

*Е.О. Лазарева, Е.С. Попова, И.Н. Липовицкая*

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ  
НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ПРИМЕСЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА  
НАД САНКТ-ПЕТЕРБУРГОМ В 2006–2014 ГГ.**

*E.O. Lazareva, E.S. Popova, I.N. Lipovitskaya*

**THE INFLUENCE OF TEMPERATURE INVERSIONS  
ON THE CONCENTRATION OF IMPURITIES IN THE SURFACE LAYER  
OF AIR IN ST. PETERSBURG DURING THE PERIOD OF 2006–2014**

*Рассмотрено влияние явления инверсии температуры воздуха на накопление загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, а также влияние синоптических ситуаций на распространение загрязняющих веществ в воздухе. Проанализирован массив данных, содержащий информацию о комплексном параметре  $P$ , который характеризует загрязнение атмосферного воздуха по г. Санкт-Петербургу за период с 2006 по 2014 г.: годовой ход, межгодовая изменчивость.*

*Ключевые слова: атмосферный воздух, геоэкология, метеорология, синоптическая ситуация, инверсия.*

*The influence of temperature inversion on pollutants accumulation in the air was considered. The influence of synoptic situations on air pollutant distribution was considered. The database containing information about integrated «parameter  $P$ » (which characterizes air pollution) including annual course and interannual variability in the period of 2006 to 2014 was analyzed.*

*Key words: atmospheric air, geoecology, meteorology, synoptic situation, inversion.*

Одной из приоритетных геоэкологических проблем современного мира является проблема загрязнения атмосферного воздуха, наиболее явно выраженная в крупных мегаполисах. Это связано, главным образом, с чрезмерной концентрацией на сравнительно небольших территориях населения, транспорта и промышленных предприятий. Отмечается возрастание роли автотранспорта как ведущего источника загрязнения атмосферного воздуха крупных городов, о чем свидетельствует ухудшение экологического состояния воздушного бассейна городов в начале XXI в. при снижении интенсивности промышленной деятельности [8]. Для Санкт-Петербурга ухудшение экологического состояния воздушного бассейна имеет особое значение, город является крупнейшим научным и промышленным центром мирового значения, крупнейшим транспортным узлом северо-запада России. Благоприятное экологическое состояние атмосферного воздуха — залог здоровья жителей города.

Интерес к вопросу загрязнения атмосферного воздуха возник в середине прошлого века, что повлекло исследования данного направления в различных странах мира. Однако изменения современного мира, под влиянием ряда причин, обновляют перечень нерешённых проблем, что требует глубокого анализа с целью выработки мер,

направленных на их решение. Отсюда целью данного исследования является анализ особенностей временной изменчивости параметра  $P$ , характеризующего загрязнение атмосферного воздуха, для Санкт-Петербурга. Для достижения поставленной цели ставятся следующие задачи:

- рассмотреть влияние синоптических условий на распространение загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;
- рассмотреть влияние явления инверсии температуры на накопление загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города;
- обработать архивные данные комплексного параметра, характеризующего загрязнение атмосферного воздуха города;
- проанализировать годовой ход состояния загрязнения атмосферного воздуха города по комплексному параметру;
- проанализировать динамику изменений загрязнения атмосферного воздуха города по комплексному параметру.

Уровень загрязнения воздушного бассейна города определяется выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников. Среди передвижных источников загрязнения атмосферного воздуха выделяют автотранспорт, выбросы которого в Санкт-Петербурге превышают выбросы от стационарных источников и составили в 2011 г. 85 % (374,8 тыс. т загрязняющих веществ) всех антропогенных выбросов [6]. Тенденция увеличения выбросов от автотранспорта обусловлена количеством транспортных средств, пропускной способностью магистралей, техническим состоянием автотранспорта и экологическим качеством продаваемого топлива [1].

На уровень загрязнения атмосферного воздуха существенное влияние оказывают синоптические ситуации и характерные для них метеорологические условия. Так, согласно результатам исследований Л.Р. Сонькина, повышенному уровню концентраций примесей в городском воздухе способствуют следующие синоптические ситуации: малоградиентное барическое поле, антициклоническая кривизна изобар, тёплая воздушная масса, адвекция тепла в тропосфере. Циклоническая ситуация, ложбина циклона, прохождение холодного фронта, сопровождающиеся усилением ветра и осадками, в свою очередь, способствуют формированию «сравнительно чистого» атмосферного воздуха [5].

