

7 Загрязнение атмосферы, видимость, дымки, смоги и туманы в больших городах

Загрязнение атмосферы городов всевозможными примесями искусственного происхождения отмечалось уже в древности. «Я почувствовал перемену в настроении, как только покинул смрадный воздух Рима, воняющий дымными печами, которые изрыгают отвратительный чад и сажу» — писал известный философ Сенека еще в первом веке н. э. Начиная со средних веков печальную известность получил Лондон. И хотя было издано несколько указов королей, запрещающих сжигать уголь в каминах и домовых печах, воздушный бассейн Лондона продолжал загрязняться: согласно Дж. Эвелину (1661 г.), «... в то время как во всех других местах воздух прозрачен и чист, в Лондоне висит такое облако серы, что Солнце едва проникает в город». Столь же значительным уже несколько столетий тому назад было загрязнение атмосферы другого крупного европейского города — Парижа.

Однако особенно острый характер проблема загрязнения атмосферы, а в общем случае — ухудшения качества природной среды, приобрела в текущем столетии — по мере развития промышленности, сокращения лесных массивов, увеличения пахотных земель, широкого использования минеральных удобрений и химических веществ для борьбы с сорняками, все увеличивающихся объемов добываемого и сжигаемого минерального топлива (уголь, нефть, газ) и др.

Участь Лондона и Парижа, начиная со второй половины прошлого века и в текущем столетии, разделили многие крупные города на всех материках планеты.

Все атмосферные примеси (аэрозоли) принято делить на *естественные* и *искусственные*. К первым относятся: примеси, поступающие в атмосферу при извержении вулканов и во время лесных пожаров; пыль, поднятая ветром с земной поверхности (особенно при пыльных бурях); продукты выветривания горных пород и испарения морских брызг; космическая пыль и др.

Источниками примесей искусственного (антропогенного) происхождения служат промышленность (фабрики, заводы), энергетические и отопительные системы, транспорт (прежде всего, автомобильный), а также сельскохозяйственное производство. Отметим, что в крупных городах свыше 50 % всех загрязняющих веществ приходится на долю автотранспорта. Общее число веществ, выбрасываемых в атмосферу этими источниками, исчисляется несколькими сотнями. Все примеси подразделяются на *газообразные* (окись углерода CO , двуокись, серы или сернистый газ SO_2 , окислы азота NO_x и др.), *жидкие* (сернистая кислота, бензол, ацетон, ртуть и др.) и *твердые* (пыль, сажа, углеводороды, свинец и

др.). К загрязнителям атмосферы относятся также электромагнитные излучения (испускаемые радиоактивными веществами) и шумы.

Поскольку все загрязняющие атмосферу (равно как и гидросферу) вещества вредно действуют на человека (ухудшают его здоровье), а также на животный и растительный мир, то для большинства таких веществ установлены *предельно допустимые концентрации* (ПДК).

Над каждым крупным городом (с населением в несколько сотен тысяч и, тем более, миллионов человек) сформировалось *облако примесей*, хорошо заметное при наблюдении с самолета, космического корабля или даже с горы (возвышенности) в окрестностях города.

Нельзя не отметить следующего любопытного факта. Хорошо известно, что с космических кораблей наземные объекты (дороги, речки, здания и др.) визуально обнаруживаются и видны лучше, чем с самолета, находящегося в средней или верхней тропосфере. Объясняется это отсутствием в космосе рассеянного (дополнительного) света, который на малых и средних высотах (в пределах тропосферы), поступая в глаз наблюдателя, уменьшает яркий контраст между наблюдаемым объектом и фоном. И, тем не менее, ни одному космонавту не удалось наблюдать из космоса какие-либо объекты внутри большого города — все скрывает вишащее над городом облако примесей, имеющее на фотографиях, сделанных с космических кораблей, вид размытого пятна.

На распространение примесей, поступающих в атмосферу из различных источников в городе, большое влияние оказывают метеорологические условия. Совокупность метеорологических факторов, оказывающих влияние на концентрацию примесей, распределение ее по высоте и горизонтали, а также изменение во времени, принято называть *потенциалом загрязнения атмосферы* (ПЗА).

Элементами ПЗА служат скорость и направление ветра, температура воздуха, их распределение по высоте (динамическая и термическая стратификация), влажность воздуха, осадки и облачность, поле давления (барические системы) и др.

