

УДК 656.11

Т. В. Бобра<sup>1</sup>  
А. И. Лычак<sup>2</sup>

***Пространственный анализ и  
моделирование полей концентрации  
загрязняющих веществ в атмосфере  
г. Симферополь***

<sup>1,2</sup>ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет  
им. В. И. Вернадского», г. Симферополь, Республика Крым,  
Российская Федерация  
e-mail: tvbobra@mail.ru<sup>1</sup>, lychak1@rambler.ru<sup>2</sup>

**Аннотация.** В работе рассмотрен ряд аспектов, связанных с современными тенденциями в области изучения загрязнения атмосферного воздуха на урбанизированных территориях. Обоснована проблема необходимости изучения структуры пространственного распределения полей концентрации загрязняющих веществ и предложен алгоритм и методика их изучения и геоинформационного моделирования. Дан анализ условий и факторов формирования полей концентрации загрязняющих веществ в атмосфере для города Симферополь. Построены картографические модели полей концентрации для основных загрязняющих веществ, основанные на данных научного мониторинга.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферного воздуха (ЗАВ), мониторинг, геоинформационное моделирование, пространственный анализ, экологическое состояние атмосферного воздуха, комплексный индекс загрязнения атмосферы (КИЗА).

### Введение

Загрязнение атмосферного воздуха (ЗАВ) является одной из самых острых современных экологических проблем, которые проявляются как на глобальном, так и на региональном и локальном уровнях. Как утверждает Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) за счет мер по снижению уровня загрязнения воздуха можно уменьшить риск заболеваемости целым рядом болезней, связанных с инсультом, болезнями сердца, раком легких, хроническими и острыми респираторными заболеваниями, включая астму. С низкими показателями загрязнения воздуха ассоциируются более высокие показатели заболеваемости болезнями сердечно-сосудистой и дыхательной системы человека как в долгосрочной, так и в краткосрочной перспективе [1].

Мониторинг за уровнем загрязнения воздуха в городах, по мнению Всемирной метеорологической организации (ВМО), является основой для выработки экологической политики по управлению качеством воздушной среды и снижению рисков для здоровья населения. Существует острая необходимость в формировании адекватных представлений о пространственной и временной структуре полей концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха [2].

Важным аспектом является изучение влияния на здоровье человека кратковременных воздействий загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов. Во многих зарубежных публикациях отмечается необходимость фиксации данных о концентрации загрязняющих веществ в воздухе, не осредненных за длительный период наблюдений, а соответствующий коротким интервалам от одного часа до суток. Так, например, была при этом обнаружена положительная связь между коротко периодическим содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и смертностью от всех причин и, прежде всего, смертностью от сердечно-сосудистых, респираторных и цереброваскулярных заболеваний [3].

Особый интерес представляют публикации, касающиеся геоинформационного моделирования и анализа полей концентрации загрязняющих веществ от различных источников выбросов для отдельных регионов и городов [4; 5; 6; 7 и др.]. Для города Симферополя результаты подобных работ нашли отражение в публикациях В.О. Смирнова [8], Т.В. Бобра, А.А. Свербиловой [9; 10].

**Цель** данного исследования – выявление, анализ и моделирование полей концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе г. Симферополь на основе данных оперативного научного мониторинга.

**Объектом** исследования является территория города Симферополя и экологическое состояние атмосферного воздуха. На территории Симферополя наблюдается достаточно большое разнообразие факторов и условий, влияющих на пространственную дифференциацию полей концентрации загрязняющих веществ в приземном слое воздуха и общее экологическое состояние атмосферного воздуха.

Важнейшими природными факторами, влияющими на уровень загрязнения атмосферы и пространственную структуру полей концентрации загрязняющих веществ в приземном слое воздуха города Симферополя, является климат (*температурный режим, атмосферная циркуляция - направления и скорость ветра, влажность воздуха, количество осадков и повторяемость различных метеорологических явлений, в частности, туманов*) и рельеф.

Город Симферополь расположен в центральной части Предгорного Крыма, в средней части долины реки Салгир, в обширной котловине, закрытой с севера отрогами Внешней гряды Крымских гор, а с юга – Внутренней грядой. Высота местности города над уровнем моря колеблется в пределах 225-400 м, возрастая к юго-востоку.

Климат Симферополя умеренно континентальный, со сравнительно мягкой зимой и умеренно жарким летом. В течение почти всего года господствуют два направления ветра - юго-западное и северо-восточное.

Повторяемость и скорость ветра являются одними из важнейших природных факторов, влияющих на экологическое состояние атмосферного воздуха, а именно на аккумуляцию или рассеивание загрязняющих веществ. В Симферополе более 60% всех случаев ветра приходится на штили и ветры малых скоростей. Наибольшая повторяемость ветров приходится на скорости 4-5 м/с. При таких условиях часто случаются туманы и дымки. Наличие туманов ограничивает рассеивание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и способствует аккумуляции загрязнения.

В Симферополе среднее число дней с туманом составляет более 100, максимум отмечается зимой. Наибольшая повторяемость дней с туманами приходится на январь и декабрь, а наименьшая — на июль и август.

Немаловажную роль в формировании экологического состояния атмосферы играет количество дней с осадками. Среднегодовой уровень осадков достигает 450 мм, из которых 80-85% выпадает в виде дождя. Наблюдается незначительное превышение сумм осадков весенне-летнего периода над осенне-зимним. Однако отмечается и не ярко выраженный вторичный максимум в декабре.

Рассчитанный по методике Т. С. Селегей, И. П. Юрченко [11] метеорологический потенциал загрязнения атмосферы (МПЗА) для Симферополя, учитывающий факторы аккумуляции и рассеивания загрязняющих веществ, имеет выраженный сезонный характер. Так, минимальные значения МПЗА характерны для августа и сентября, а максимальные для апреля-мая. Чем выше значение МПЗА, тем хуже условия для рассеивания загрязнений и самоочищения атмосферы.

### **Материалы и методы**

В целях наблюдения за состоянием атмосферного воздуха, оценки и прогноза его состояния осуществляется государственный мониторинг атмосферного воздуха, который является составной частью государственного мониторинга состояния окружающей природной среды и её компонентов.

Согласно Постановлению Совета министров Республики Крым «Об утверждении Положения о системе мониторинга окружающей среды Республики Крым» [12] контроль за состоянием атмосферного воздуха в городе Симферополь осуществляют: Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым, Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также Межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Крым и городу федерального значения Севастополю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» проводит мониторинг за состоянием атмосферного воздуха на 3 стационарных постах. Периодичность составляет 2–4 раза в сутки. Производятся измерения таких загрязняющих веществ как диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, формальдегид и бенз(а)пирен.

