavropol

Примесь	Значение
2019 г.	
Углерода оксид	0,07
Азота оксид	0,20
Азота диоксид	0,50
Аммиак	0,20
Фенол	0,94
ИЗА ₅	1,92
2020 г.	
Углерода оксид	0,05
Азота оксид	0,30
Азота диоксид	0,6
Аммиак	0,30
Фенол	1,19
ИЗА ₅	2,36
2021 г.	
Углерода оксид	0,05
Азота оксид	0,21
Азота диоксид	0,64
Аммиак	0,30
Фенол	1,20
ИЗА ₅	2,40

Для Ставрополя индекс загрязнения атмосферного воздуха составляет менее 5 в течение всего периода наблюдений, но выражена тенденция увеличения ИЗА. Самый большой вклад в химическое загрязнение атмосферы города вносят фенол и диоксид азота (табл. 1), кроме того, стоит отметить ежегодный рост КИЗА (рис. 2).

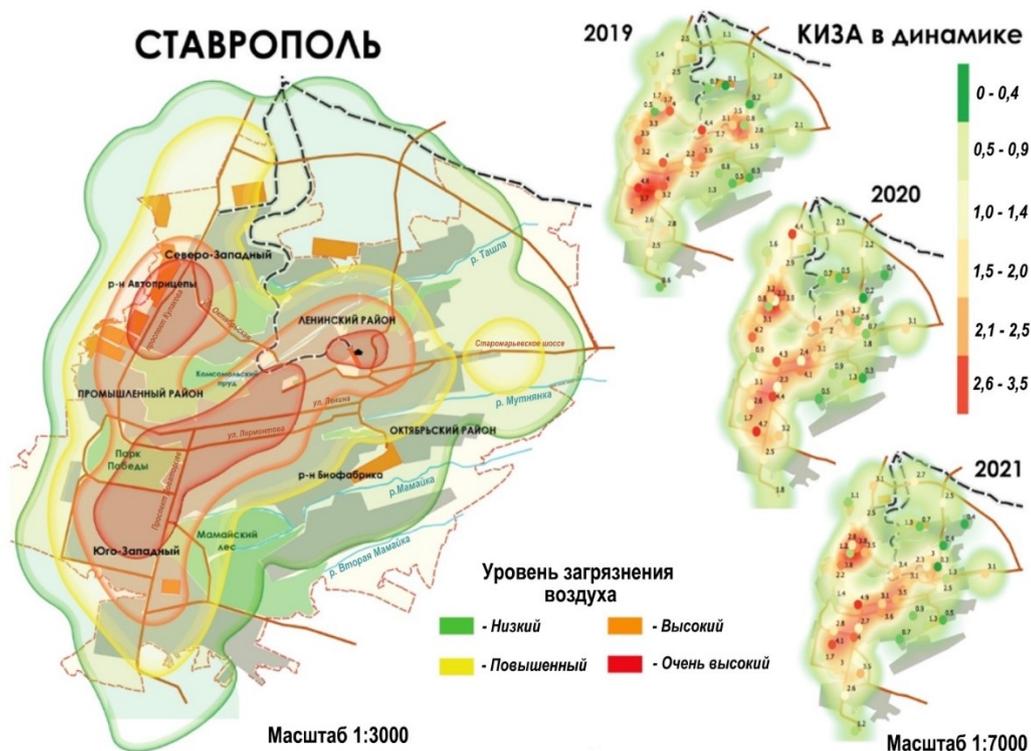


Рис. 2. Комплексный индекс загрязнения атмосферы за 2019–2021 гг. в г. Ставрополь
Fig. 2. Complex index of atmospheric pollution for 2019–2021 in Stavropol

Невинномысск имеет выгодное географическое положение: в городе преобладает восточное направление ветра, что делает его продуваемым, способствуя очищению от загрязнений (автомобильные выхлопы, например), а также не дает распространяться в черте города выбросам промышленных предприятий.

На основании проведенных замеров мы выявили, что основными загрязняющими веществами являются оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, аммиак, фенол. Максимальная их концентрация за 2019–2021 гг. в Невинномыске не превышает уровня ПДК м. р., за исключением фенола — 0,014 мг/м³ (1,4 ПДК) в 2019 г., 0,015 мг/м³ (1,5 ПДК) в 2020 и 2021 гг.