При заданной мощности выбросов загрязняющих веществ (массе примесей, поступающих в атмосферу за единицу времени из всех источников) концентрация примесей (уровни загрязнения) в городе существенно зависит от скорости ветра и турбулентного обмена. Чем больше скорость ветра и интенсивнее турбулентный обмен, тем больше выносятся (выдуваются) примесей из города и переносится из приземного слоя (где сосредоточены источники примесей) в более высокие слои (вертикальный обмен) и в окрестности города (горизонтальный обмен). Повышению уровней загрязнения в приземном слое города способствует слабый ветер, инверсионная термическая стратификация (резко ослабляющая, наряду со скоростью ветра, турбулентный обмен по вертикали и,

следовательно, перенос примесей в более высокие слои), отсутствие осадков и облаков (которые вымывают примеси — процесс, называемый *самоочищением атмосферы*), антициклоническое барическое поле (в котором, как правило, и ветер слабый, и стратификация инверсионная).

Поскольку источники примесей сосредоточены вблизи земной поверхности (не выше 200—300 м, а подавляющая часть — ниже 20—50 м), то с увеличением высоты концентрация примесей над городом, как правило, убывает. При высоких уровнях загрязнения вблизи земной поверхности концентрация примесей убывает с высотой быстрее, чем при пониженных. Вследствие этого концентрация примесей на высоте в несколько сотен метров (в верхней части пограничного слоя) и толщина облака примесей при слабом ветре (до 2—3 м/с) и инверсионной стратификации меньше, чем при сильном ветре (свыше 5—8 м/с) и отсутствии инверсии температуры (толщина облака примесей составляет 400—500 м в первом и увеличивается до 2—3 км во втором случае).

В горизонтальной плоскости максимальные значения (q_{\max}) концентрации примесей (q) наблюдаются, как правило, вблизи центральной части города, а по направлению к окраинам q убывает, более медленно при сильно развитом турбулентном обмене (сильном ветре) и более быстро при слабом ветре. По сравнению с q_{\max} концентрация убывает в 100 раз на расстоянии 40—50 км от центра города при слабом ветре (когда q_{\max} велика) и на расстоянии 80—100 км при сильном ветре (когда q_{\max} понижена). Изолинии концентрации ($q = \text{const}$), осредненной за значительные интервалы времени (декада, месяц, сезон), представляют собой замкнутые кривые, которые смещаются (по сравнению со средним положением) в подветренную сторону города. Однако даже при значительном осреднении и, тем более, по данным наблюдений за конкретный срок поле q неоднородно: наряду с основным максимумом (в горизонтальной плоскости), как правило, отмечается несколько вторичных максимумов q , отражающих влияние повышенных выбросов из отдельных одиночных или групповых источников примесей.

Видимость и дымки. Загрязнение атмосферы городов примесями антропогенного происхождения сопровождается снижением дальности видимости (S_M), ростом повторяемости дымок ($1 \text{ км} \leq S_M \leq 10 \text{ км}$) и уменьшением состояний погоды с хорошей видимостью ($S_M > 10 \text{ км}$) по сравнению с окружающей город местностью. Так, зимой в Ленинграде и в пунктах, удаленных от него на 20—80 км, повторяемость (P_1) состояний атмосферы с $S_M > 10 \text{ км}$ и повторяемость (P_2) дымок следующая:

Пункт	Ленинград	Воейково	Сосново	Белогорка
P_1 %	32	54	64	62
P_2 %	67	43	31	35

Таким образом, повторяемость дымок в Ленинграде примерно в 2 раза больше, чем в Сосново и Белогорке, удаленных от него на 70—80 км, и в 1,5 раза больше, чем в Воейково, расположенном всего лишь в 20 км от центра Ленинграда (естественно, что в Воейково сказывается влияние примесей, распространяющихся из Ленинграда).

Близкие к этим значениям P_1 и P_2 получены по данным наблюдений в других крупных городах СССР.

