

В.С. Комаров, С.А. Барина, Ю.Л. Матвеев

Изменение метеорологического режима городов Сибири под влиянием антропогенных факторов

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Российский государственный гидрометеорологический институт, г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 28.02.2001 г.

На основе данных 8-срочных ежедневных метеорологических наблюдений (за 1981–1985 гг.) в одном из крупных городов Сибири (Кемерове) и в нескольких пунктах, удаленных от него на несколько десятков километров, исследовано влияние антропогенных факторов на поля температуры и влажности воздуха, а также на образование туманов в большом городе. Тесная статистическая связь между отклонениями температуры и давления водяного пара (коэффициенты корреляции, как правило, не меньше 0,60÷0,70) и слабая связь (коэффициенты корреляции не превышают 0,05÷0,10) между температурой и концентрацией загрязняющих веществ (таких, как СО, NO₂, аммиак, пыль) позволяют предположить, что в формировании острова тепла в крупном городе определяющую роль играют изменение содержания антропогенного водяного пара и обусловленный им парниковый эффект. Более высокая температура способствует уменьшению повторяемости туманов в городе по сравнению с его окрестностями.

В последние десятилетия ученые Сибирского отделения Российской академии наук, а также исследователи Федеральной гидрометеорологической службы уделяют особое внимание изучению проблем экологии Сибири. Из новейших работ назовем здесь лишь специальные тематические выпуски журнала «Оптика атмосферы и океана» [1–3], а также некоторые монографии [4–6].

Как уже указывалось в [7, 8], воздушный бассейн крупных городов и промышленных центров отличается от окружающей его среды не только высокими уровнями загрязнения, но и существенными отклонениями в полях температуры и влажности воздуха, в образовании туманов, дымок и осадков, не говоря уже о потоках радиации, скорости ветра и т.п.

Отклонения температуры и влажности воздуха в крупном городе от их значений в окружающей (невозмущенной) среде оказывают значительное влияние на хозяйственную деятельность и здоровье человека. Известно, что повышение температуры воздуха в городе только на один градус увеличивает вероятность обострения сердечно-сосудистых болезней в несколько раз. Особенно велико влияние на хозяйственную деятельность человека явлений, обусловленных конденсацией водяного пара, – дымок, туманов и различных видов осадков.

Связанное с этими явлениями ухудшение дальности видимости оказывает существенное влияние на работу всех видов транспорта – авиационного, автомобильного, речного, морского. Влажность и осадки – важнейшие факторы, от которых зависят состояние и долговечность жилищ, дорог, а также непосредственно здоровье человека (резкое увеличение травматизма при гололеде). Наиболее детально исследован метеорологический режим С.-Петербурга и его окрестностей [8, 9].

Представляет интерес распространить методику, результаты и закономерности, установленные для северо-запада России, на другие районы и показать, насколько общими являются эти закономерности.

Ниже выполнен анализ данных наблюдений за 1981–1985 гг. в Кемерове (Кем.) – городе с населением свыше 700 тыс. человек и развитыми промышленностью и транспортом. С ним сравниваются характеристики метеорологического режима в двух поселках: Барзас (Б) и Топки (Т), удаленных от Кемерова соответственно на 100 км на юго-восток и 45 км на северо-запад. Состояние атмосферы в этих поселках практически не отличается от естественного, не подвергнутого влиянию антропогенных факторов среды.

Температура и влажность воздуха

Процессы, под влиянием которых формируются особенности метеорологического режима большого города, относятся к числу мезомасштабных. С целью исключения влияния процессов синоптического и более крупного масштаба анализируются не сами по себе температура T , давление водяного пара e и относительная влажность f , а разность этих величин:

$$\Delta T_i = T_{\text{Кем.}} - T_i, \quad \Delta e_i = e_{\text{Кем.}} - e_i, \quad \Delta f_i = f_{\text{Кем.}} - f_i,$$

где $T_{\text{Кем.}}$, $e_{\text{Кем.}}$, $f_{\text{Кем.}}$ – значения T , e , f в Кемерове; T_i , e_i , f_i – значения в Барзасе ($i = 1$) и Топках ($i = 2$).

