

Т.Е. Симакина, С.В. Крюкова

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ
ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

T.E. Simakina, S.V. Krukova

**THE SPATIAL ANALYSIS OF AIR POLLUTION CONCENTRATION
IN ST. PETERSBURG**

В данной статье выполнен пространственный анализ загрязнения атмосферы по данным Автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга. Выявлены особенности суточной и сезонной изменчивости локализации оксида углерода, оксида и диоксида азота. Проведен анализ ошибок интерполяции данных наблюдения.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, метеорологические параметры, инверсия.

In this article the spatial analysis of air pollution according to the automated air monitoring system of St. Petersburg is made. The features of daily and seasonal carbon monoxide, oxide and nitrogen dioxide localization variability are revealed. The data interpolation errors analysis is carried out.

Key words: atmosphere pollution, meteorological parameters, inversion.

Наблюдающиеся сегодня в мегаполисах рост количества транспортных средств, чрезмерная концентрация населения и промышленных предприятий приводят к скоплению в атмосфере различных газовых и пылеобразных загрязнений [1, 2]. На здоровье жителей Санкт-Петербурга — промышленного мегаполиса с развитой сетью транспортных магистралей — оказывают влияние, в первую очередь, основные загрязняющие вещества (ЗВ): оксид углерода (CO), оксид азота (NO), диоксид азота (NO₂), взвешенные вещества (пыль), диоксид серы (SO₂), которые поступают в атмосферный воздух города от выбросов предприятий теплоэнергетики, промышленности, автотранспорта, причем объем выбросов последнего составляет 87 % [4].

В настоящее время имеется много информации по статистике загрязняющих веществ, временной динамике, однако данные об их пространственной локализации немногочисленны [8]. Целью настоящей работы является построение пространственного поля загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга и анализ его суточной динамики. Для реализации цели были выбраны следующие загрязняющие вещества: CO, NO и NO₂, вместе составляющие более 80 % выбросов от стационарных и передвижных источников.

Значения концентраций ЗВ представляют собой результаты измерений Автоматизированной системы мониторинга (АСМ) атмосферного воздуха и предоставлены Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга (КПООС). В настоящее время АСМ включают 21 стационарную автоматическую станцию мониторинга загрязнения

атмосферного воздуха, схема размещения которых представлена на рис. 1. Станции АСМ расположены в 18 административных районах Санкт-Петербурга, функционируют непрерывно в автоматическом режиме и обеспечивают регулярное получение оперативной информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга основными загрязняющими веществами. Дискретность измерений составляет 20 мин.

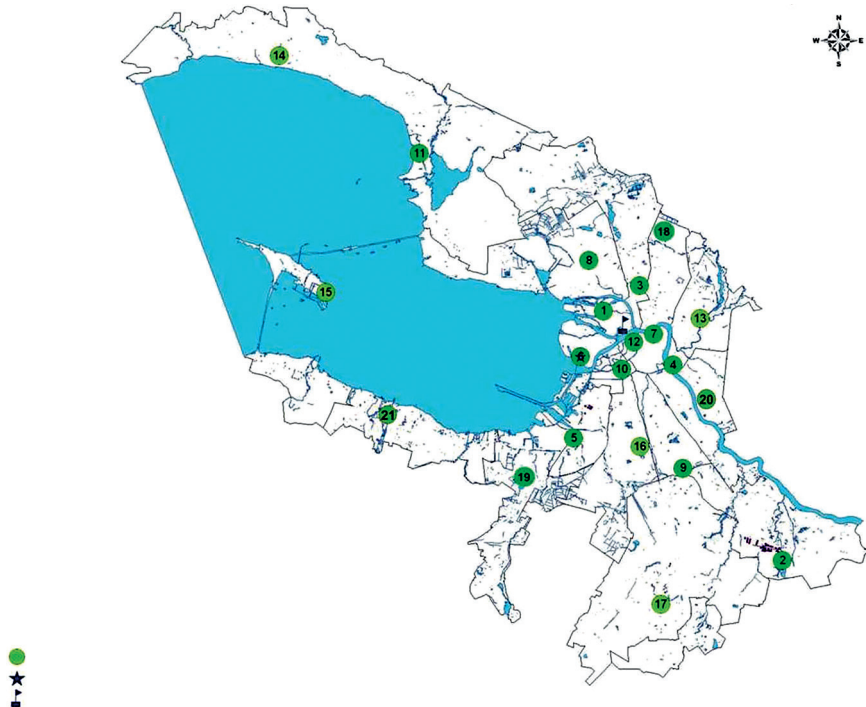


Рис. 1. Схема размещения экологических станций в Санкт-Петербурге

Общий уровень загрязнения и пространственное распределение концентраций ЗВ в воздухе зависит от времени суток и сезона. Ранее нами установлено [6], что уровень загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге повышается с уменьшением температуры, поэтому для анализа был выбран двенадцатидневный временной интервал в январе 2010 г., являющийся самым холодным в Санкт-Петербурге с 1987 г.: среднемесячная температура на $4,3^\circ$ ниже средних многолетних значений [9]. Указанный интервал и временной ход минимальной, средней и максимальной температуры воздуха отмечены прямоугольником на рис. 2.