Смоги. Одной из разновидностей дымок служит фотохимический смог. Отличительной особенностью смога (добавлять при этом прилагательное «фотохимический» вовсе не обязательно) служит коричневатый оттенок, который придают ему окислы азота, входящие в состав пероксилацетилнитрата (ПАН)—главной составляющей смога. В свою очередь ПАН образуется при воздействии солнечной радиации (прежде всего, ультрафиолетовой и фиолетовой) на углеводороды и окислы азота, которые, в частности, выбрасывают двигатели внутреннего сгорания. В отличие от дымок (цвет которых, как правило, серый или сине-голубой) относительная влажность в смогах, как правило, невысокая (по этому признаку смоги ближе не к дымкам, а к мгле—явлению понижения видимости под влиянием твердых слабообводненных примесей, например, образующихся во время пожаров).

Дальность видимости в смогах изменяется в широких пределах, однако, как правило, она меньше 10 км. Поскольку в образовании ПАН определяющая роль принадлежит солнечной радиации, то смоги наблюдаются преимущественно в городах, расположенных в низких широтах (например, в Лос-Анджелесе свыше 200 дней в году отмечаются смоги; велика повторяемость смогов в других городах США, а также в городах Мексики, Японии, Турции, Франции, Испании, Великобритании и других стран). Смоги оказывают особенно вредное влияние на здоровье людей, вызывая заболевание глаз, дыхательных путей (хронические бронхиты, эмфизема легких, астма) и др. При конденсации ПАН выпадает на земную поверхность в виде клейкой жидкости, губительно действующей на растительный мир.

Туманы, дальность видимости в которых меньше 1 км ($S_m < 1$ км), как показали исследования последних лет, образуются в большом городе значительно реже (в 2—3 раза), чем в его окрестностях. По многолетним данным среднее годовое число дней с туманом в центре Москвы равно 20, в Клину—36, Дмитрове—37, Загорске—49; примерно такое же соотношение среднего годового числа дней с туманом в Ленинграде (оно равно 29) и его окрестностях (Воейково—64, Токсово—67, Волосово—68, Петрокрепость—46). Для Ленинграда и окрестностей дополнительно определены общая продолжительность (t^*) тумана за зимы 1970—

1974 г. и вероятность (P) наблюдения его (P — отношение t^* ко всему периоду наблюдения):

Пункт	Ленинград	Воейково	Сосново	Белогорка
t^* ч.	115	319	443	265
P %	1,1	3,0	4,1	2,4

Видно, что и по этим (инструментальным) наблюдениям вероятность образования и продолжительность туманов в Ленинграде меньше в 2 и более раз, чем в окрестностях.

Однако до недавнего времени было распространено мнение (нашедшее отражение в монографической и учебной литературе) о более частом образовании туманов в городах по сравнению с окрестностями. В качестве причины указывались ядра конденсации, которых в городах действительно больше, чем вне их (хотя их всюду вполне достаточно, чтобы могла начаться конденсация водяного пара еще до достижения насыщения). Определяющую роль в уменьшении повторяемости туманов в городах играет рассматриваемое ниже повышение температуры воздуха в них по сравнению с окрестностями. Выпишем формулы для относительной влажности воздуха (f) в окрестностях $f_{ок} = e_{ок}/E(T_{ок})$ и в городе $f_{гор} = e_{гор}/E(T_{гор})$, где $e_{ок}$ и $e_{гор}$ — давление водяного пара, $T_{ок}$ и $T_{гор}$ — температура воздуха в окрестностях и городе соответственно.

Пусть в некоторый момент времени под влиянием общих для данного района метеорологических условий в окрестностях воздух достиг состояния насыщения и началось образование тумана: $e_{ок} = E(T_{ок})$, $f_{ок} = 100\%$. Поскольку под влиянием горизонтального перемешивания давление водяного пара в городе ($e_{гор}$) близко к $e_{ок}$: $e_{гор} \approx e_{ок} = E(T_{ок})$, то относительная влажность в городе

$$f_{гор} \approx E(T_{ок})/E(T_{гор})$$

в момент начала образования тумана в окрестностях будет меньше 100%. Полагая $T_{гор} = T_{ок} + \Delta T$, по последней формуле получаем следующие значения $f_{гор}$ при $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ (соответственно $f_{гор1}$ и $f_{гор2}$):

$T_{ок}$ °C	-20	-10	0	10
$f_{гор1}$ %	93	92	93	94
$f_{гор2}$ %	84	85	87	88

Поскольку $f_{гор}$ существенно меньше 100%, туман в городе не может начать формироваться в то время как в окрестностях он уже образовался. Для возникновения тумана в городе температура $T_{ок}$ должна упасть значительно ниже точки росы. При этом в окрестностях образуется сильный (большой водности) туман, в городе же — умеренный или даже слабый. Рассеиваются в городе также прежде всего слабые туманы.