Мониторинг за загрязнением атмосферного воздуха, который проводит Межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Крым и городу федерального значения Севастополю, осуществляется на одном стационарном и 13 маршрутных постах.

Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым осуществляет мониторинг за загрязнением атмосферного воздуха посредством 5 автоматизированных стационарных постов.

Материалами для реализации целей данного научного исследования – выявление, анализ и моделирование полей концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе г. Симферополь - послужили открытые данные о загрязнении атмосферного воздуха в городе Симферополе, получаемые в системе

государственного мониторинга за состоянием окружающей природной среды в Республике Крым и база данных, сформированная в результате непосредственных приборных измерений содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города, выполненных в период 2018 – 2022 гг., в научно обоснованной авторами системе точек мониторинговых исследований (рис. 3).

Использование данных с постов наблюдений государственной системы мониторинга ЗАВ не позволяет в полной мере выявлять пространственную структуру полей концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, которая могла бы служить основой для принятия эффективных управленческих решений в сфере оздоровления городской среды.

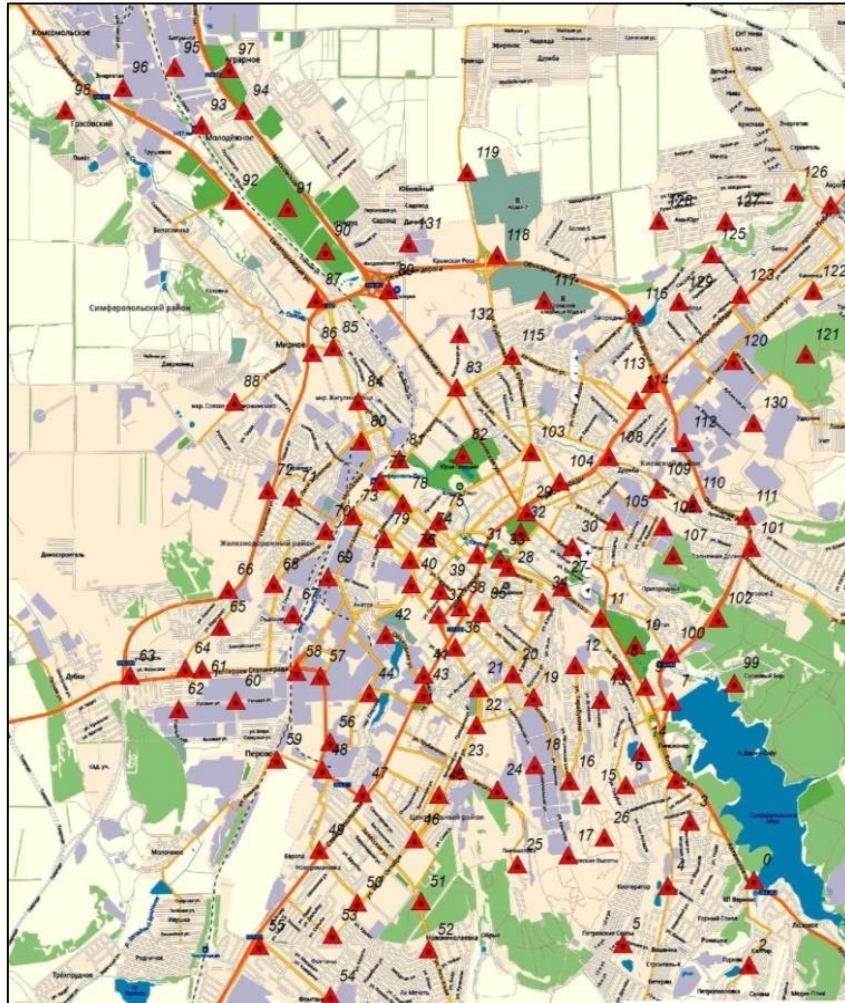
Поэтому нами был выбран передвижной/маршрутный метод наблюдений и обоснована система точек для постов мониторинга за ЗАВ. Маршрутный пункт наблюдения - это место или точка на определенном маршруте города, предназначенное для регулярного отбора проб воздуха в фиксированной точке местности. Программы наблюдения на маршрутных постах: полная - для получения систематической информации о разовых и среднесуточных концентрациях, ежедневно в 01, 07, 13 и 19 часов; неполная – 07, 13, 19 часов для получения информации о разовых концентрациях; сокращенная в 07 и 13 часов для получения информации о разовых концентрациях для ситуаций, когда температура воздуха ниже - 45, или если концентрации загрязняющих веществ не превышает 1/20 уровня ПДК; суточная – получении информации о среднесуточных концентрациях.

Измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города Симферополя осуществлялись на маршрутных постах в 132 точках. Выбор точек наблюдений за состоянием атмосферного воздуха (измерение концентрации загрязняющих веществ в АВ) проводился с учетом требований ГОСТ 17.2.3.01-86. При этом для обоснования расположения точек мониторинга учитывались следующие факторы: особенности метеорологической обстановки в г. Симферополь; пространственная организация транспортной инфраструктуры; транспортная нагрузка на дорожную сеть, наличие транспортных узлов и развязок; расположение стационарных источников выбросов загрязняющих веществ, а также расположение действующих и проектируемых государственных стационарных постов наблюдений за ЗАВ. Таким образом, была обоснована схема размещения точек мониторинга за загрязнением атмосферного воздуха в г. Симферополь (рис. 1) [9, 10].

Проведение верификационных измерений ЗАВ в контрольных точках сети точек мониторинга показали достоверность и репрезентативность измеряемых значений величин по сравнению с фоновыми значениями в пределах «ареала охвата» от 65 до 97%. Разброс точности и достоверности измеряемых значений величин относительно фоновых в операционных единицах связан, прежде всего, с динамикой климатических показателей и условий рассеяния загрязняющих веществ в период измерений, а также с неравномерностью поступления загрязняющих веществ в атмосферу от передвижных источников.

Концентрация загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха фиксировалась портативным газоанализатором ЭКОЛАБ (далее – газоанализатор), предназначенным для автоматического непрерывного и периодического измерения массовой концентрации различных неорганических и органических веществ в воздушной среде, а также сигнализации о превышении

предельно допустимых концентраций в воздухе рабочей зоны и в атмосферном воздухе.



**Рис. 1.** Схема расположения точек наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в г. Симферополь (научный мониторинг)

*Составлено авторами*

Предел допускаемого значения дополнительной погрешности газоанализатора, вызванной изменением температуры окружающей среды на каждые  $10^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от плюс  $5$  до плюс  $50^{\circ}\text{C}$  и изменением влажности окружающей среды на каждые  $10\%$  в диапазоне от  $10$  до  $80\%$ , не более  $0,2\delta$ .

