

## Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ

Н. Е. Чубарова\*, Е. И. Незваль\*, И. Б. Беликов\*\*, Е. В. Горбаренко\*,  
И. Д. Еремина\*, Е. Ю. Жданова\*, И. А. Корнева\*, П. И. Константинов\*,  
М. А. Локощенко\*, А. И. Скороход\*\*, О. А. Шиловцева\*

*Анализируются результаты измерений метеорологических и экологических величин за 60 лет (1954—2013 гг.), выполненных в Метеорологической обсерватории МГУ им. М. В. Ломоносова. Получен значимый положительный тренд температуры ( $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$  за период 1954—2013 гг.), который в 1976—2012 гг. увеличился до  $0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$ . Рассматриваются особенности сезонного хода разных характеристик атмосферы. Обсуждаются характер и причины низкочастотных колебаний метеорологических величин, составляющих радиационного баланса, радиации в разных спектральных диапазонах, а также химического состава атмосферных осадков. Показаны возможные механизмы наблюдаемого более значительного увеличения температуры воздуха в Москве по сравнению с Центральным федеральным округом и их связь с парниковым эффектом в городской атмосфере.*

### 1. Введение

Метеорологическая обсерватория МГУ им. М. В. Ломоносова (МО МГУ) была основана в 1954 г. как учебно-методический центр и научная база для изучения климата Москвы. С этого времени в МО МГУ проводится мониторинг большого числа эколого-климатических характеристик атмосферы в соответствии с принятыми международными и отечественными нормами, установленными ВМО и Росгидрометом. Регулярные наблюдения позволяют получать важные данные, необходимые для комплексного решения широкого круга научных и прикладных задач.

Целью данной публикации является анализ основных закономерностей сезонной и межгодовой изменчивости разных метеорологических величин и характеристик загрязнения атмосферы, полученных по данным измерений МО МГУ в Москве — одном из крупнейших мегаполисов мира с населением более 12 млн. человек.

### 2. Краткая характеристика приборов и методов измерений

Проводимые в МО МГУ измерения разных метеорологических величин, радиационных и экологических параметров включают как стандартные виды

\* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; e-mail: chubarova@geogr.msu.ru.

\*\* Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук.

наблюдений по программам, утвержденным Росгидрометом для метеорологических станций [20], так и сравнительно редкие виды измерений [3—5, 16, 19, 24]. К последним относится измерение температуры грунта на восьми глубинах вплоть до 320 см с помощью вытяжных почвенно-глубинных термометров ТПВ-50, а также измерение глубины промерзания и оттаивания грунта на участке, специально лишенном естественного покрова (зимой — снега, летом — травы). Эти данные позволяют более точно характеризовать температурные условия в почвенном грунте города. Совместно с ИФА РАН с 1988 г. проводится акустическое зондирование атмосферы с помощью содара “ЭХО-1” [13, 15], а с 2004 г. — с помощью доплеровского содара “MODOS” производства фирмы “МЕТЕК”, который позволяет получать вертикальные профили скорости и направления ветра в слое атмосферы от 40 до 500 м [16, 17, 36].

В МО МГУ на базе специального аппаратно-программного комплекса SUN [23] проводятся комплексные исследования составляющих радиационного баланса ( $B$ ), прямой ( $S$ ), рассеянной ( $D$ ) и отраженной коротковолновой радиации ( $R_k$ ) [2]. Дополнительные программы радиационных измерений включают в себя самый длинный в мире ряд наблюдений УФ радиации в области спектра 300—380 нм приборами, разработанными в МО МГУ [28, 31], которые с 2008 г. заменены на пиранометры UVA-1 YES. Мониторинг биологически активной эритемной радиации проводится с 1999 г. приборами UVB-1 YES [26, 30]. Наблюдения за фотосинтетически активной радиацией (ФАР) с 1980 г. велись красно-белыми пиранометрами [18], которые в 1998 г. были заменены на приборы LI-190SL американской фирмы LI-COR [2, 27, 42].

Наблюдения за естественной освещенностью с 1964 г. проводились с помощью прибора, разработанного в МО МГУ [21], а с 2010 г. они ведутся с помощью прибора LI-210SL фирмы LI-COR [42].

Стандартные характеристики прозрачности атмосферы (интегральный коэффициент прозрачности  $P_2$  и фактор мутности  $T_2$ , приведенные к массе атмосферы  $m = 2$ ) определяются с 1955 г. по данным измерений прямой солнечной радиации, поступающей на перпендикулярную поверхность (при диске Солнца, не закрытом облаками). Дополнительно по значению прямой коротковолновой радиации и влагосодержанию атмосферы рассчитывается аэрозольная оптическая толщина атмосферы для длины волны 550 нм [2].