В выбранный период наблюдалась совокупность метеорологических факторов, способствующих повышению уровня загрязнения атмосферы [3]. Значения атмосферного давления превышали среднемноголетние. Суммарная за месяц продолжительность солнечного сияния также была выше среднемноголетних значений (25,8 ч при норме 19 ч), что способствует усилению фотохимических реакций. Кроме того,

месячная сумма осадков в январе в Санкт-Петербурге составила 69 % от нормы (см. рис. 2) [9], что могло ослабить процесс самоочищения атмосферы. Известно, что к росту загрязнения также приводит устойчивая стратификация нижнего слоя атмосферы при слабом ветре [3]. В исследуемый период инверсии наблюдались практически ежедневно. Средняя мощность как ночных, так и дневных инверсий составила 650 м, интенсивность — около $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

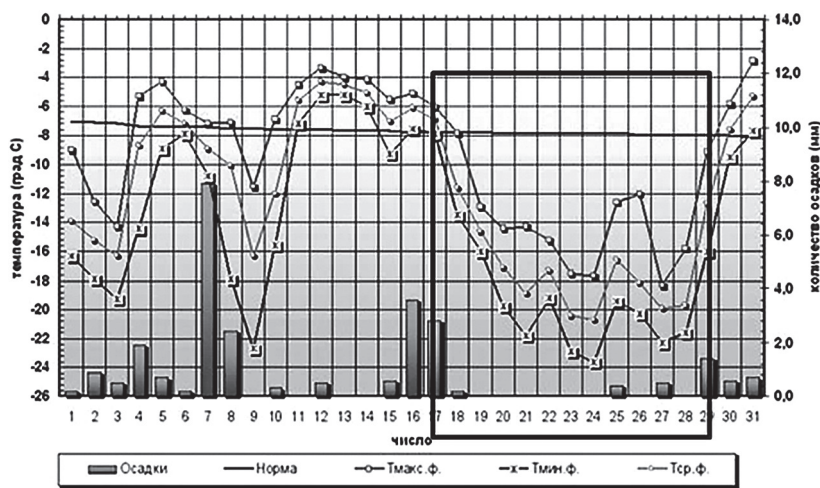


Рис. 2. Фактическая температура воздуха и ежедневное количество осадков в январе 2010 г. в Санкт-Петербурге

Для сравнения пространственной локализации ЗВ был взят аналогичный по продолжительности интервал в августе того же года, в котором также преобладал антициклонический тип погоды. Наблюдалось повышенное давление, дефицит осадков, температура превышала норму на $11\text{--}13^{\circ}$. Инверсии, как и в холодный период, ночью наблюдались ежедневно, из них 90 % составили приземные. По сравнению с зимними, днем инверсии были в три раза реже, с меньшей мощностью и меньшим градиентом [7].

Созданный массив данных для анализа суточной динамики в холодное время включал мгновенные значения концентраций оксидов углерода и азота и диоксида азота по 20-ти станциям, взятые в метеорологические сроки с интервалом в три часа. Он позволил выявить суточный ход уровня ЗВ: ночью наблюдался минимум всех ЗВ, рост концентрации происходил с 6 в, максимума все ЗВ достигают в 18 ч с дальнейшим спадом до 21 ч. В течение дня концентрация CO изменялась в диапазоне $0,02\text{--}0,98$ ПДК_{мр}, NO достигала значения $2,3$ ПДК_{мр}, NO₂ — $0,5$ ПДК_{мр}.

Сравнительный сезонный анализ поля распределения ЗВ проводился по осредненным данным для дневного и ночного времени суток. Таким образом, получены четыре массива данных: за холодный интервал в дневное и ночное время, за теплый интервал в дневное и ночное время. Концентрации трех загрязняющих веществ в долях среднесуточной ПДК_{сс} за исследуемые интервалы, измеренные на всех АСМ

города, представлены на рис. 3. Видно, что зимой днем больше всего превышений ПДК_{сс} (до 2–2,5 раз) наблюдается у оксидов азота — NO на 13 станциях и NO₂ на 18 станциях, CO — в пределах нормы на всех станциях. Ночью же заметно уменьшение количества станций с превышениями — до 5 станций для NO, до 10 станций для NO₂. Летом наблюдается значительное уменьшение количества станций с небольшими превышениями ПДК_{сс} — до 5 для NO₂, остальные ЗВ — в пределах нормы.