Предел допускаемого времени установления показаний не более  $30$  секунд для атмосферного воздуха и  $10$  секунд для остальных диапазонов. Количество газочувствительных сенсоров, устанавливаемых одновременно,  $9$  (девять).

Контролируемые вещества и диапазоны измерений концентрации ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) приведены в таблице 1.

Наблюдения проводились в период  $2018 - 2022$  год в пределах временного интервала с  $10.00$  до  $14.00$  часов.

Прибор устанавливался в точке наблюдения на высоте  $h = 1,5-1,6$  м над земной поверхностью, на расстоянии не менее трех метров от проезжей части автомобильной дороги. Время подготовки к работе составляло не более  $5$  минут,

время адаптации прибора к внешним условиям 10 минут, время измерения – 5 минут. Общее время пребывания в точке наблюдения составляло от 30 минут до одного часа.

**Таблица 1**

Контролируемые вещества и диапазоны измерений массовой концентрации

| № п/п | Контролируемые вещества                         | Диапазоны измерений массовой концентрации (мг/м <sup>3</sup> ) |                           |
|-------|---|--|---------------------------|
|       |   | А (атмосфера)  | АР (расширенный диапазон) |
| 1     | Аммиак (NH <sub>3</sub> )                       | 0,02÷10,0  | 0,02÷400,0                |
| 2     | Озон (O <sub>3</sub> )                          | 0,015÷0,05   | 0,015÷2,0                 |
| 3     | Оксид углерода (CO)                             | 1,5÷10,0   | 1,5÷400,0                 |
| 4     | Бензол (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )         | 0,05÷2,5   | 0,05÷100,0                |
| 5     | Сероводород (H <sub>2</sub> S)                  | 0,004÷5,0  | 0,004÷200,0               |
| 6     | Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )                 | 0,025÷5,0  | 0,025÷200,0               |
| 7     | Углеводороды (C <sub>6</sub> -C <sub>10</sub> ) | 30,0÷150,0   | 30,0÷6000,0               |
| 8     | Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )                | 0,02÷1,0   | 0,02÷40,0                 |
| 9     | Формальдегид (CH <sub>2</sub> O)                | 0,0015÷0,25  | 0,0015÷10,0               |

*Составлено авторами*

Прибор автоматически записывает информацию не только о концентрации девяти химических соединений в атмосферном воздухе, но и такие метеорологические данные, как давление атмосферного воздуха, скорость движения воздушных масс, температуру воздуха. Для связи с компьютером, использовался интерфейс газоанализатора RS232. Для переноса данных на USB Flash использовался USB порт. Обобщение и анализ полученных данных газоанализатора по результатам замеров выполнялись в программе Excel. Дальнейшая работа с базой данных (массивом пространственно распределённой информации - значения концентрации загрязняющих веществ) проводилась с помощью программы ArcGIS v.10.2.

Методика построения геоинформационных картографических моделей полей концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха на территории г. Симферополь включала в себя несколько этапов:

1. Подготовка картографической основы, топогеодезическая привязка различных информационных слоев и баз данных в едином фрейме данных.
2. Размещение на картографической основе пунктов наблюдений.
3. Слияние баз данных (в виде таблиц), полученных в ходе полевых наблюдений, со слоем пунктов наблюдений привязанного, в свою очередь, к слою обзорной географической карты.
4. Построение раstra (пространственной регулярной сетки-матрицы) для каждого измеренного показателя.
5. Геостатистический анализ распределения измеренных значений в пределах ГРИД-матрицы.
6. Выбор метода интерполяции и экстраполяции для построения поля концентрации загрязняющего вещества с учетом данных геостатистического анализа распределения измеренных значений в пределах ГРИД-матрицы.

7. Выбор характера неравномерности шкалы отображения интерполированных и экстраполированных данных.

8. Выбор дизайна и построение макета карты.

9. Экспорт изображения в общедоступный формат графических файлов.

10. Подготовка картографической основы опиралась на общедоступные цифровые картографические модели (карты) с интернет портала OpenStreet.

11. Размещение на картографической основе пунктов наблюдений было осуществлено путем создания точечного слоя (шейп-файла) и нанесением стандартными инструментами редактирования слоев точек наблюдений с последующей привязкой этого слоя к базовой картографической основе.

В процессе формирования базы данных показателей концентрации загрязняющих веществ мы придерживались рекомендаций большинства руководств по разработке баз данных, где рекомендуется строить базу данных на основе множества атрибутивных таблиц (каждая из которых посвящена отдельному показателю или теме) вместо создания одной большой таблицы, содержащей все необходимые табличные поля. Такая схема предотвращает дублирование информации в базе данных, т.к. информация содержится только в одной таблице. Когда же необходима информация, которая не содержится в текущей таблице, можно связывать две таблицы. Такой подход был использован для слияния таблиц с измеренными значениями концентраций и слоя с точками наблюдений, который, в свою очередь, был связан с базовой картой. Собранная нами информация заключена в таблицы Excel и связана с пространственными объектами – точками наблюдений, которые отображены на карте (см. рис. 2).

Выбор характера шкалы отображения интерполированных и экстраполированных значений опирался на геостатистический анализ и классификацию измеренных числовых данных.

При выполнении классификации числовых значений можно использовать один из стандартных методов, предоставляемых в ArcMap, или вручную задавать собственные пользовательские диапазоны классов (что было сделано нами при предварительном пространственном анализе данных). Для определения собственных пользовательских классов вручную устанавливались разделители классов и диапазоны, которые были необходимы для отображения пространств, где значения концентраций загрязнителей от 0 до ПДК и от ПДК и выше.

Тестирование методов классификаций, нами был выбран метод «геометрических интервалов». Схема классификации методом геометрических интервалов строит границы классов, основываясь на интервалах, имеющих геометрическую последовательность. Геометрический коэффициент в этом классификаторе может измениться (на обратный к нему), чтобы оптимизировать диапазоны классов. Алгоритм создает геометрические интервалы путем минимизирования квадратичной суммы элементов в каждом классе. Это позволяет добиться того, что в каждом классе будет находиться примерно равное количество значений, а размеры интервалов будут примерно равнозначными.