На основании данных о максимальной концентрации химических веществ за 2019–2021 гг. созданы геоинформационные модели загрязнения атмосферного воздуха Невинномыска. Основной зоной выделения оксида углерода выступает промышленная зона района Невинномысской ГРЭС. Его максимальная концентрация составила 5 мг/м³ в 2021 г., что составляет 1 ПДК, также отмечается рост концентрации загрязняющего вещества на протяжении 2019–2021 г.

Зонами концентрации оксида и диоксида азота являются промышленная зона района Невинномысской ГРЭС и ОАО «Невинномысский азот», а также АО «Невинномысская КПФ». Превышений ПДК не выявлено, но отмечается рост концентрации загрязняющих веществ на протяжении трех рассматриваемых лет.

Локализацией зон выделения оксида аммиака является промышленная зона района Невинномысской ГРЭС и Невинномысский «ЕвроХим». Превышений ПДК не выявлено, но отмечается увеличение концентрации загрязняющего вещества в течение всего периода исследований. Зоны концентрации выделений фенола сконцентрированы в северной и южной промышленных частях города. Максимальная концентрация составила 0,014 мг/м³ (1,4 ПДК) в 2019 г., 0,015 мг/м³ (1,5 ПДК) в 2020 и 2021 гг. (рис. 3).

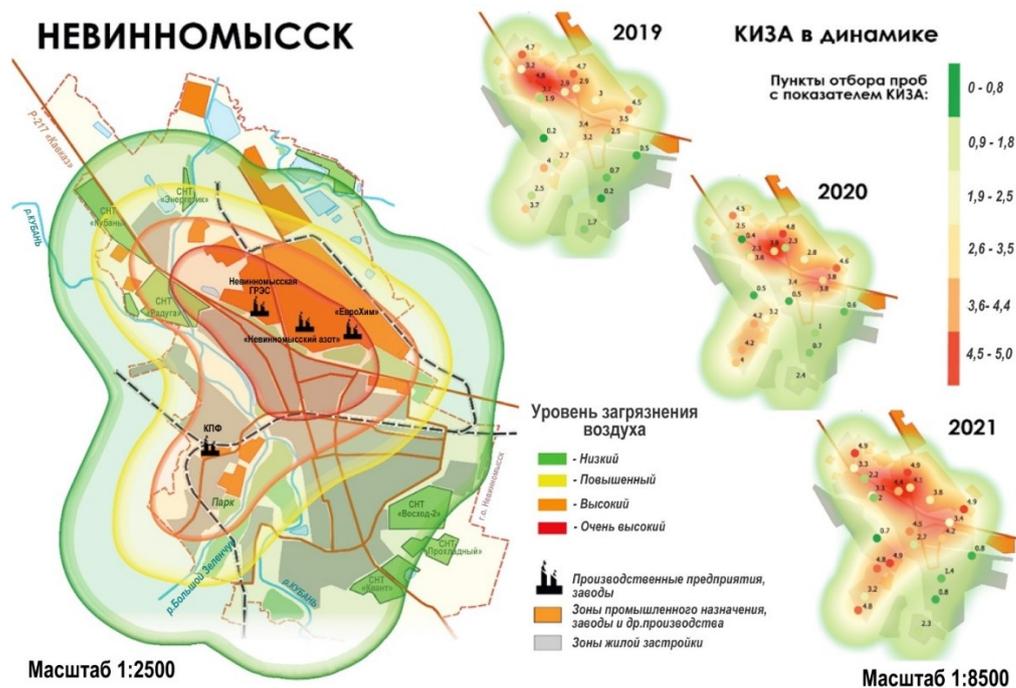


Рис. 3. Комплексный индекс загрязнения атмосферы за 2019–2021 гг. в г. Невинномысске
Fig. 3. Complex index of atmospheric pollution for 2019–2021 in Nevinnomyssk

Индекс загрязнения атмосферного воздуха Невинномысска менее 5, но наблюдается тенденция его увеличения за 2021 г., а также рост ИЗА всех приоритетных загрязняющих веществ. Самый большой вклад в химическое загрязнение атмосферы Невинномысска вносят фенол и диоксид азота.