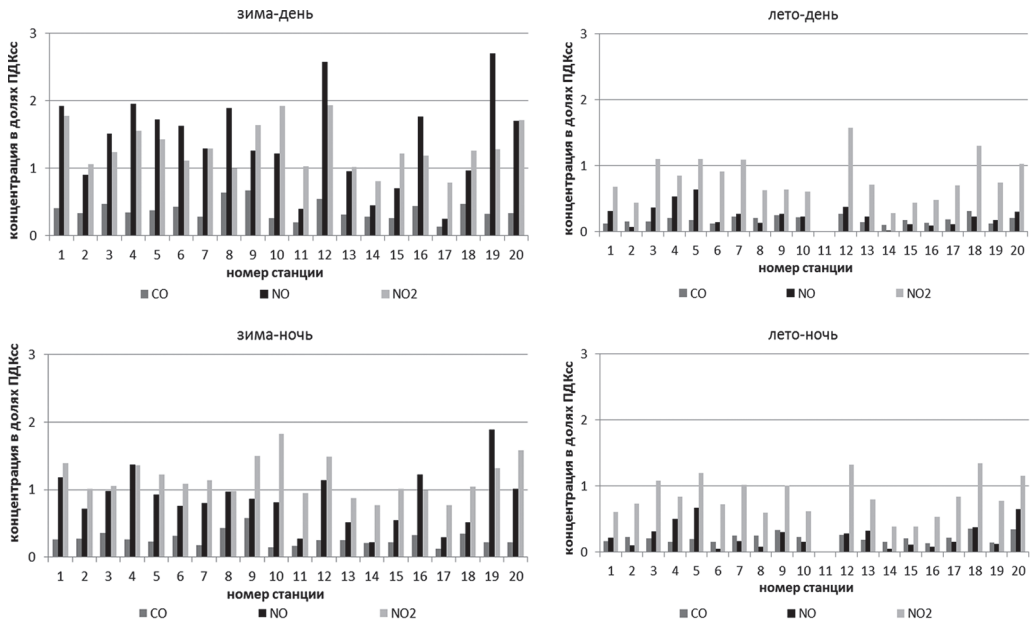


Рис. 3. Концентрации ЗВ в долях ПДК_{сс} на всех станциях

Расчет пространственных оценок концентраций загрязняющих веществ производился методом кригинга, реализованным в картографическом программном пакете Surfer 9. Кригинг является базовой моделью оценивания в геостатистике.

На рис. 4 представлены поля изолиний концентрации оксида углерода CO, осредненных за холодный интервал в дневное (а) и ночное (б) время, а также за теплый интервал в дневное (в) и ночное (г) время. Заметна существенная разница, как при смене сезона, так и при смене времени суток. Так, в холодный период в дневное время обнаружены два устойчивых максимума — на севере города и юго-востоке. Юго-восточный немного мощнее, пиковое значение составило 0,67 ПДК_{сс} (2,01 мг/м³), северный больше по площади, максимальная концентрация 0,58 ПДК_{сс} (1,74 мг/м³). Северный максимум находится в Приморском районе, юго-восточный — в Купчино, оба — за пределами промышленного центра. Наличие максимумов, видимо, обусловлено строящимся в этот период Западным скоростным диаметром. Северный максимум совпадает с участком северного сектора ЗСД, юго-восточный располагается в 7 км от южного сектора. В центре города имеется еще два локальных менее мощных пика CO со значением 0,36 ПДК_{сс} (1,1 мг/м³).