Этот алгоритм был специально разработан для обработки непрерывных данных и сочетает в себе достоинства методов равного интервала, естественных границ и квантиля. Он позволяет корректно разделить средние значения и выбивающиеся из ряда крайние, позволяя получить результат, адекватный с картографической точки зрения и визуально привлекательный. Например, метод классификации по геометрическому интервалу подходит для набора данных об

уровне осадков, где зарегистрированы осадки только в атрибутах 15 из 100 метеостанций (менее 50%), а атрибуты остальных метеостанций равны 0. Также этот метод нашел применение при отображении набора растровых данных и полей концентраций загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. Пример классификации показан на рисунке 4.

Целевые исследования на территории г. Симферополь выявили, что основными источниками выбросов загрязнений в атмосферный воздух города являются: автотранспорт (85%), котельные (8%) и промышленные объекты (7%). Существенный вклад в загрязнение воздуха вносят неорганизованные источники выбросов (свалки, очистные сооружения, объекты автотранспорта, нефтебазы и др.).

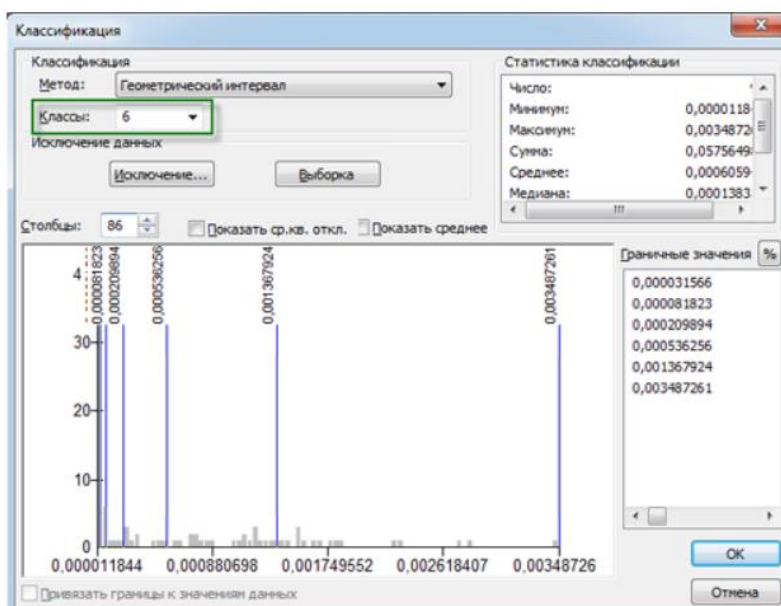


Рис. 2. Пример классификации методом геометрических интервалов, использованный при построении неравномерной шкалы отображения интерполированных данных  
Составлено авторами

## Результаты и обсуждение

Экологическое состояние атмосферного воздуха в г. Симферополь определяется не только наличием перечисленных источников поступления загрязняющих веществ, но и особенностями природных условий города (главным образом, это климатические и геоморфологические условия). Для Симферополя характерна обратная температурная инверсия, когда холодный воздух в ночное время суток опускается с гор в долину реки Салгир, заполняет ее котловинообразную впадину, в которой находится город, застаивается в ней, способствуя накоплению загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

Результаты измерений и моделирования полей концентрации загрязняющих веществ в приземном слое воздуха Симферополя выявили весьма неоднородную картину распространения полей концентрации загрязняющих веществ (рис. 3-10, составленные авторами).



**Аммиак.** Значения выявленных концентраций аммиака в атмосферном воздухе Симферополя изменяются от 0 до 0,016 мгм/м<sup>3</sup>. Поля распределения концентраций **аммиака** носят крайне неоднородный характер. Поля концентраций аммиака с максимальными показателями сосредоточены в северо-западной части Симферополя в промышленной зоне района ГРЭС (рис. 3). Основным источником поступления аммиака в этом районе является разгрузочно-погрузочная железнодорожная станция с перекачкой жидких веществ. Отмечается также повышенный фон в районе верховий Петровской балки и Петровских высот, что может быть связано с несанкционированным сливом канализационных стоков.

**Озон.** Поля концентрации **озона** в приземном слое атмосферного воздуха носит островной характер, тяготея в основном к осевой части долины реки Салгир в центральной части котловины города. Значения концентраций озона изменяются в диапазоне от 0 до 0.5 мгм/м<sup>3</sup> (рис. 4). Максимальные значения характерны для промышленных зон города (ГРЭС, Льдозаводское, торговый центр Меганом и район объездной и ул. Жени Дерюгиной) и для участков автодорог с высокой транспортной нагрузкой. Именно в этих зонах наблюдается превышение значений ПДК. Минимальные значения концентрации приземного озона приурочены к парковым зонам, а также зонам с низкоэтажной жилой застройкой окраин города. Отмечается повышение фона в зонах высокоэтажной застройки и понижение фона в парковых зонах

**Оксид углерода.** Концентрация **оксида углерода** в атмосферном воздухе города Симферополя колеблется от 0 до 6 мгм/м<sup>3</sup>. Ярко выражена пространственная неоднородность в распределении полей концентрации оксида углерода. Максимально загрязненной является северо-западная часть города. В меньшей степени загрязнены северо-восточные и восточные районы города. Зоны с высокими значениями концентраций оксида углерода и значениями, превышающими ПДК, приурочены главным образом к автодорогам с высокой загруженностью транспортом и к местам скопления промышленных и производственных объектов (рис. 5). Островной характер распределения повышенных значений оксида углерода свидетельствует о высокой неоднородности полей концентрации в черте города и привязки их к внутри суточной цикличности активности транспортного движения и заторов на дорогах.

**Бензол.** Максимальные значения полей концентрации **бензола** приурочены к району ГРЭС, где и отмечаются превышения ПДК. Диапазон значений концентраций аммиака составляет от 0,081 до 0,186 мгм/м<sup>3</sup> (рис. 6). Повышение фона бензола в атмосферном воздухе наблюдается также в южной части города Симферополь в районе ул. Батурина, ул. Севастопольской и микрорайонов Пневматика, Залеская, Новониколаевка. Характеризуется практически полным отсутствием островной структуры распределения. Равномерное распределение полей концентрации бензола в атмосферном воздухе города связана с довольно густой сетью автодорог, а также повсеместной высокой транспортной загруженностью не только общегородских центральных магистралей, но и внутри кварталных подъездных дорог.

**Диоксид серы.** Значения концентрации **диоксида серы** в атмосферном воздухе Симферополя колеблются в диапазоне от 0 до 0,08 мгм/м<sup>3</sup> (рис. 7). Превышений ПДК выявлено не было. Максимальные концентрации и площади распространения диоксида серы в АВ приходится на юго-восточную часть города.