Температура воздуха. Метеорологические условия, как показано выше, оказывают большое влияние на уровни загрязнения атмосферы больших городов. Однако сформировавшееся облако примесей и измененные свойства земной поверхности в городе оказывают существенное обратное влияние на поля метеовеличин.

Еще в начале прошлого века было отмечено, что в городах по сравнению с окрестностями повышается температура воздуха. Среднее значение введенной выше разности $\Delta T = T_{\text{гор}} - T_{\text{ок}}$ в городах с населением в несколько миллионов человек составляет 1—

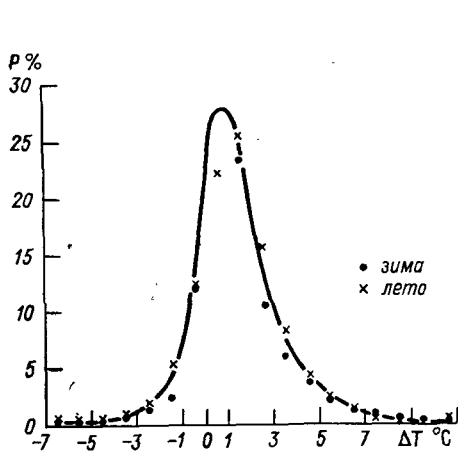


Рис. 22.17. Плотность распределения разности ΔT . Ленинград, 1970—1974 гг.

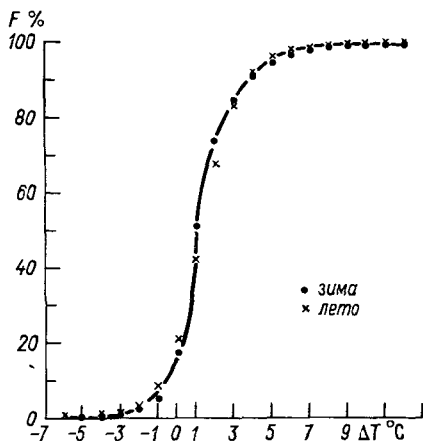


Рис. 22.18. Функция распределения разности ΔT . Ленинград, 1970—1974 гг.

2°C . Однако следует иметь в виду, что разность ΔT изменяется в очень широких пределах. Для Ленинграда впервые построены плотность (P) и функция (F) распределения ΔT (рис. 22.17 и 22.18). Согласно этим данным, ΔT изменяется от -9 до 16°C зимой (модальное значение P , равное 34 % на 1°C , приходится на интервал $0-1^\circ\text{C}$) и от -10 до 11°C летом (модальное значение P , равное 26 % на 1°C , приходится на $1-2^\circ\text{C}$). В 83 % случаев зимой и в 80 % летом город теплее окрестностей ($\Delta T \geq 0$), однако в 17 % зимой и в 20 % летом температура воздуха в городе ниже, чем в окрестностях ($\Delta T < 0$).

Разность ΔT в среднем ночью значительно (летом — примерно в 5 раз, зимой — в 1,5 раза) больше, чем днем.

Существенное влияние на ΔT оказывает облачность и скорость ветра: с ростом их ΔT уменьшается; при сплошной низкой облачности или скорости ветра больше $10-12$ м/с ΔT близко к нулю.

В горизонтальной плоскости изолинии осредненной (за декаду,

месяц, сезон) разности ΔT представляют некоторые замкнутые кривые, при этом максимум ΔT наблюдается вблизи центра города. По этой причине нередко область повышенных температур в городе называют островом тепла. По наблюдениям за конкретный срок (или осреднении за небольшой интервал времени) распределение ΔT более разнообразно и неоднородно: наряду с основным максимумом отмечается несколько вторичных максимумов ΔT .