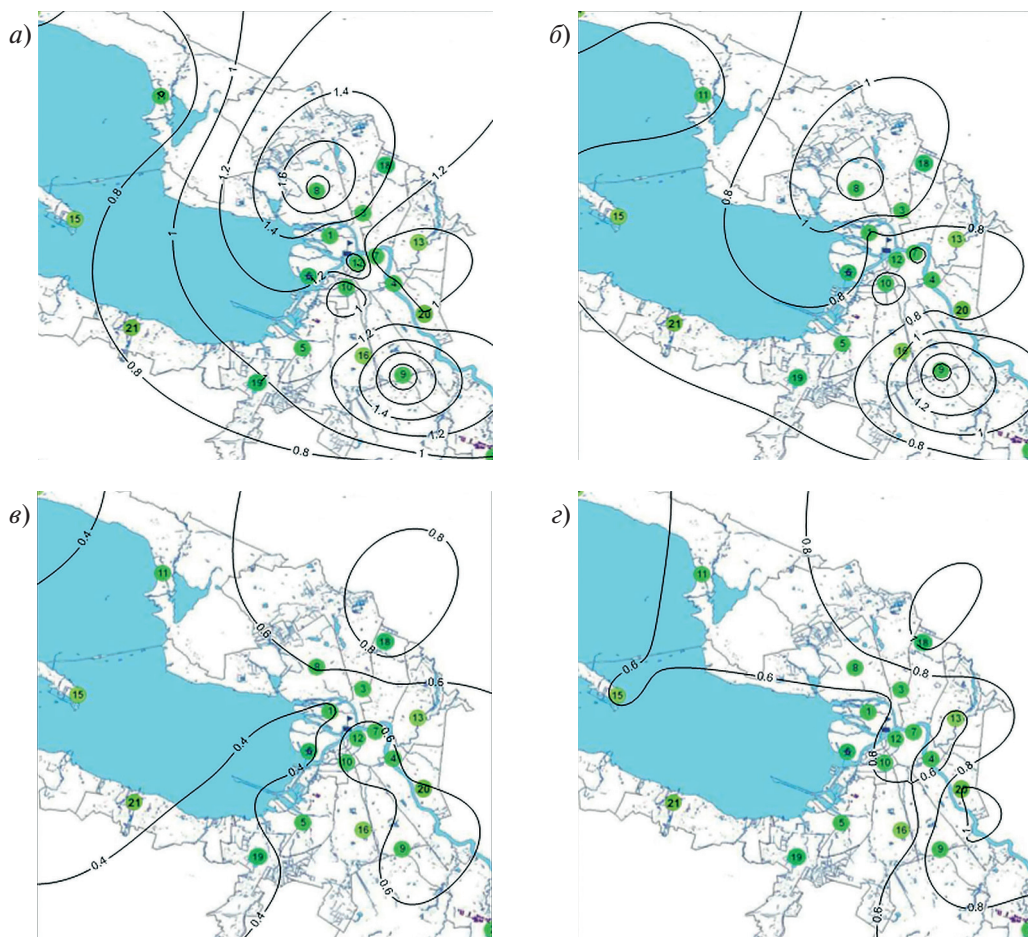


Рис. 4. Поля изолиний концентраций CO в $\text{мг}/\text{м}^3$:

а — в холодный интервал года в дневное время; *б* — в холодный интервал года в ночное время;
в — в теплый интервал года в дневное время; *г* — в теплый интервал года в ночное время

Ночью (рис. 4, *б*) положение главных максимумов концентраций остается прежним, но уменьшается значение содержания оксида углерода до 0,4 ПДК_{сс} (1,2 $\text{мг}/\text{м}^3$) в северном и 0,53 ПДК_{сс} (1,6 $\text{мг}/\text{м}^3$) — в юго-восточном.

Летом картина немного другая. Днем (рис. 4, *в*) северный максимум смещается на восток к границам города и составляет 0,3 ПДК_{сс}, юго-восточный наблюдается, но значительно менее мощный — 0,25 ПДК_{сс} (0,7 $\text{мг}/\text{м}^3$). Летом ночью максимумов практически не наблюдается, фон загрязнения более однороден, незначительное повышение до 0,3 ПДК_{сс} (1,0 $\text{мг}/\text{м}^3$) обнаруживается на восточной границе города.

Существенна разница и в распределении концентрации CO по берегам Финского залива. Если зимой понижение содержания CO происходит пропорционально

увеличению расстояния от центра города, то летом уровень СО по берегам Финского залива остается постоянным — по северному берегу значение концентрации составило 0,13 ПДК_{сс} (0,4 мг/м³), по южному — 0,16 ПДК_{сс} (0,5 мг/м³).

Графически суточная динамика поля загрязнений может быть представлена диаграммами на рис. 5. По оси абсцисс отложены средние значения концентраций ЗВ по всем станциям для одного сезона в ночное время суток, по оси ординат — в дневное. Биссектриса характеризует ось отсутствия изменений. Появление значений выше биссектрисы означает увеличение содержания ЗВ днем по сравнению с ночью. И, напротив, точки ниже биссектрисы отражают уменьшение уровня концентрации. Облако точек имеет форму эллипса, большая ось которого характеризует однородность поля концентраций в атмосфере города: с ростом дисперсии концентраций увеличивается размер этой оси. Длина меньшей оси эллипса обратна корреляции между дневными и ночными значениями: с приближением корреляции к единице эллипс превращается в линию.