Картографические материалы позволяют выделить два основных района химического загрязнения атмосферного воздуха города Невинномысска: промышленные зоны северной и южной части города — районы производственных предприятий Невинномысской ГРЭС, ОАО «Невинномысский азот», «ЕвроХим», АО «Невинномысская КПФ».

В соответствии с существующими методами оценки КИЗА в 2019–2021 гг. составил менее 5, сохраняя тенденцию к ежегодному увеличению.

Пятигорск — город-курорт, крупнейший по численности населения город региона Кавказские Минеральные Воды и второй в Ставропольском крае после Ставрополя, старейший бальнеологический и грязевой курорт федерального значения, а также промышленный, торговый, научный, культурный и туристический центр эколого-курортного региона Кавказские Минеральные Воды.

Проведенные замеры показали, что основными загрязняющими веществами в городе являются оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, аммиак, фенол.

Максимальная концентрация ведущих загрязняющих химических веществ за 2019–2021 гг. в г. Пятигорске не превышает уровня ПДК м. р., кроме фенола, его максимальная концентрация составила 0,015 мг/м³ (1,5 ПДК) в 2019 г.; 1,4 ПДК в 2020 г.; 1,3 ПДК в 2021 г.

Основными территориями концентрации оксида углерода выступают промышленные зоны центра, северо-востока и северо-запада города. Несмотря на то, что превышений ПДК не выявлено, отмечается увеличение концентрации загрязняющего вещества на протяжении всего периода наблюдений.

В промышленных зонах центра, северо-востока и северо-запада города, в районах размещения молочного комбината ЗАО «Холод», «ПенопластОПТ», ЗАО «Пятигорсксельмаш» определены как центры концентрации оксида азота и аммиака. Превышений ПДК не выявлено, но сохраняется общая тенденция — увеличение концентрации загрязняющего вещества на протяжении 2019–2021 гг.

Максимальная концентрация фенола составила 0,015 мг/м³ (1,5 ПДК) в 2019 г., 1,4 ПДК в 2020 г., 1,3 ПДК в 2021 г., превышения выявлены в районе расположения ЗАО «Холод».

Расчет ИЗА и КИЗА (рис. 4) свидетельствует, что загрязнение атмосферного воздуха Пятигорска составляет менее 5. Наблюдается тенденция увеличения ИЗА в течение трех лет. Самый большой вклад в химическое загрязнение атмосферы города Пятигорска вносят фенол и диоксид азота.