Согласно данным табл. 1 температура воздуха в Кемерове как зимой, так и летом выше, чем в окружающей его естественной среде. Средние месячные значения разности ΔT заключены между 0,9 и 2,2 °С зимой и между 1,2 и 2,4 °С летом. В городе более значительно содержание водяного пара: по средним месячным данным давление пара в Кемерове больше, чем в Барзасе и Топках (от 0,1 до 0,9 гПа зимой и от 1,2 до 2,6 гПа летом).

Таблица 1

Средние месячные и сезонные значения разностей температуры (ΔT , °С), давления водяного пара (Δe , гПа) и относительной влажности (Δf , %)

Разность температур	Декабрь	Январь	Февраль	Зима	Июнь	Июль	Август	Лето
ΔT_1	2,2	0,9	1,3	1,5	2,4	1,5	2,4	2,1
ΔT_2	2,1	1,2	1,7	1,7	2,0	1,2	1,6	1,6
Δe_1	0,2	0,9	0,1	0,4	2,5	1,2	1,7	1,8
Δe_2	0,2	0,1	0,1	0,1	1,2	2,6	2,0	1,9
Δf_1	-5	-3	-3	-4	-6	-4	-3	-4
Δf_2	-4	-2	-2	-3	-7	-3	-2	-4

При сжигании всех видов топлива (уголь, нефть, природный газ, дрова), наряду с диоксидом (CO_2) и оксидом (СО) углерода, другими газообразными и твердыми примесями, образуется большое количество водяного пара (так, например, при сгорании 1 кг бензина образуется 1,3 кг H_2O , а 1 кг природного газа – 1,2 H_2O [9]). Естественно, что выброшенный в атмосферу водяной пар увеличивает его содержание в городе по сравнению с сельской местностью. Вследствие этого все значения $\Delta e > 0$.

Поскольку отрицательные Δe отсутствуют, то другой фактор – различие в характере подстилающей поверхности и порождаемая им разность в скорости испарения – в районе Кемерово не играет столь значительной роли, как, например, в С.-Петербурге [9], где в дневное время летом могут наблюдаться $\Delta e < 0$.

Относительная влажность $f = e/E(T)$ зависит не только от давления водяного пара e , но и от температуры T . Поэтому с ростом T давление насыщенного пара $E(T)$ увеличивается, а f уменьшается. Из табл. 1 следует, что увеличение температуры воздуха оказывает на относительную влажность f более сильное влияние, чем рост давления водяного пара e , причем значения f в Кемерово на несколько процентов меньше, чем в Барзасе и Топках.

Вопрос о повышении температуры воздуха в городе по сравнению с окружающей его местностью был исследован более детально по данным Кемерово и поселка Новостройка, удаленном от центра города на 20 км к югу. По наблюдениям в 9, 15 и 21 ч местного времени за 1977 г. определены не только повторяемость, средние значения и среднеквадратические отклонения, но и построены функции распределения $\Delta T = T_{\text{Кем.}} - T_{\text{Нов.}}$ и $\Delta e = e_{\text{Кем.}} - e_{\text{Нов.}}$. Не останавливаясь на анализе этих характеристик, в целом подтверждающих ранее установленные закономерности для европейской части России [9], используем их для оценки роли различных факторов в формировании острова тепла в больших городах.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции $r_{\Delta T, \Delta e}$ между разностями ΔT и Δe , а также объем использованной выборки N . Эти коэффициенты близки к тем, что были получены для разностей ΔT и Δe между С.-Петербургом и его окрестностями: согласно [9] сезонные значения $r_{\Delta T, \Delta e}$ в различные годы (с 1975 по 1980) колеблются между 0,45 и 0,75 зимой днем и ночью и между 0,27 и 0,63 в ночное время

летом. В дневные часы летом, за счет сильного различия в скоростях испарения (перекрывающего влияние антропогенных выбросов водяного пара), значения коэффициентов корреляции $r_{\Delta T, \Delta e}$ существенно меньше, чем ночью (вплоть до появления $r < 0$).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между разностями ΔT и Δe . Кемерово – Новостройка. 1997 г.

Коэффициент корреляции	Весна	Лето	Осень	Зима
$r_{\Delta T, \Delta e}$	0,37	0,59	0,58	0,62
N	213	229	227	212

Для района Кемерово оценить значения коэффициентов корреляции $r_{\Delta T, \Delta e}$ для дня и ночи не представилось возможным (из-за отсутствия наблюдений в Новостройке ночью). Однако сезонные различия в значениях коэффициентов корреляции $r_{\Delta T, \Delta e}$ проявились и здесь: весной величины $r_{\Delta T, \Delta e}$ существенно меньше, чем в другие сезоны года. Воспользовавшись известной формулой $\sigma_r = (1 - r^2)/\sqrt{N}$, получаем следующую оценку погрешностей расчета коэффициентов корреляции r , приведенных в табл. 2: $0,04 < \sigma_r < 0,06$.