Как известно, климат Санкт-Петербурга носит преимущественно морской характер. Сезонно выделяют весенне-летний и осенне-зимний периоды года, при этом для Санкт-Петербурга характерен быстрый переход от осенне-зимних процессов к весенне-летним. В целом, осенне-зимний период характеризует активная циклоническая деятельность, сопровождающаяся увеличением проходящих через город атмосферных фронтов. Отметим, что траектория циклонов, выходящих на территорию Санкт-Петербурга (с запада, юго-запада и северо-запада), одинакова для всех сезонов года. В весенне-летний период количество и интенсивность циклонов уменьшается, а скорость их перемещения возрастает. В то же время, согласно многолетним наблюдениям на аэродромах города, возрастает повторяемость (более 50 %) антициклонов и малоградиентных барических полей. Как правило, установлению антициклона сопутствует комплекс атмосферных явлений, препятствующий рассеиванию загрязняющих веществ: слабый ветер, инверсии температуры, туманы.

Основными метеорологическими параметрами, в общем, оказывающими влияние на диффузию примесей, являются скорость и направление ветра, вертикальное распределение температуры воздуха, скорость и направление ветра, явления погоды (туманы, осадки).

Рассмотрим вышеперечисленные параметры и их внутrigодовую динамику для Санкт-Петербурга. Так, ветровой режим города характеризуется преимущественно западным, юго-западным и южным направлениями, совокупная повторяемость которых за год превышает 50 %. Ветры восточных и северных направлений наблюдаются реже. При этом западный ветер способствует очищению воздушного бассейна города, а юго-восточный и восточный, напротив, препятствуют. Для Санкт-Петербурга, в целом, средние скорости ветра составляют 2–5 м/с. В течение года, в среднем, скоростям 0–5 м/с соответствует юго-западное направление, 5–15 м/с — южное, более 15 м/с — юго-восточное, повторяемость которых минимальна и носит, преимущественно, порывистый характер. Холодный период года характеризуется усилением скорости ветра, с максимальными значениями в ноябре; в теплый период, напротив, скорости ветра ослабевают, штилевые значения преобладают в июле, августе.

Ранее выявлено формирование повышенного загрязнения воздуха при устойчивой стратификации нижнего слоя атмосферы, при наличии инверсий. Явление инверсии отмечают в случаях, когда температура воздуха нехарактерно увеличивается с высотой. Возникают инверсии под воздействием адвекции и вертикальных движений, кроме того, рельеф местности, крупные водоемы и парки создают дополнительные условия для их образования [3]. По высоте все тропосферные инверсии можно разделить на инверсии приземные и инверсии в свободной атмосфере (приподнятые). Большинство инверсий в свободной атмосфере являются инверсиями оседания. Они возникают вследствие нисходящего движения воздуха и его адиабатического нагревания. Кроме инверсий оседания в тропосфере наблюдаются фронтальные инверсии.

Инверсию температуры характеризуют высотой нижней границы; толщиной слоя, в котором наблюдается повышение температуры с высотой, и разностью температур на верхней и нижней границах инверсионного слоя — скачком температуры. Наиболее часты инверсии в пределах нижних 2 км. Инверсионный слой препятствует вертикальному перемешиванию воздуха, задерживая, таким образом, рассеивание примеси в атмосфере, что, особенно, при штилевых условиях способствует возникновению явления застоя воздуха, что обуславливает высокий уровень загрязнения воздушного бассейна. Кроме того, повышение температуры воздуха также влечёт повышение уровня загрязнения атмосферного воздуха. Увеличение числа инверсий наблюдается при антициклональной погоде; разрушаются они — при возникновении сильных ветров и циклоническом характере погоды. В годовом ходе метеопараметров в Санкт-Петербурге, согласно многолетним наблюдениям, максимальному количеству дней с инверсией соответствует максимальное количество дней со штилем — весна, лето, а минимальному — зима, осень, как показано на рис. 1 [2]. В городе, в среднем, инверсии наблюдаются ежемесячно, что иллюстрирует рис. 1, в любое время суток, чему способствует большое разнообразие физических процессов, а также физико-географические особенности расположения города. Высокая повторяемость явления приземной инверсии вызвана: преобладанием антициклонической кривизны изобар летом, адвекцией тепла в зимний период. Соотношение между видами инверсий

противоположно, явление приподнятой инверсии в теплый период характеризуется инверсиями оседания, в холодный период — фронтальными инверсиями.



Рис. 1. Годовой ход повторяемости инверсии в Санкт-Петербурге (построен авторами по многолетним данным аэрологических диаграмм) [2]

В ряде публикаций [5, 7] отмечается факт очищения атмосферы от примесей осадками. Однако эффект вымывания наблюдается лишь вне зоны прямого воздействия источников. Примеси удаляются из атмосферы не только осадками, но и облаками за счёт поглощения каплями или кристаллами. В связи с этим при низкой облачности поглощается приземная часть городской шапки, уменьшая приземную концентрацию примесей. С другой стороны, летом в облачную погоду ослаблен турбулентный обмен, в результате чего может отмечаться повышенное загрязнение воздуха, обусловленное низким выбросами. В туманах, так же как и в облаках, происходит поглощение примесей каплями. Однако эти примеси вместе с каплями остаются в приземном слое воздуха, где создают тем самым значительное скопление вредных веществ.