Наиболее значительные концентрации диоксида серы наблюдаются в районе ул. Беспалова, микрорайонов Студенческий городок, Марьино, Луговское и обьездная дорога на Ялту. Повышенный фон наблюдается по всему городу (см. рис. 7). Пешеходная зона вдоль набережной реки Салгир, крупные парки и скверы, а также зоны частной жилой застройки характеризуются в целом более низкими значениями загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы.

**Углеводороды.** Значения концентрации *углеводородов* в атмосферном воздухе Симферополя колеблются в диапазоне от 0.74 до 2,42 мг/м<sup>3</sup> (рис. 8). Максимальные значения приурочены к промышленной зоне района ГРЭС. Повышенный фон наблюдается на территории вдоль всего межгрядового понижения Симферопольской котловины. Однако превышений ПДК выявлено не было.

**Формальдегид.** Загрязнение *формальдегидом* захватывает практически все районы города. Диапазон измеренных значений концентрации формальдегида от 0 до 0.02 мг/м<sup>3</sup>. Максимальные значения концентрации формальдегида наблюдаются в центре города и в юго-восточной его части, где были зафиксированы превышения ПДК (см. рис. 9). Загрязнения формальдегидом главным образом связано с выбросами от автотранспорта.

Оценка степени суммарного загрязнения атмосферного воздуха в Симферополе (рис. 10) проводилась в соответствии с требованиями РД 52.04.667-2005 «Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения» по индексу загрязнения атмосферы (ИЗА) [13].

Расчет ИЗА выполнялся для четырех веществ, нормированное содержание которых в атмосферном воздухе максимально (*оксид углерода, бензол, озон и формальдегид*). Расчет нормированного содержания для одного вещества выполняется по формуле:

$$I_i = \frac{q_{cp.i} \cdot k_i}{ПДК_{cc.i}}, \quad (1)$$

где  $q_{cp.i}$  – среднее содержание  $i$ -го вещества в атмосферном воздухе в пункте наблюдения, мг/м<sup>3</sup>;

$ПДК_{cc.i}$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация  $i$ -го вещества, мг/м<sup>3</sup>;

$k_i$  – безразмерный коэффициент, учитывающий принадлежность к разным классам опасности.

|                 |      |     |     |     |
|-----------------|------|-----|-----|-----|
| $k_i$           | 0,85 | 1,0 | 1,3 | 1,7 |
| Класс опасности | 4    | 3   | 2   | 1   |

Суммируя показатели ИЗА, можно получить ИЗА<sub>п</sub> по  $n$  основным загрязняющим веществам – т.н. комплексный индекс ЗАВ (КИЗА). Уровень загрязнения атмосферного воздуха оценивается как низкий при значениях КИЗА <5, повышенный при КИЗА от 5 до 8, высокий при КИЗА от 8 до 13 и очень высокий при КИЗА > 13.