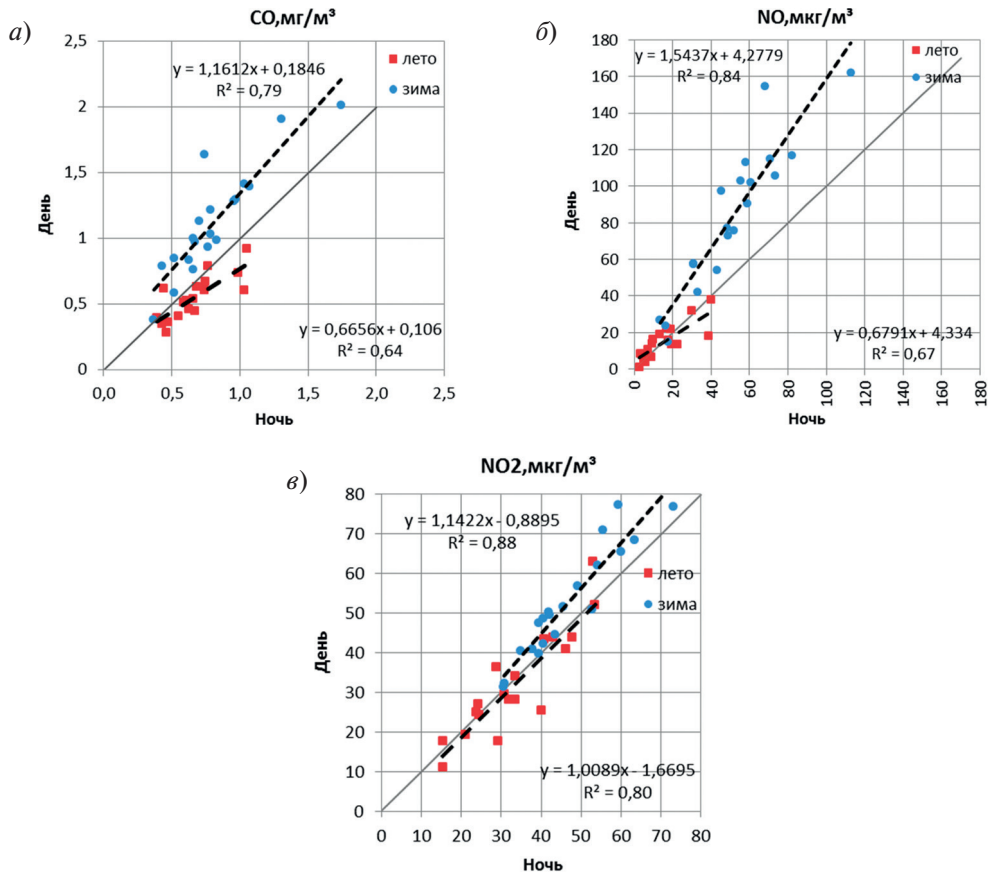


Рис. 5. Диаграммы рассеяния концентраций ЗВ в теплый и холодный интервалы года и в ночное и дневное время: СО (а); NO (б), NO₂ (в)

Как видно из рис. 5, *а*, диапазон концентраций оксида углерода в холодный интервал увеличен более чем дважды по сравнению с теплым. Поскольку все точки, относящиеся к холодному интервалу, расположены над биссектрисой, днем уровень содержания СО по сравнению с ночным увеличивается на всей территории города. Облако точек, представляющих собой концентрации в теплый интервал, локализованы под биссектрисой. Значение средней по всем станциям разницы концентраций в дневное время по сравнению с ночным можно оценить по уравнениям линий тренда, проведенным через облако точек. Уравнения аппроксимирующих прямых представлены на диаграммах рис. 5.

Аддитивная составляющая уровня загрязнений — смещение линий по оси ординат на диаграмме рис. 4, *а* составила $0,1-0,2 \text{ мг/м}^3$, что говорит об увеличении среднего уровня загрязнения по городу днем по сравнению с ночью. Это характерно как для холодного, так и для теплого периода года. Дневной рост загрязнений обусловлен, по-видимому, взаимодействием выбросов промышленных предприятий, осуществляемых преимущественно в дневное время, увеличением автомобильного трафика, солнечной радиацией. Мультипликативная составляющая прямо пропорциональна измеряемой концентрации в холодный интервал (коэффициент 1,2) и обратно пропорциональна в теплый (0,7).

Распределение оксида азота NO в атмосфере Санкт-Петербурга представлено на рис. 6. В холодный период в дневное время изолиния, равная ПДК_{сс} NO = 60 мкг/м³, ограничивает город (рис. 6, *а*), образуя практически правильную окружность. В ее границах обнаружены три максимума концентрации NO, местоположение которых не совпадает с максимумами СО. Наибольший максимум NO — 2,7 ПДК_{сс} (162 мкг/м³) — на юго-западе города в Красносельском районе. Два других со значениями 2 ПДК_{сс} и 2,6 ПДК_{сс} (120 и 154 мкг/м³) — в центральной части города.

Ночью площадь под изолинией, равной ПДК_{сс}, уменьшается и становится неправильной формы (рис. 6, *б*). Юго-западный максимум остается, но пиковое значение его сокращается до 1,8 ПДК_{сс} (113 мкг/м³).

Летом картина загрязнения резко меняется. Как ночью, так и днем в теплое время значения концентраций не превышают ПДК, поле довольно однородное без выраженных максимумов — рис. 6, *в* и *г*.

Это подтверждает диаграмма рассеяния NO, представленная на рис. 5, *б*. Размах диапазона значений концентраций NO в холодный период значительно превышает таковой в теплый. Аддитивная составляющая, характеризующая подъем среднесуточных значений уровня концентраций относительно ночных, не зависит от сезона и составляет около 4 мкг/м³.