Необходимость осуществления постоянного экологического мониторинга атмосферного воздуха в городской среде очевидна и обоснована современными требованиями к качеству окружающей среды.

Для описания загрязнения воздуха в целом по городу, как известно, в конце прошлого века был введен комплексный параметр  $P$ , рассчитываемый согласно формуле 1 [4]:

$$P = m/n, \tag{1}$$

где  $n$  — общее количество наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных постах;  $m$  — количество наблюдений в течение этого же дня с концентрациями  $q$ , которые превышают среднесезонное значение  $q_{cp}$  более чем в 1,5 раза ( $q > 1,5q_{cp}$ ).

Таким образом, параметр  $P$  представляет собой отношение количества существенно повышенных концентраций (относительно среднего значения) к общему

числу измерений в течение дня. Кроме характеристики общего состояния загрязнения воздуха в городе, при наличии достаточного количества измерений параметр  $P$  может быть показателем городского загрязнения отдельными примесями.

Параметр  $P$  может изменяться от 0 (ни одна из концентраций не превышает  $1,5q_{cp}$ ) до 1 (все измеренные концентрации превышают  $1,5q_{cp}$ ). При этом рассматриваются три группы загрязнения воздуха [4]:

1.  $P > 0,35$  — высокое загрязнение воздуха;
2.  $0,2 < P < 0,35$  — повышенное загрязнение воздуха;
3.  $P \leq 0,2$  — относительно пониженное загрязнение воздуха.

В рамках данного исследования для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга изучены данные наблюдений за состоянием атмосферного воздуха Государственной службы наблюдений за состоянием окружающей среды, принадлежащих Федеральному государственному бюджетному учреждению «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (ФГБУ «Северо-Западное УГМС»), выраженные в виде параметра  $P$ , за период времени с 2006 по 2014 г., за сроки 01:00 и 07:00; 13:00; 19:00.

В процессе изучения полученных данных авторы из общего массива выделили случаи с  $P > 0,35$ , повторяемость которых составила около 10 %, а также случаи  $0,2 < P < 0,35$ , повторяемость которых составила около 20 %.

С целью оценки годового хода загрязнения атмосферного воздуха за период времени с 2006 по 2014 г., для случаев:  $P > 0,20$ ;  $P > 0,35$  и  $0,2 < P < 0,35$ , авторы просуммировали количество дней, приходящихся на каждый случай, для каждого месяца отдельно за 9 рассматриваемых лет. Полученные результаты представлены в графическом виде на рис. 2. Рассмотрим тенденции годового хода параметра  $P$  по Санкт-Петербургу за 2006–2014 гг.

Согласно данным графика годового параметра  $P$ , представленного на рис. 2, в течение года за период с 2006 по 2014 г. для всех трех рассматриваемых случаев максимальное количество дней с загрязнением атмосферного воздуха по параметру  $P$  приходится на июль месяц, минимальное (кроме случая  $0,2 < P < 0,35$  (апрель)) — на декабрь. Кроме того, для двух случаев ( $P > 0,20$ ;  $0,2 < P < 0,35$ ) большое количество дней с загрязнениями отмечены в октябре. Причины такого распределения загрязнения воздуха в годовом ходе объясняются закономерностями смены синоптических ситуаций и метеорологических условий, характерных для них. В частности, летний период года, как было описано ранее, характеризуется для Санкт-Петербурга преобладанием антициклонов и малоградиентных барических полей, что сопровождается ослаблением скоростей ветра, а также увеличением повторяемости его штилевых значений; ростом температуры атмосферного воздуха и увеличением повторяемости случаев инверсии, что способствует накоплению загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. В октябре усиливается повторяемость прохождения циклонов через Санкт-Петербург, однако «октябрьские» циклоны, согласно наблюдениям авторов за период с 2006 по 2014 г., характеризуются низкой, слоистой облачностью, обложными осадками, туманами адвекцией тепла в тропосфере, что также способствует накоплению загрязнения в атмосферном воздухе.