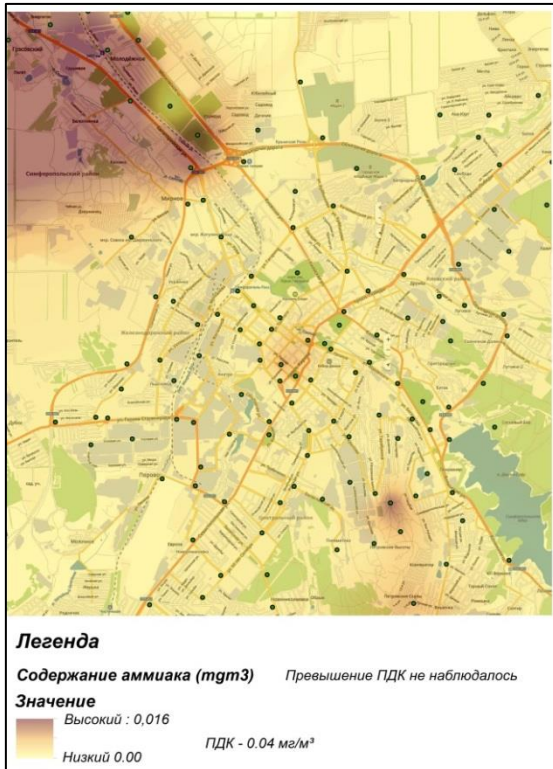


Рис. 3. Содержание в атмосферном воздухе (АВ) г. Симферополь аммиака

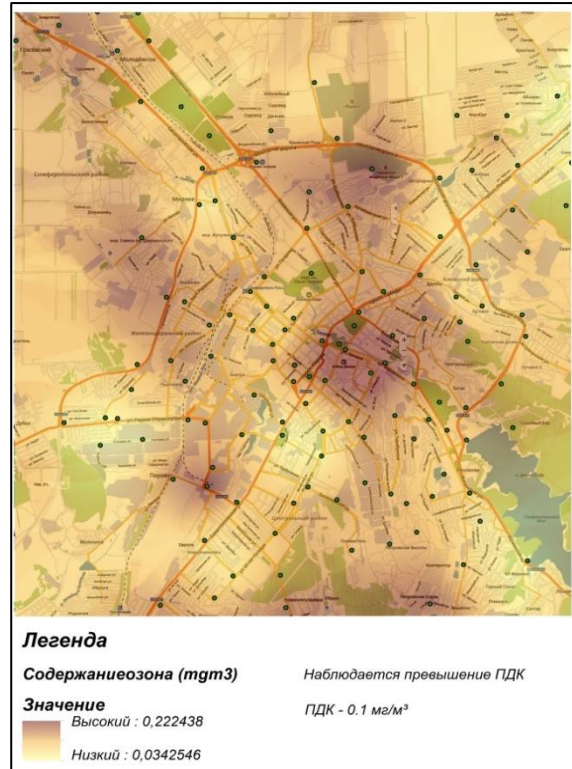


Рис. 4. Содержание в АВ г. Симферополь озона

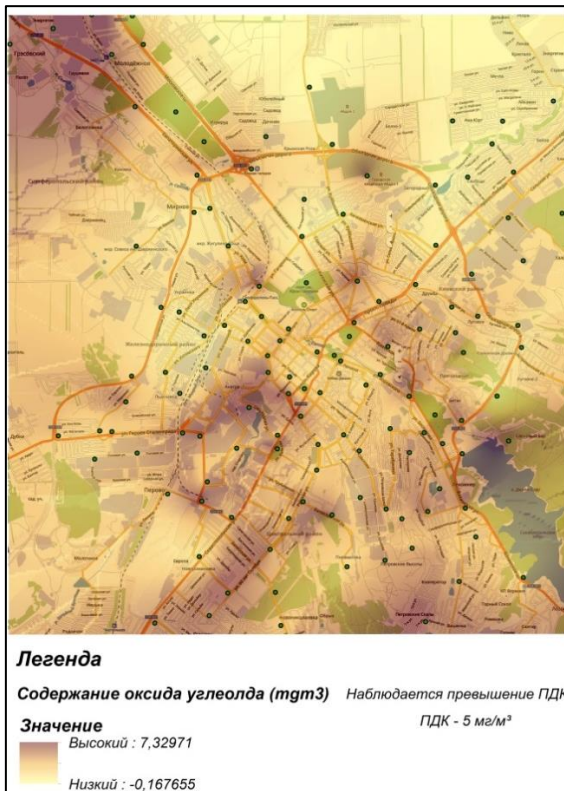


Рис. 5. Содержание в АВ г. Симферополь оксида углерода

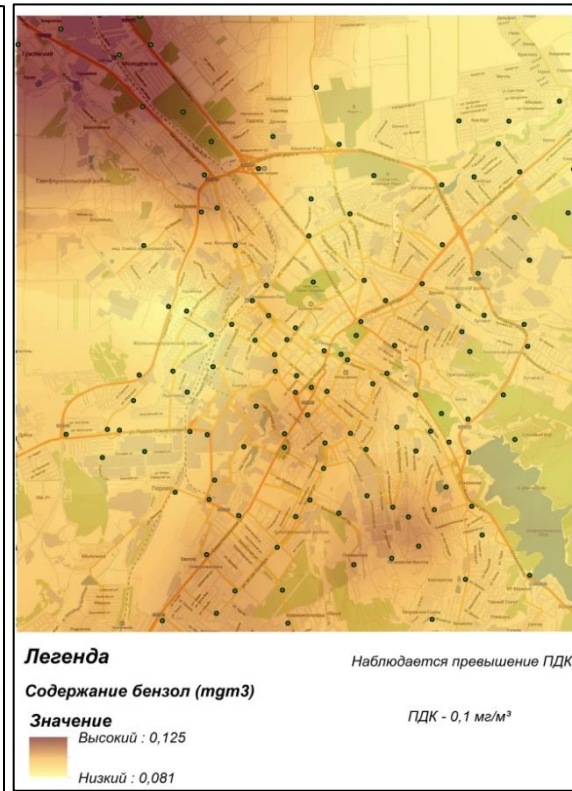
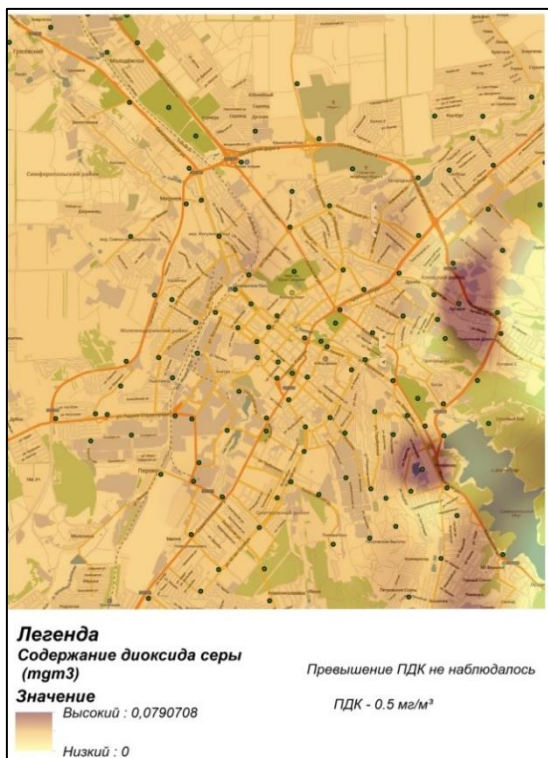
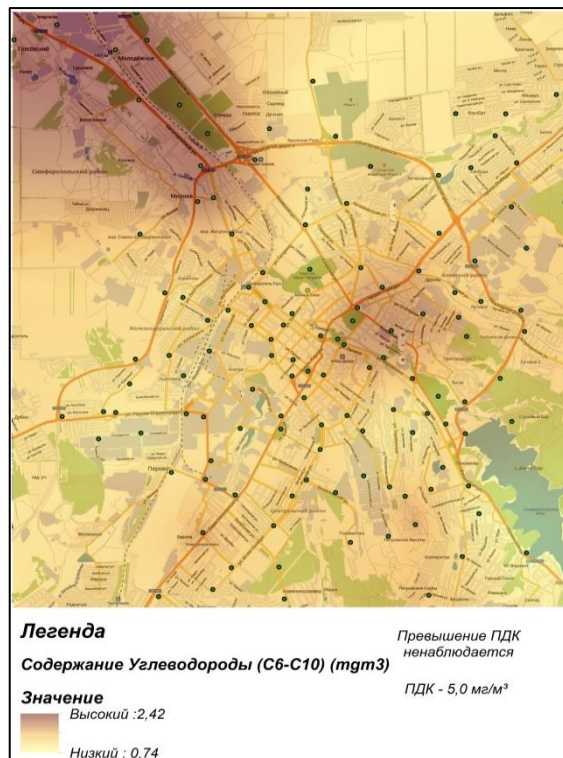


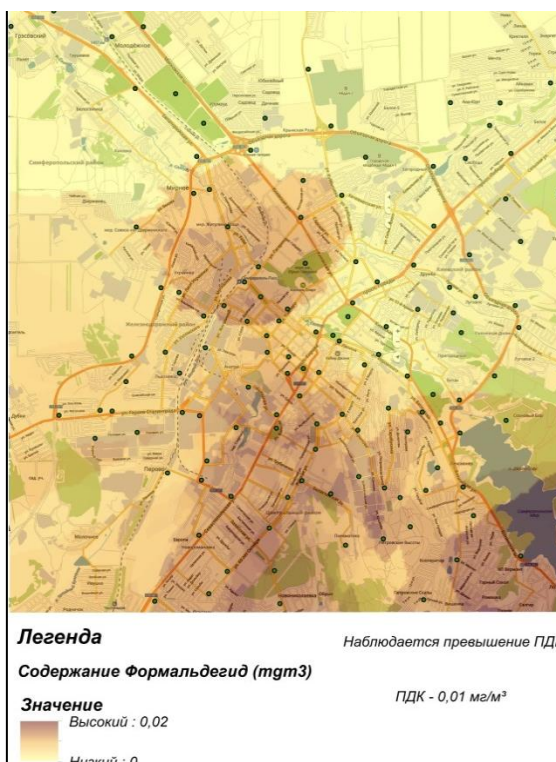
Рис. 6. Содержание в АВ г. Симферополь бензола