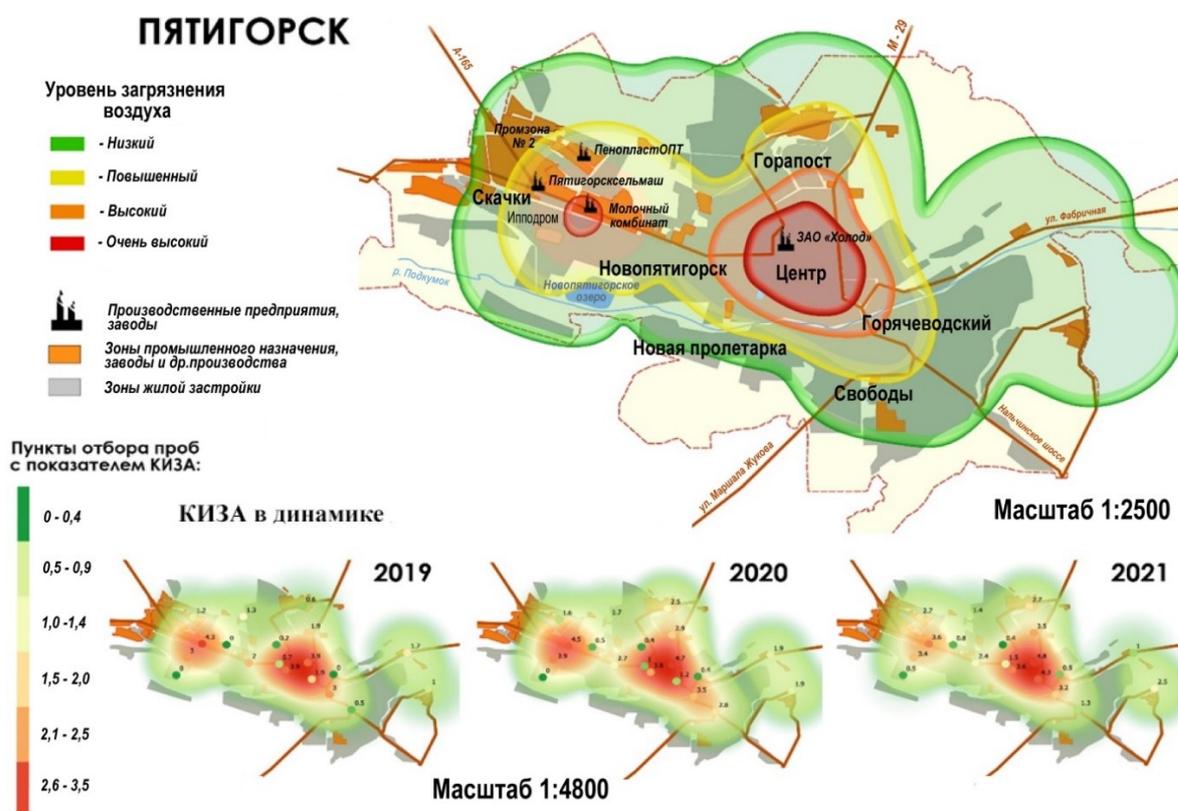


Рис. 4. Комплексный индекс загрязнения атмосферы за 2019–2021 гг. в г. Пятигорск
Fig. 4. Complex index of atmospheric pollution for 2019–2021 in Pyatigorsk

Анализ результатов показал, что на момент проведения исследований уровень химического загрязнения атмосферного воздуха в городах Ставропольского края, таких как Ставрополь, Невинномысск и Пятигорск, оценивается как низкий, но зарегистрирована тенденция к ежегодному увеличению комплексного индекса загрязнения атмосферы.

ВЫВОДЫ

Количество стационарных постов в городах ограничено, поэтому использование передвижной лаборатории позволяет дать пространственное представление о загрязнении воздушной среды и корректно оценить степень ее загрязнения.

Геоинформационные системы позволили создать базу геоданных, которая включает атрибутивные данные о концентрации веществ. Геоинформационный анализ позволил определить зоны выделения загрязняющих веществ и районы городов, наиболее подверженные химическому воздействию на атмосферный воздух.

Индекс загрязнения атмосферного воздуха Ставрополя составляет менее 5 и оценивается как низкий в течение всего периода наблюдений, но проявляется тренд увеличения ИЗА. Важно отметить ежегодный рост показателя КИЗА. Наиболее высокие уровни загрязнения воздуха отмечаются в промышленной зоне северо-запада города, вдоль транспортных улиц Ленинского и Юго-западного района.

Самый большой вклад в химическое загрязнение атмосферы города Невинномысска вносят фенол и диоксид азота. Промышленные зоны северной и южной части города характеризуются высоким уровнем загрязнения воздуха в городе. КИЗА в 2019–2021 гг. составил менее 5, при этом сохраняется тенденция к ежегодному его увеличению.

Тенденция возрастания показателей индекса загрязнения атмосферы характеризует город-курорт Пятигорск. Наибольший вклад в химическое загрязнение атмосферы вносят фенол и диоксид азота. Основными районами с высоким показателем загрязнения воздуха выступают район со значительной концентрацией промышленных предприятий, а также центральная часть города.

Анализ результатов исследования выявил низкий уровень загрязнения атмосферного воздуха в изучаемых городах Ставропольского края, но наблюдается тенденция к увеличению показателей комплексного индекса загрязнения атмосферы. Основными территориями с высоким уровнем загрязнения воздуха в городах выступают районы промышленных предприятий, а также места концентрации автомобильного транспорта, особенно в Пятигорске и Ставрополе. Выявленные тренды загрязнения воздуха характерны для большинства городов Юга России и страны в целом [Заалишвили и др., 2021].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондаренко Е. В., Филиппов А. А., Сулейманов И. Ф., Минатуллаев Ш. М. Системная оценка воздействия улично-дорожной сети на атмосферу урбанизированной территории. Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ», 2022. № 19 (2). С. 184–197. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-184-197.

Заалишвили В. Б., Кануков А. С., Корбесова К. В. Оценка влияния автомобильного движения транспорта на загрязнение урбанизированных территорий. Геология и геофизика Юга России, 2021. № 11 (4). С. 135–146. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.