Поскольку наряду с водяным паром эффективную радиацию поглощают и другие газообразные и твердые примеси, выбрасываемые в атмосферу города, то представляет интерес оценить роль этих примесей в повышении температуры в городе. К сожалению, в нашем распоряжении были данные о концентрациях лишь некоторых примесей (CO , NO_2 , NH_3 и пыль), хотя на эффективную радиацию влияют также и другие газообразные примеси (например, такие как CO_2 , O_3 , NO , N_2O , CH_4).

По данным измерений концентрации q имеющихся примесей, проведенных в 1997 г., выполнен расчет сезонных коэффициентов корреляции $r_{\Delta T, q}$ между разностью $\Delta T = T_{\text{Кем.}} - T_{\text{Нов.}}$ и концентрацией q загрязняющих веществ в Кемерово (табл. 3).

Таблица 3

Сезонные коэффициенты корреляции $r_{\Delta T, q}$ между разностями температуры ($\Delta T = T_{\text{Кем.}} - T_{\text{Нов.}}$) и концентрацией q примесей в Кемерово (объемы выборок – от 133 до 228)

Примесь	Весна	Лето	Осень	Зима
Оксид углерода	-0,07	0,07	-0,08	0,01
Диоксид азота	0,02	0,05	0,05	0,03
Аммиак	-0,07	0,19	-0,08	0,04
Пыль	-0,27	0,03	-0,07	0,02

Сравнение табл. 2 и 3 показывает, что вклад поглощения эффективной радиации в изменение ΔT всеми взятыми примесями ничтожно мал по сравнению с вкладом водяного пара: большинство значений коэффициента корреляции $r_{\Delta T, q}$ на один-два порядка величины меньше значений $r_{\Delta T, \Delta e}$ (лишь для аммиака летом $r_{\Delta T, q}$ примерно в три раза меньше $r_{\Delta T, \Delta e}$, а коэффициент $r_{\Delta T, q}$ для пыли хотя и сравним с величиной $r_{\Delta T, \Delta e}$, но он меньше нуля: увеличение содержания пыли сопровождается охлаждением атмосферы). Нам представляется, что такой результат физически понятен: какова бы ни была поглощательная способность того или иного загрязняющего вещества, количество поглощенной им радиации пропорционально концентрации этого вещества. Последняя даже для окиси углерода (СО), содержание которого существенно больше среди всех других загрязнителей, не превышает $10^0 - 10^1$ мг/м³, в то время как абсолютная влажность (концентрация водяного пара) порядка $10^{-1} - 10^1$ г/м³, т.е. в 100–1000 раз больше содержания СО.

Для сравнения приведем также сведения о корреляционных связях между ΔT и Δe , с одной стороны, и ΔT и Δq – с другой, оцененных по 4-срочным измерениям величин T , e и q в С.-Петербурге и T и e в Сосново за 1991 г. (табл. 4). Из этих данных следует тот же вывод, что и из табл. 2 и 3.

Таблица 4

Значения коэффициентов корреляции $r_{\Delta T, \Delta e}$ и $r_{\Delta T, q}$ (объемы выборок за сутки – от 170 до 283)

Коэффициент корреляции	Зима			Лето			
	День	Ночь	Сутки	День	Ночь	Сутки	
$r_{\Delta T, \Delta e}$	0,72	0,81	0,79	-0,10	0,35	0,15	
$r_{\Delta T, q}$	CO	0,10	0,11	0,11	0,02	-0,04	0,01
	NO ₂	-0,03	0,09	0	-0,02	0,16	0,08

Однако подобный вывод касается лишь рассмотренных примесей, и его нельзя распространить на все другие газообразные примеси без проведения дополнительных исследований.

В любом случае полученные результаты приводят к мысли о необходимости более глубокого исследования роли водяного пара антропогенного происхождения в изменении температуры, в том числе глобальной. Следует также учитывать, что на радиационный баланс приземного слоя сильное влияние оказывает нижняя облачность, количество которой за последние 20 лет увеличилось примерно на 3% [10]. Поэтому при решении проблемы потепления климата планеты необходимо сосредоточить усилия также и на исследовании поля нижней облачности.