Распределение изолиний диоксида азота NO₂ представлено на рис. 7. Обращает на себя внимание изменение формы изолинии со значением, равным ПДК_{сс} = 40 мкг/м³. В зимний период днем (рис. 7, *а*) эта изолиния ограничивает наибольшую площадь территории, охватывая повышенным загрязнением как центр города, так и периферию, включая Кронштадт. К ночи площадь области превышений ПДК_{сс} сокращается, ее форма становится неправильной, но в Кронштадте по-прежнему превышен уровень ПДК_{сс} (рис. 7, *б*). Превышения ПДК_{сс} наблюдаются как днем — до 1,9 ПДК_{сс} (77 мкг/м³), так и ночью — до 1,8 ПДК_{сс} (73 мкг/м³) в центре города. В теплое время днем наблюдаются три локальных зоны превышения ПДК_{сс} в Адмиралтейском, Калининском и

Невском районах с максимальными значениями до 1,6 ПДК_{сс} (рис. 7, в). Ночью остается одна небольшая зона в Адмиралтейском районе, изолиния ПДК_{сс} смещается на северо-восток, таким образом, область повышенных значений «уходит» из города.

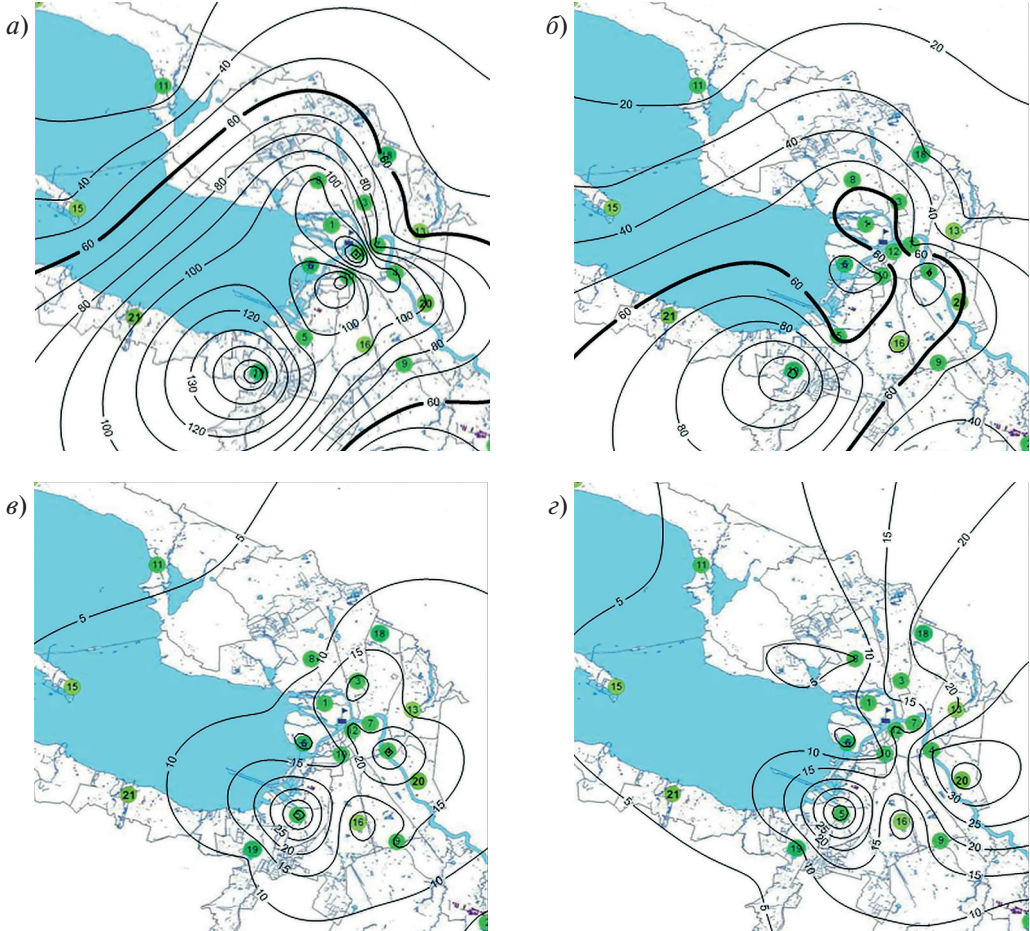


Рис. 6. Поле изолиний концентраций NO в мг/м³:
 а — в холодный период в дневное время; б — в холодный период в ночное время;
 в — в теплый период в дневное время; г — в теплый период в ночное время

Распределение NO₂ мало зависит от смены сезона и времени суток, что подтверждает диаграмма, представленная на рис. 5, в. Линии, характеризующие положение точек на диаграмме, близки к биссектрисе.

Образование оксидов азота в процессах сжигания топлива связано с окислением атмосферного азота и с окислением органических соединений азота, содержащихся в топливе. Попадая в атмосферу, оксид азота постепенно превращается в диоксид

путем взаимодействия с озоном и гидроперекисными радикалами. Таким образом, оксиды азота накапливаются в нижних слоях атмосферы. Их присутствие вызывает кислотные дожди и сказывается на последующих превращениях химически активного компонента атмосферы — кислорода.