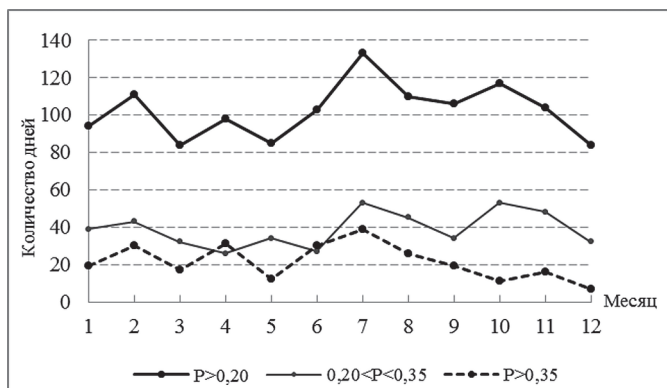


Рис. 2. Годовой ход общего количества дней с загрязнениями, нормированных на параметр  $P$  по Санкт-Петербургу, за период с 2006 по 2014 г.

Зимой формируются синоптические условия, препятствующие накоплению загрязняющих атмосферный воздух веществ, так как указанный выше период времени характеризуется усилением циклонической активности, сопровождающейся усилением ветра и обильными осадками, вымывающими загрязняющие вещества.

Совокупность общего количества дней с загрязнениями атмосферного воздуха за 12 месяцев по всем трём случаям за период времени с 2006 по 2014 г., для каждого из рассматриваемых 9 лет отражает динамику и тенденции межгодовой изменчивости загрязнения воздуха Санкт-Петербурга, что представлено иллюстрирует рис. 3.

Анализ графика (рис. 3) особенностей распределения межгодовых изменений загрязнения атмосферного воздуха показывает, что наибольшее количество дней с загрязнением воздуха, нормированным на параметр  $P$ , для всех рассматриваемых трёх случаев отмечены в 2006, 2009 и 2012 г., тогда как 2013 и 2014 г. — наименьшее.

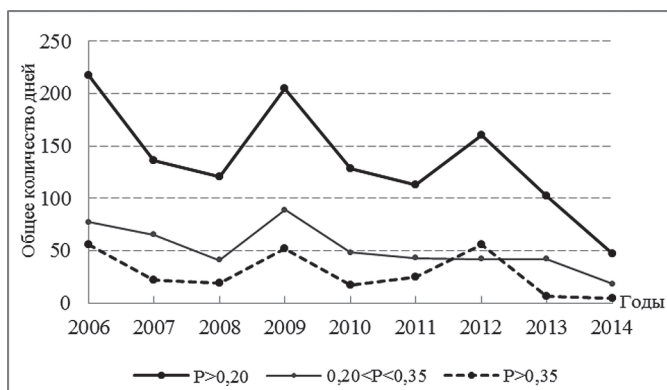


Рис. 3. Динамика общего количества дней с загрязнениями, нормированных на параметр  $P$  по Санкт-Петербургу, за период с 2006 по 2014 г.

В заключение подведём основные итоги исследования:

1. В результате изучения годового хода явления инверсии по Санкт-Петербургу выявлено, что максимальному количеству дней с инверсией соответствует максимальное количество дней со штилем — весна, лето, а минимальному — зима, осень. Кроме того, в городе, в среднем, инверсии наблюдаются ежемесячно.
2. Изучение годового хода параметра  $P$  за период с 2006 по 2014 г. по Санкт-Петербургу позволяет отметить июль как месяц с максимальным количеством дней в году с загрязнениями, декабрь — с минимальным.
3. Изучение межгодовой изменчивости параметра  $P$  за период с 2006 по 2014 г. по г. Санкт-Петербург позволяет выявить 2006, 2009 и 2012 г., как наиболее загрязнённые, и отметить резкий спад загрязнённости воздуха после 2012 г., причины чего подлежат изучению авторами, в настоящий момент.

### Литература

1. *Дмитриев А.Л., Милютин Е.О.* Влияние автотранспорта на экологическое состояние городской среды Санкт-Петербурга. // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 190–196.
2. *Лазарева Е.О., Попова Е.С., Липовицкая И.Н.* Синоптические условия распространения антропогенных примесей в воздухе г. Санкт-Петербург (на примере 1980–2012 гг.). // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. Сборник докладов IX международной конференции аспирантов и студентов. Под ред. К.Н. Маренич. — Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2015, с. 123–125.
3. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Сб. докладов на международной симпозиуме в Ленинграде, июль 1968 г. Под ред. М.Е. Берлянда. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 51 с.
4. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 92 с.
5. *Сонькин Л.Р.* Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 223 с.
6. Состояние загрязнения атмосферного воздуха городов на территории деятельности ФГБУ «Северо-Западное УГМС» за 2012 г. Под ред. А.А. Луковской; ФГБУ «Северо-Западное УГМС». — СПб.: 2013. — 161 с.
7. *Швер Ц.А.* Климат Ленинграда. Под ред. Ц.А. Швера, Е.В. Алтыкиса, Л.С. Евтеевой. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 251 с.
8. *Morrison J.* Sustainable development. — UK: Profile Books, 2002. — 370 p.