Липилин Д. А., Евтушенко Д. Д. Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере микрорайонов города Краснодара. Геология и геофизика Юга России, 2022. № 12 (3). С. 195–210. DOI: 10.46698/VNC.2022.72.93.013.

Мовсесова В. В. Пространственное распределение приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха, в условиях городской застройки (на примере г. Ставрополя).

Современные наукоемкие технологии, 2009. № 3. С. 69–70. Электронный ресурс: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=26274> (дата обращения 14.03.2024).

Низамутдинов Т. И., Колесникова Е. В., Алексеев Д. К. Влияние зеленых насаждений на динамику загрязнения воздуха в городах. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика, 2021. № 1 (41). С. 58–73. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.05.

Пашкевич М. А., Петрова Т. А. Оценка площадного загрязнения атмосферного воздуха в мегаполисе с использованием геоинформационных систем. Записки Горного института, 2017. Т. 228. С. 738–742. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.738.

Штриплинг Л. О., Баженов В. В., Калинин Ю. В., Нижевясов О. В. Геоинформационная система мониторинга состояния атмосферного воздуха и контроля за выбросами загрязняющих веществ предприятиями. Омский научный вестник, 2010. № 1 (94). С. 203–208.

Apte Joshua S., Kyle P. Messier, Shahzad Gani, Michael Brauer, Thomas W. Kirchstetter Melissa M. Lunden, Julian D. Marshall, Christopher J. Portier, Roel C.H. Vermeulen, Steven P. Hamburg high-resolution air pollution mapping with Google Street View Cars: exploiting big data. Environmental Science and Technology. 2017, V. 51. Iss. 12. P. 6999–7008. DOI: 10.1021/acs.est.7b00891.

Basly L., Wald L. Remote sensing and air quality in urban areas. Proceedings of the 2nd international workshop on telegeoprocessing, TeleGeo'2000, Sophia Antipolis, France, May 10–12, 2000. P. 213–219.

Chang S., Jiang Q., Zhao Y. Integrating CFD and GIS into the development of urban ventilation corridors: a case study in Changchun City, China. Sustainability, 2018, No. 10. DOI: 10.3390/su10061814.

Feißel T., Büchner F., Kunze M., Rost J., Ivanov V., Augsburg K., Hesse D., Gramstat S. Methodology for virtual prediction of vehicle-related particle emissions and their influence on ambient PM10 in an urban environment. Atmosphere, 2022. No. 13. DOI: 10.3390/atmos13111924.

Liang L., Gong P. Urban and air pollution: a multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends. Scientific Reports, 2020. V. 10. DOI: 10.1038/s41598-020-74524-9.

Mejri K. Monitoring de l'environnement atmosphérique en milieu urbain intégrant des images de télédétection: le cas des particules fines (PM2.5) Université de Montréal Faculté des études supérieures et postdoctorales. Janvier 2020. Web resource: https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/24225/Mejri_Karim_memoire_2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y (accessed 11.03.2024).

Pinault L., Crouse D., Jerrett M., Brauer M., Tjepkema M. Spatial associations between socioeconomic groups and NO₂ air pollution exposure within three large Canadian cities. Environmental Research, 2016. V. 147. P. 373–382. DOI: 10.1016/j.envres.2016.02.033.

Toja-Silva F., Chen J., Hachinger S., Hase F., CFD simulation of CO₂ dispersion from urban thermal power plant: analysis of turbulent Schmidt number and comparison with Gaussian plume model and measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017. V. 169. P. 177–193. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.07.015.

Ung A., Ranchin T., Wald L., Weber C., Hirsch J. Cartographie de la pollution de l'air: une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. Photointerprétation, 2000, No. 3/4. P. 53–63.

Wu Q., Wang Y., Sun H., Lin H., Zhao Z. A system coupled GIS and CFD for atmospheric pollution dispersion simulation in urban blocks. *Atmosphere*, 2023. V. 14. Iss. 5. DOI: 10.3390/atmos14050832.