Туман

Загрязнение атмосферы города примесями антропогенного происхождения, изменение температуры и влажности воздуха, скорости ветра, потоков радиации, свойств подстилающей поверхности и других характеристик не могли не сказаться на условиях образования таких важных для практики (авиация,

автомобильный и другие виды транспорта) явлений, как туманы. Уже после опубликования работ [7, 8] стало ясно, что широко распространенное в прошлом мнение [11, 12] о более благоприятных условиях образования туманов в городах по сравнению с сельской местностью должно быть отвергнуто как противоречащее фактическим данным.

Это следует, в частности, из табл. 5, содержащей значения отношений числа дней с туманом в поселках Барзас и Топки к числу таких же дней в Кемерове.

Таблица 5

Отношения числа дней с туманом в Барзасе и Топках к числу таких же дней в Кемерове в 1981–1985 гг.

Отношение	Туман		Просвечивающий туман	
	Зима	Лето	Зима	Лето
Барзас/Кемерово	1,53	2,50	1,50	2,29
Топки/Кемерово	2,18	1,73	1,83	1,31

Действительно, повторяемость туманов в Кемерове значительно меньше, чем в поселках Барзас и Топки: в 2,50 и 1,73 раза – летом и в 1,53 и 2,18 – зимой. Отношения продолжительности туманов в Барзасе и Топках к продолжительности их в Кемерове составляют: Барзас/Кемерово – 1,25 и 2,42; Топки/Кемерово – 0,87 и 3,10 летом и зимой соответственно.

Важно рассмотреть также такие характеристики туманов, как число дней с туманами и продолжительность тумана, отнесенных соответственно к общему числу дней в сезоне и общей продолжительности сезона (табл. 6). Из табл. 6 хорошо видно, что число дней с туманом, отнесенное к общему числу дней в сезоне, колеблется: зимой – между 5% в Кемерове и 8–11% в Барзасе и Топках, летом – между 11% в Кемерове и 18–26% в Топках и Барзасе.

Таблица 6

Число дней с туманом и продолжительность тумана, отнесенные соответственно к общему числу дней и общей продолжительности сезона

Пункт	Зима		Лето	
	По числу дней	По продолжительности дней	По числу дней	По продолжительности
Кемерово	0,051	0,0018	0,106	0,025
Барзас	0,078	0,0042	0,265	0,033
Топки	0,111	0,0047	0,183	0,022

Второе отношение, представляющее собой вероятность существования тумана, значительно меньше первого. Оно колеблется зимой – между 0,2% в Кемерове и 0,4–0,5% в Барзасе и Топках, летом – между 2% в Кемерове и 2–3% в Барзасе и Топках.

Из табл. 6 также следует, что туманы образуются летом значительно чаще, чем зимой: по числу дней с туманом – от 1,6 до 3,4 раза, по вероятности существования – от 4,7 до 13,9 раза. Объясняется это тем, что зимой в Сибири в целом преобладает антициклоническая обстановка (среднее значение давления в Кемерове 1013,1 гПа), в то время как летом – циклоническая (давление в Кемерове на 9,4 гПа меньше, чем зимой). Эти данные опровергают распространенное

мнение о более благоприятных условиях образования туманов в антициклонах и одновременно подкрепляют установленный путем моделирования результат: туманы образуются преимущественно в областях пониженного давления с характерными для них восходящими вертикальными движениями.

Рассмотрим еще такую характеристику, как среднее время (в часах) существования тумана в течение дня с туманом: в Кемерове оно равно 5,66 и 0,84 летом и зимой соответственно, в Барзасе – 2,99 и 1,29, в Топках – 2,83 и 1,02.

Основной причиной уменьшения туманов в городе служит повышение температуры воздуха в нем. Изменение водности тумана можно получить по формуле для его объемной (абсолютной) водности [13]:

$$\delta = a - a_m(T), \quad (1)$$

где a – влагосодержание тумана [в 1 м^3]; $a_m(T)$ – абсолютная влажность в состоянии насыщения.