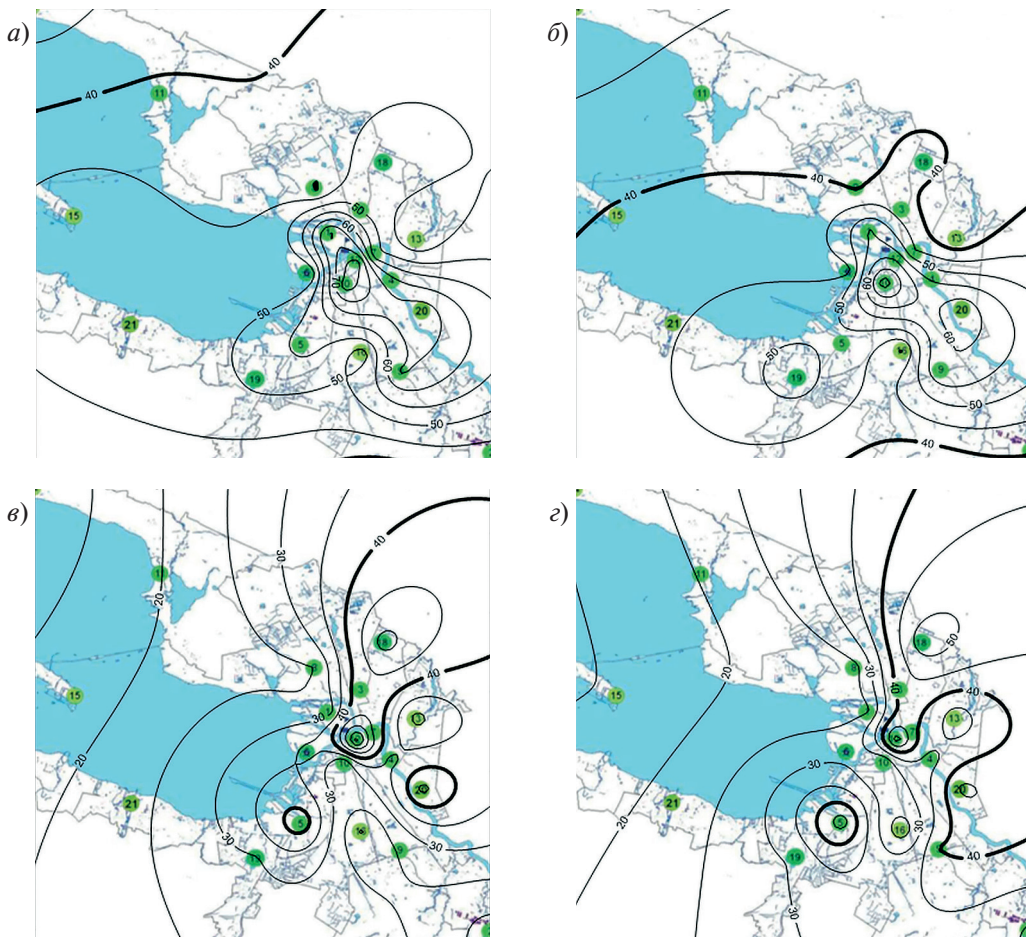


Рис. 7. Поле изолиний концентраций NO_2 в $\text{мг}/\text{м}^3$:

a — в холодный интервал года в дневное время; *б* — в холодный интервал года в ночное время;
в — в теплый интервал года в дневное время; *з* — в теплый интервал года в ночное время

Схожесть расположения максимумов оксидов азота объясняется их общей природой, а также подтверждается высокими коэффициентами корреляции между ними, представленными в табл. 1 (символом * отмечены значимые коэффициенты корреляции по уровню значимости 0,05). Из таблицы видно, что теснота связи CO с NO возрастает в дневное время при низких температурах, а с NO_2 — в теплое время года.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между ЗВ

Интервал	CO-NO	CO-NO ₂	NO-NO ₂
Зима–ночь	0,20	0,06	0,54*
Зима–день	0,53*	0,32	0,57*
Лето–ночь	0,39	0,62*	0,68*
Лето–день	0,31	0,60*	0,61*

В связи с отсутствием данных для проведения независимой валидации ошибок интерполяции, для их оценки проводилась кросс-валидация [5]. Суть данного метода состоит в разделении исходных данных на «обучающую» часть, по которой строится модель, и «проверочную», на которой оценивается качество модели путем сравнения прогноза с известными данными. Представление результатов кросс-валидации для используемой модели простого кригинга приведено на рис. 8. Рис. 8, *а* представляет диаграмму рассеяния значений оценок и измерений, рис. 8, *б* — диаграмму невязок (измерения – оценка) оцененных значений.