REFERENCES

- Apte Joshua S., Kyle P. Messier, Shahzad Gani, Michael Brauer, Thomas W. Kirchstetter Melissa M. Lunden, Julian D. Marshall, Christopher J. Portier, Roel C.H. Vermeulen, Steven P. Hamburg high-resolution air pollution mapping with Google Street View Cars: exploiting big data. *Environmental Science and Technology*. 2017, Vol. 51. Issue 12. P. 6999–7008. DOI: 10.1021/acs.est.7b00891.
- Basly L., Wald L. Remote sensing and air quality in urban areas. Proceedings of the 2nd international workshop on telegeoprocessing, TeleGeo'2000, Sophia Antipolis, France, May 10–12, 2000. P. 213–219.
- Bondarenko E. V., Filippov A. A., Suleymanov I. F., Minatullaev Sh. M. Systematic assessment of the impact of street and road network on the atmosphere of urbanized territory. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2022. № 19 (2). P. 184–197 (in Russian). DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-184-197.
- Chang S., Jiang Q., Zhao Y. Integrating CFD and GIS into the development of urban ventilation corridors: a case study in Changchun City, China. *Sustainability*, 2018, No. 10. DOI: 10.3390/su10061814.
- Feißel T., Büchner F., Kunze M., Rost J., Ivanov V., Augsburg K., Hesse D., Gramstat S. Methodology for virtual prediction of vehicle-related particle emissions and their influence on ambient PM10 in an urban environment. *Atmosphere*, 2022. No. 13. DOI: 10.3390/atmos13111924.
- Liang L., Gong P. Urban and air pollution: a multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends. *Scientific Reports*, 2020. V. 10. DOI: 10.1038/s41598-020-74524-9.
- Lipilin D. A., Evtushenko D. D. Assessment of urban environment quality with application of geoinformation systems on the example of microdistricts in Krasnodar city. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2022. No. 12 (3). P. 195–210 (in Russian). DOI: 10.46698/VNC.2022.72.93.013.
- Mejri K. Monitoring de l'environnement atmosphérique en milieu urbain intégrant des images de télédétection: le cas des particules fines (PM2.5) Université de Montréal Faculté des études supérieures et postdoctorales. Janvier 2020. Web resource: https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/24225/Mejri_Karim_memoire_2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y (accessed 11.03.2024) (in French).
- Movsesova V. V. Spatial distribution of priority pollutants of atmospheric air in the conditions of urban development (on the example of Stavropol). *Modern high technologies*, 2009. No. 3. P. 69–70 (in Russian). Web resource: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=26274> (accessed 14.03.2024) (accessed 14.03.2024).
- Nizamutdinov T. I., Kolesnikova E. V., Alekseev D. K. Influence of green spaces on the dynamics of urban air pollution in cities. *PNRPU (Perm National Research Polytechnic University) Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2021. No 1 (41). P. 58–73 (in Russian). DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.05.

Pashkevich M. A., Petrova T. A. Assessment of area pollution of atmospheric air in a megapolis using geoinformation systems. *Journal of Mining Institute*, 2017. V. 228. P. 738–742 (in Russian). DOI: 10.25515/PMI.2017.6.738.

Pinault L., Crouse D., Jerrett M., Brauer M., Tjepkema M. Spatial associations between socioeconomic groups and NO₂ air pollution exposure within three large Canadian cities. *Environmental Research*, 2016. V. 147. P. 373–382. DOI: 10.1016/j.envres.2016.02.033.

Shtripling L. O., Bazhenov V. V., Kalinin Y. V., Nizhevyasov O. V. Geoinformation system for monitoring the state of atmospheric air and control of pollutant emissions by enterprises. *Omsk Scientific Bulletin*, 2010. No. 1 (94). P. 203–208. (in Russian).

Toja-Silva F., Chen J., Hachinger S., Hase F. CFD simulation of CO₂ dispersion from urban thermal power plant: analysis of turbulent Schmidt number and comparison with Gaussian plume model and measurements, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017. V. 169. P. 177–193. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.07.015.

Ung A., Ranchin T., Wald L., Weber C., Hirsch J. Cartographie de la pollution de l'air: une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. *Photointerprétation*, 2000, No. 3/4. P. 53–63 (in French).

Wu Q., Wang Y., Sun H., Lin H., Zhao Z. A system coupled GIS and CFD for atmospheric pollution dispersion simulation in urban blocks. *Atmosphere*, 2023. V. 14. Iss. 5. DOI: 10.3390/atmos14050832.

Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Korbesova K. V. Assessment of the impact of road traffic on the pollution of urbanized territories. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021. No. 11 (4). P. 135–146 (in Russian). DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