В городе по сравнению с окрестностями существенно изменилось соотношение между приземными и приподнятыми инверсиями температуры: в городе преобладают приподнятые, а в окрестностях — приземные инверсии. В Москве (Останкинская телебашня) в среднем за год на долю приподнятых инверсий приходится 44 %, на долю приземных — 13 % от общего числа наблюдений; в Обнинске (высотная метеомачта) соотношение почти обратное: повторяемость приподнятых инверсий — 15 %; приземных — 38 %.

С повышением температуры связано увеличение безморозного периода в городах.

В городе по сравнению с окрестностями существенно изменились все составляющие радиационного и теплового балансов земной поверхности. В крупных городах Западной Европы освещенность земной поверхности и поток суммарной солнечной радиации ослаблены (по сравнению с сельской местностью) на 30—35 % при малых высотах Солнца и на 15—20 % — при больших. Особенно резко уменьшается поток ультрафиолетовой радиации (его доля в общем потоке составляет 0,3 % в центре и 3 % в пригородах Парижа).

В Ленинграде по сравнению с окрестностями радиационные характеристики земной поверхности уменьшены на следующие значения (в %):

Сезон	Зима	Лето
Поток прямой радиации	40—55	3—5
Поток суммарной радиации	25—35	6—7
Эффективное излучение	10	15
Альbedo	14—16	1—4

Потоки прямой солнечной радиации ослаблены в городе вследствие поглощения ее облаком примесей. Поскольку примеси поглощают и излучают инфракрасную радиацию, то встречное излучение атмосферы в городе больше, а эффективное излучение земной поверхности меньше, чем в окрестностях. Альbedo города изменяется как под влиянием застройки, асфальтирования улиц (можно отметить эффект многократного отражения потока от зданий), изменения растительного покрова, так и вследствие загрязнения снежного покрова и других поверхностей сажей, резко снижающей альbedo снега и способствующей более раннему его

таянию (по этой причине альбедо в марте и апреле в Ленинграде, где снега в эти месяцы практически уже нет, на 25—30 % меньше, чем в окрестностях).

Радиационный баланс земной поверхности в Ленинграде на 15—20 % больше, чем в окрестностях зимой и весной, и практически не отличается от баланса в окрестностях летом и осенью.

Кроме радиации, на термический режим города влияют турбулентные потоки явного и скрытого тепла, поток тепла в почву, а также адвективный и конвективный притоки тепла и водяного пара. Сведения об этих потоках и притоках более скудны и малочисленны, чем о радиационных характеристиках. Можно лишь отметить, что потоки скрытого тепла (затраты тепла на испарение) существенно различны в городе (где, с одной стороны осадки быстро стекают в люки, а, с другой, практикуется полив улиц) и в окрестностях. Так, в районе города Колумбии (США) в один из летних безоблачных дней при слабом ветре (до 3 м/с) поток скрытого тепла составлял $2,04 \text{ Вт/м}^2$ в окрестностях и только $0,01 \text{ Вт/м}^2$ в самом городе. Столь же различными в этом районе оказались и потоки тепла в почву: $1,67 \text{ Вт/м}^2$ — в окрестностях и $4,53 \text{ Вт/м}^2$ — в городе.

Приведенные опытные данные и результаты численного моделирования метеорологического режима городов (наиболее далеко продвинутого вперед вперед акад. Г. И. Марчуком и его учениками) показывают, что на климат города (в частности, на разность температур ΔT , воздушные течения, условия образования туманов, вертикальные профили метеовеличин и др.) оказывают влияние многие факторы, изменяющиеся к тому же в широких пределах. Вследствие этого наблюдается исключительно большое разнообразие характеристик климата города и даже отдельных его частей (например, можно указать, что изменяется в широких пределах разность температур воздуха ΔT не только в городе и его окрестностях, но и в различных районах города; хорошо известен также пятнистый характер туманов и осадков).

Однако из тех же данных следует вывод о преобладающей роли геофизических факторов (потоков радиации, явного и скрытого тепла) в формировании особенностей метеорологического режима города (в частности, разности ΔT). Вклад прямых антропогенных выбросов тепла (промышленностью, энергоустановками, транспортом) составляет, согласно оценкам, во всяком случае не больше 10 %.

В заключение отметим, что в городе по сравнению с окрестностями под влиянием застройки (способствующей увеличению параметра шероховатости до 10^1 — 10^2 см по сравнению с 10^{-2} — 10^0 см в открытой местности) ослаблена (на 50—85 %) скорость ветра.