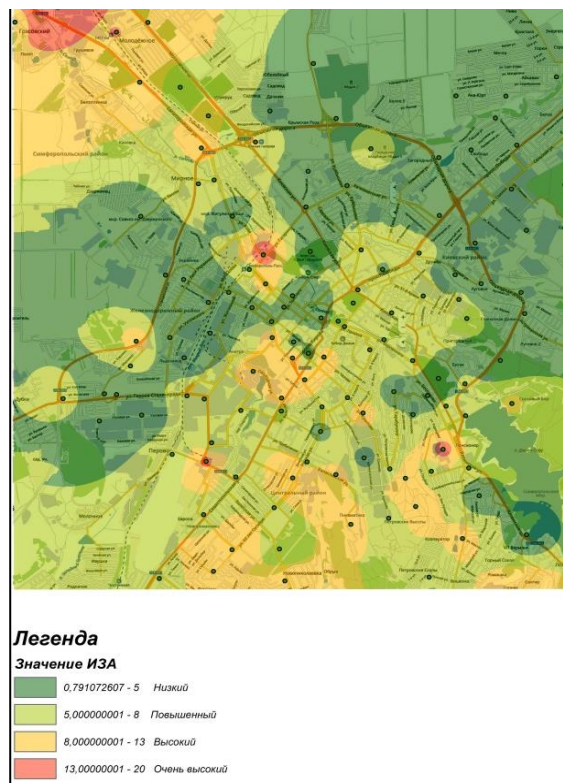
**Рис. 7.** Содержание в АВ г. Симферополь диоксида серы



**Рис. 8.** Содержание в АВ г. Симферополь углеводородов



**Рис. 9.** Содержание в АВ г. Симферополь формальдегида



**Рис. 10.** Комплексный индекс загрязнения атмосферного воздуха (КИЗА) в г. Симферополь в 2021 году

Комплексный индекс загрязнения атмосферы (КИЗА) -  $I(n)$ , учитывающий  $n$  загрязняющих веществ рассчитывался по формуле<sup>^</sup>

$$I(n) = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n q_{cpI} / (\text{ПДК}_{с.с.} \cdot c_i)^{C_i}, \quad (2)$$

где  $q_{cpI}$  – среднегодовая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>,

$\text{ПДК}_{с.с.} \cdot c_i$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация  $i$ -го вещества, мг/м<sup>3</sup>;

$C_i$  - безразмерный коэффициент, позволяющий привести степень вредности  $i$ -го загрязняющего вещества к степени вредности диоксида серы [13].

По результатам выполненных расчетов КИЗА и с использованием возможностей ArcGIS v.10.2, была построена картографическая модель, отражающая пространственную дифференциацию территории города по показателю комплексного индекса загрязнения атмосферы (см. рис. 10). Диапазон колебаний значений КИЗА для Симферополя составляет от 0,79 до 13, что соответствует в шкале качественной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха – от удовлетворительной до высокой.

Пространственный анализ и моделирование полей концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе г. Симферополь позволил выявить некоторые особенности загрязнения атмосферы. Так, практически для большинства измеренных загрязняющих веществ максимумы значений отмечаются в северо-западном районе города – это район ГРЭС, где сконцентрированы энергетические, транспортные, промышленные объекты и станция по перевалке грузов с железной дороги.

Пространственная структура полей концентрации загрязняющих веществ весьма неоднородна. Поля повышенной концентрации загрязняющих веществ приурочены к участкам автомобильных дорог с максимальной транспортной загруженностью и транспортным узлам, и развязкам, а также к местам расположения промышленных предприятий и производственных объектов.

Отмечается положительная роль скверов, парков и других зеленых насаждений города, в пределах которых наблюдается значительное снижение концентраций всех измеряемых нами загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

## Выводы

Научно-исследовательские работы, направленные на мониторинг и анализ экологического состояния городской среды и её компонентов, являются весьма значимыми, поскольку, во-первых, дополняют базу эмпирических данных геохимических и геофизических характеристик среды, получаемых в системе государственного мониторинга состояния окружающей среды в городах; во-вторых, это позволяют более объективно выявлять и оценивать экологическое состояние компонентов урбандошадтов (приземного слоя воздуха, почв, водных объектов, зеленых насаждений) и, в-третьих, достаточно большой объем целевой эмпирической информации, получаемой в системе научного геоэкологического мониторинга, позволяет осуществлять построение картографических моделей текущего или прогнозного экологического состояния муниципальных и иных территорий на основе геоинформационных технологий.

Предложен и апробирован алгоритм и методика организации системы мониторинга за загрязнением приземного слоя АВ Симферополя, которые способны обеспечить данными построение достоверных картографических моделей распределения полей концентрации загрязняющих веществ, а также дальнейшую оценку экологического состояния атмосферного воздуха и районирование территорий города по степени благоприятности/неблагоприятности экологической ситуации.

Анализ природных факторов и условий выявил специфику и большую роль климатических факторов, рельефа, типа застройки, плотности транспортной инфраструктуры и её загруженности в формировании пространственной структуры полей концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха в городе Симферополе.

По результатам приборных измерений концентраций загрязняющих веществ в АВ Симферополя и расчета КИЗА, используя возможности ArcGIS v.10.2, построены картографические модели полей концентрации основных загрязнителей воздушной среды города Симферополя, а также картографическая модель, отражающая пространственную дифференциацию территории города по показателю комплексного индекса загрязнения атмосферы. Диапазон колебаний значений КИЗА для Симферополя составляет от 0,79 до 13, что соответствует в шкале качественной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха – от удовлетворительной до высокой.

Полученные картографические представления данных по мере накопления статистики в будущем послужат как основа для морфологического и морфометрического анализа рисунка полей концентрации загрязнителей АВ и разработки цифрового двойника территории города Симферополя с целью решения прогнозных геоэкологических задач.

Результаты подобных геоэкологических исследований и картографического моделирования полей загрязнения могут и должны использоваться для эффективного управления городами, корректировки внутренней транспортной логистики городов, составления генеральных планов развития городов, размещения и обустройства городских общественных пространств и оздоровления городской среды в целом.

### *Литература*

1. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary. World Health Organization. 2021. 273 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
2. WMO Air Quality and Climate Bulletin. No. 1, September 2021. 11 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
3. P. Orellano, J. Reynoso, N. Quarantacchi, A. Bardach, A. Ciapponi. Short-term exposure to particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), and ozone (O<sub>3</sub>) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. Environment International, № 142. 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020318316?via=ihub>.