Изменение влагосодержания обусловлено, в основном, изменением давления водяного пара. Тогда, согласно [13], $\Delta a = 273/T \Delta e$. Если воспользоваться уравнением Клазиуса–Клапейрона $\Delta a_m(T) = [La_m/(R_n T^2)] \Delta T$, то на основе (1) и двух последних соотношений получаем следующее выражение для приращения водности тумана, если давление пара изменилось на Δe (гПа) и температура воздуха на ΔT (К):

$$\Delta \delta = 217/T \Delta e - b \Delta T, \quad (2)$$

где b – коэффициент, значения которого приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Значения коэффициента b

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$-25 \div -15$	$-15 \div -5$	$-5 \div 5$	$5 \div 15$	$15 \div 25$
$b, \text{ г}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	0,087	0,184	0,363	0,661	1,119

Оценки показывают, что в выражении (2) в большинстве случаев более заметную роль играет второе слагаемое. Легко видеть, что при T выше $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ повышение ее только на $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению водности от 0,18 до $0,55 \text{ г}/\text{м}^3$. Поскольку водность туманов в реальных условиях, как правило, не превышает $10^{-1} - 10^0 \text{ г}/\text{м}^3$, то это означает, что увеличение T в городе даже на $0,3 \div 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к рассеянию (исчезновению) туманов с небольшой водностью (слабых и отчасти умеренных).

В заключение сформулируем некоторые выводы:

V.S. Komarov, S.A. Barinova, Yu.L. Matveev. Change of meteorological situation in Siberian cities due to anthropogenic factors.

Based on 8-period daily meteorological observations (1981–1985) in Kemerovo and some points located several tens of kilometers from it, an influence of anthropogenic factors on the temperature and humidity fields, as well as on formation of fogs in a city was under study. Close statistical relation between deviations of the temperature and water vapor pressure (the correlation coefficients, as a rule, are no less than 0,60–0,70) and weak relations (the correlation coefficients do not exceed 0,05–0,10) between the temperature and pollutants concentration (like CO , NO_2 , ammonia, and dust) allow one to assume that variation of anthropogenic water vapor content and the corresponding greenhouse effect play the main part in formation of a heat island in a city. The higher temperature in a city causes decrease of fogs repetition in it comparative to its neighborhood.

1) определяющую роль в формировании острова тепла в большом городе играет поглощение эффективной радиации водяным паром; влияние других (из рассмотренных) газообразных и твердых примесей в повышении температуры воздуха в городе на один – два порядка меньше;

2) абсолютная влажность увеличивается в городе (по сравнению с селом) под влиянием антропогенных выбросов водяного пара;

3) повышение температуры приводит к снижению относительной влажности и водности туманов и, как следствие, к уменьшению числа и продолжительности последних в большом городе по сравнению с сельской местностью;

4) при разработке проблемы изменения температуры (климата) в крупных областях и на планете в целом следует обратить особое внимание на оценку влияния полей влажности и облаков на потоки и притоки радиации.

1. *Оптика атмосферы и океана. Тематический выпуск «Климато-экологический мониторинг атмосферы ограниченных территорий».* 1994. Т. 7. № 2. С. 115–282.
2. *Оптика атмосферы и океана. Тематический выпуск «Климато-экологический мониторинг атмосферы ограниченных территорий».* 1995. Т. 8. № 7. С. 937–1128.
3. *Оптика атмосферы и океана. Тематический выпуск «Климато-экологический мониторинг атмосферы ограниченных территорий».* 1996. Т. 9. № 4. С. 409–564.
4. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
5. *Зуев В.Е., Кабанов М.В.* Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 253 с.
6. *Зуев В.В., Зуев В.Е.* Лазерный экологический мониторинг газовых компонент атмосферы. Итоги науки и техники. Метеорология и климатология. Т. 20. М.: ВИНТИ, 1992. 189 с.
7. *Матвеев Л.Т.* // Метеорология и гидрология. 1979. № 5. С. 22–27.
8. *Карлин Л.Н., Матвеев Л.Т.* // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 843–851.
9. *Матвеев Л.Т., Меркурьева Н.А.* // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1181–1187.
10. *Матвеев Ю.Л.* // Исследование Земли из Космоса. 1997. № 1. С. 88–97.
11. *Смит К.* Основы прикладной метеорологии: Пер. с англ. / Под ред. Л.Т. Матвеева. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 423 с.
12. *Рамад Ф.* Основы прикладной экологии: Пер. с франц. / Под ред. Л.Т. Матвеева. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 540 с.
13. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.