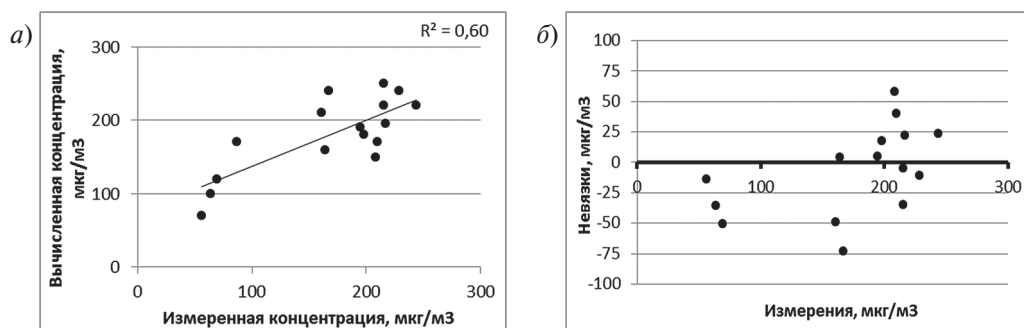


Рис. 8. Диаграмма рассеяния значений оценок и измерений концентраций NO (*а*); невязки оценки NO (*б*)

Как следует из графика на рис. 8, *а*, между оценками и измерениями наблюдается высокая корреляция, которая, однако, уменьшается в областях высоких значений концентраций ЗВ, т.е. оценка кригинга сглаживает выбросы. Наибольшие расхождения между истинными значениями и моделью обычного кригинга наблюдаются в областях пятен высокого загрязнения, вокруг которых имеется много низких значений. Такие зоны обладают высокой вариабельностью и традиционно вызывают трудности у всех линейных интерполяторов [5]. По диаграмме на рис. 8, *б* можно судить о наличии (или отсутствии) трендов в невязках.

Поскольку оценка качества прогноза исследуемых переменных в точках, где измерения не проводились, зависит от плотности станций, пространственные вариации оценки кригинга могут быть использованы в задачах оптимизации сети мониторинга.

Заключение

Проведенный пространственный анализ распределения концентраций трех загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга при низких и высоких температурах позволяет сделать следующие выводы.

Наибольшие концентрации и площади областей повышенного содержания ЗВ обнаружены в дневное время холодного интервала.

Установлено выраженное различие в распределении концентраций трех исследованных ЗВ в зависимости от сезона и времени суток; отмечено несовпадение пространственного расположения максимумов концентраций оксидов углерода, азота и диоксида азота.

Концентрации NO_2 , превышающие ПДК_{сс}, наблюдались как в холодный, так и в теплый периоды года, тогда как NO превышали уровень ПДК_{сс} только в холодный период, а содержание CO оставалось меньшим ПДК_{сс} на всем периоде исследования.

Существенное влияние на повышенный уровень загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга в зимний период оказали антициклоническая ситуация с сопутствующими слабыми ветрами и инверсиями температуры, повышенная продолжительность солнечного сияния и пониженное количество осадков по сравнению с нормой.

Локализованы максимумы концентрации ЗВ зимой в дневное время: CO в Приморском районе и Купчино; NO в Красносельском районе и центре города, NO_2 — в центре города. Повышение точности построенных полей концентраций требует увеличения количества измерений именно в этих районах, поскольку полученные максимумы представляют собой точечные выбросы высокого загрязнения с более низкими соседними значениями. В таких случаях ошибки методов интерполяции повышаются.

Литература

1. Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В. Проблема загрязнения воздуха. Крупнейшие города России // АВОК Северо-Запад, 2002, № 2(6), с. 19–21.
2. Боков В.Н., Воробьев В.Н., Серебрицкий И.А. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в мегаполисе и его связь с климатическими изменениями // Учёные записки РГГМУ, 2015, № 39, с. 55–65.
3. Воробьев В.И., Кивганов А.Ф. Специализированные прогнозы погоды. — Л.: изд. ЛГМИ, 1991.
4. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2010 году. Под ред. Д.А. Голубева, Н.Д. Сорокина. — СПб.: ООО «Сезам-Принт», 2011.
5. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Чернов С.Ю., Тимонин В.А. Элементарное введение в геостатистику. Сер. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, № 11. — М.: ВИНТИ, 1999.
6. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка влияния метеорологических параметров на концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, 2015, № 5–2, с. 299–305.
7. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге // Учёные записки РГГМУ, 2015, № 40, с. 150–159.
8. Марченко В.С., Ложкина О.В., Сорокина О.В. Постановка и результаты численных исследований возникновения чрезвычайного локального загрязнения воздуха NO_x вблизи автодорог на примере Санкт-Петербурга // Вестник СПб УГПС МЧС РФ, 2014, № 4, с. 1–7.
9. Официальный портал ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». — [Электронный ресурс] URL: <http://www.meteo.nw.ru/>