4. Воробьева И. Д., Скрыпник Л. Н. Применение геоинформационных систем для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта в городе Калининграде // Научные исследования: от теории к практике. 2016. № 2-2(8). С. 71-73.
5. Полуэктова М. М. Метод оценки загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом с использованием геоинформационных систем: дис. ... на соискание ученой степени кандидата наук. СПб.: ГГО им. Воейкова, 2009. 165 с.
6. Гаджибеков М. И., Раджабова Р. Т., Гусейнова Н. О. [и др.] Геоинформационное картирование загрязнения атмосферного воздуха в Республике Дагестан // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2015. № 2(31). С. 101-104.
7. Слобожанина Е. А. Применение геоинформационных систем при оценке неканцерогенного риска здоровью населения города Кургана из-за загрязнения атмосферного воздуха // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник статей по материалам VI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Курган, 28 апреля 2022 года. Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2022. С. 49-53
8. Смирнов В. О. Подходы к обоснованию развития системы мониторинга атмосферного воздуха в г. Симферополь // Геоэкология и природопользование: актуальные вопросы науки, практики и образования: материалы Всероссийской научно-практической юбилейной конференции (Симферополь, 17–20 октября 2018 г.). Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. С.175-178.
9. Бобра Т. В., Свербилова А. А. Мониторинг и анализ транспортной нагрузки в пределах городского округа Симферополь // Геополитика и экогеодинамика регионов. Том 6 (16). Вып. 2. 2020. С. 232–243.
10. Бобра Т. В., Свербилова А. А. Мониторинг и анализ загрязнения атмосферного воздуха территории г. Симферополя // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. Том 6 (72). № 1. 2020. С. 156–167.
11. Селегей Т. С., Юрченко И. П. Потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и природные ресурсы. 1990. № 2. С. 132-137.
12. Об утверждении Положения о системе мониторинга окружающей среды Республики Крым: постановление Совета министров Республики Крым. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rk.gov.ru/file/pub/pub\\_237306.pdf](https://rk.gov.ru/file/pub/pub_237306.pdf).
13. РД 52.04.667-2005 «Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения». М., 2006. 50 с.

T. V. Bobra<sup>1</sup>  
A. I. Lychak<sup>2</sup>

***Spatial analysis and modeling of pollutant concentration fields in the atmosphere of Simferopol***

---

<sup>1,2</sup>V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Taurida Academy, Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation

*e-mail: tvbobra@mail.ru<sup>1</sup>, lychak1@rambler.ru<sup>2</sup>*

**Abstract.** *The paper considers a number of aspects related to modern trends in studying of air pollution in urban areas. The need for researching the structure of the spatial distribution of pollutant concentration fields was justified. An algorithm and methodology of researching and geoinformation modeling were proposed. The analysis of conditions and formation factors of pollutant concentration fields in the atmosphere of Simferopol were given. Cartographic models of concentration fields of the main pollutants have been built based on scientific monitoring data.*

**Keywords:** *atmospheric air pollution, monitoring, geoinformation modeling, surface analysis, ecological state of atmospheric air, complex atmospheric index.*

### **References**

1. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary. World Health Organization. 2021. 273 r. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
2. WMO Air Quality and Climate Bulletin. No. 1, September 2021. 11 r. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
3. P. Orellana, J. Reynoso, N. Quarantad, A. Bardache, A. Ciapponie. Short-term exposure to particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), and ozone (O<sub>3</sub>) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, № 142. 2020. URL: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020318316?via=ihub>.
4. Vorob'eva I. D., Skrypnik L. N. *Primenenie geoinformacionnyh sistem dlja ocenki urovnja zagrjaznenija atmosfernogo vozduha vybrosami avtotransporta v gorode Kaliningrade // Nauchnye issledovanija: ot teorii k praktike*. 2016. № 2-2(8). S. 71-73. (in Russian)
5. Polujektova M. M. *Metod ocenki zagrjaznenija atmosfernogo vozduha avtomobil'nym transportom s ispol'zovaniem geoinformacionnyh sistem: dis. ... na soiskanie uchenoj stepeni kandidata nauk*. SPb.: GGO im. Voejkova, 2009. 165 s. (in Russian)
6. Gadzhibekov M. I., Radzhabova R. T., Gusejnova N. O. [i dr.] *Geoinformacionnoe kartirovanie zagrjaznenija atmosfernogo vozduha v Respublike Dagestan // Izvestija Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*. 2015. № 2(31). S. 101-104. (in Russian)



7. Slobozhanina E. A. Primenenie geoinformacionnyh sistem pri ocenke nekancerogenogo riska zdorov'ju naselenija goroda Kurgana iz-za zagryaznenija atmosfernogo vozduha // Aktual'nye problemy jekologii i prirodopol'zovanija: sbornik statej po materialam VI Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoj konferencii, Kurgan, 28 aprelja 2022 goda. Kurgan: Kurganskaja gosudarstvennaja sel'skohozjajstvennaja akademija im. T.S. Mal'ceva, 2022. S. 49-53 (in Russian)
8. Smirnov V. O. Podhody k obosnovaniju razvitija sistemy monitoringa atmosfernogo vozduha v g. Simferopol' // Geojekologija i prirodopol'zovanie: aktual'nye voprosy nauki, praktiki i obrazovanija: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj jubilejnoj konferencii (Simferopol', 17–20 oktjabrja 2018 g.). Simferopol': IT «ARIAL», 2018. S.175-178 (in Russian)
9. Bobra T. V., Sverbilova A. A. Monitoring i analiz transportnoj nagruzki v predelakh gorodskogo okruga Simferopol' // Geopolitika i jekogeodinamika regionov. Tom 6 (16). Vyp. 2. 2020. - S. 232–243. (in Russian)
10. Bobra T. V., Sverbilova A. A. Monitoring i analiz zagryaznenija atmosfernogo vozduha territorii g. Simferopolja // Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija. Tom 6 (72). № 1. 2020. - S. 156–167. (in Russian)
11. Selegej T. S. Potencial rasseivajushhej sposobnosti atmosfery / T. S. Selegej, I. P. Jurchenko // Geografija i prirodnye resursy. 1990. № 2. S. 132-137. (in Russian)
12. Ob utverzhdenii Polozhenija o sisteme monitoringa okružhajushhej sredy Respubliki Krym: postanovlenie Soveta ministrov Respubliki Krym. URL: [https://rk.gov.ru/file/pub/pub\\_237306.pdf](https://rk.gov.ru/file/pub/pub_237306.pdf). (in Russian)
13. RD 52.04.667-2005 «Dokumenty o sostojanii zagryaznenija atmosfery v gorodah dlja informirovanija gosudarstvennyh organov, obshhestvennosti i naselenija». M., 2006. 50 s. (in Russian)

*Поступила в редакцию 04.11.2022 г.*