С 2001 г. мониторинг оптических, микрофизических и радиационных характеристик аэрозоля осуществляется с помощью солнечного и небесного фотометра CIMEL сети AERONET [32]. Измерения аэрозольных характеристик проводятся на 7 длинах волн (340, 380, 440, 500, 670, 870, 1020 нм), а канал 940 нм используется для восстановления влагосодержания атмосферы.

Программа наблюдений за химическим составом осадков началась в МО МГУ в 1980 г. Для каждой пробы дождя и снега определяются кислотность pH, удельная электропроводность и содержание основных катионов и анионов [12]. Концентрации некоторых малых газовых примесей в приземном слое атмосферы измеряются с 2002 г. совместно с ИФА РАН в специально оборудованном экологическом павильоне МО МГУ. Измерительная аппаратура павильона по своим характеристикам приближена к используемой на станциях мировой сети ВМО и обеспечена калибровочными средствами, поставляемыми ведущими отечественными и мировыми научными центрами. Подробное описание оборудования и проводимых на станции измерений приведено в работе [10].

### 3. Результаты

Расположение МО МГУ в парковой зоне вблизи территории Ботанического сада МГУ на удалении от локальных источников загрязнения позволяет выявлять региональные тренды метеорологических и радиационных величин, на которые накладывается дополнительное влияние общего городского фона. При измерении газовой-аэрозольного состава атмосферы отсутствие близко расположенных локальных источников загрязнения дает возможность рассматривать результаты как показатели фонового городского загрязнения. В табл. 1 приведены месячные и годовые оценки основных метеорологических величин, полученные по данным многолетних измерений МО МГУ, а в табл. 2 — основные экологические параметры, характеризующие газово-аэрозольный состав атмосферы. Рассмотрим особенности их межгодовой и сезонной изменчивости.

#### 3.1. Особенности изменений метеорологических и радиационных величин

Анализ динамики изменения температуры воздуха в Москве с 1954 г. выявил значимый положительный линейный тренд ( $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) за период с 1954 по 2013 г. (рис. 1а). За период 1976—2012 гг. его величина существенно увеличилась и составила  $0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , что несколько больше скорости повышения температуры в Центральном федеральном округе (ЦФО) ( $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) и в целом в России ( $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) за тот же период [9]. Известно, что для всей территории России отмечается положительный тренд количества осадков за период с 1976 по 2012 г. ( $0,08 \text{ мм}/\text{год}$ ), однако он не наблюдается для ЦФО и не прослеживается по данным МО МГУ для этого периода (рис. 1б). В то же время большое количество осадков, выпавшее в 2013 г., существенно изменило общую картину межгодовой динамики осадков и привело к положительному тренду осадков в целом за весь 60-летний период наблюдений. Отметим, что в 2013 г. впервые за 60 лет наблюдений в МО МГУ годовая сумма осадков превысила отметку 1000 мм и составила 1021 мм.

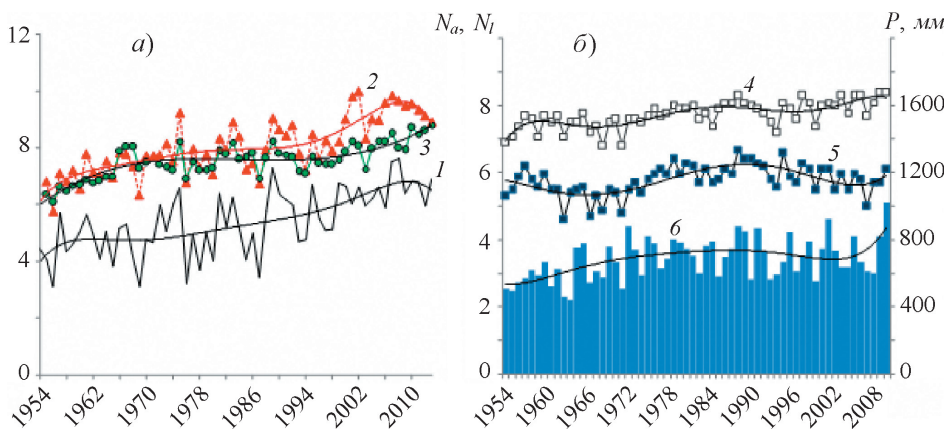


Рис. 1. Межгодовая изменчивость температуры воздуха (1) и температуры почвы на глубине 240 см на открытом (2) и закрытом (3) участках (а), балла общей  $N_a$  (4) и нижней  $N_l$  (5) облачности и количества осадков  $P$  (6) (б).

Здесь и на других рисунках сплошные тонкие линии — полиномиальные тренды.

Для последнего десятилетия (2004—2013 гг.) характерны большие положительные аномалии разных метеорологических величин по сравнению с их климатической нормой за 1961—1990 гг. Так, температура воздуха увеличилась на  $1,7^{\circ}\text{C}$ , годовое количество осадков — на  $64,5$  мм (главным образом из-за большого количества осадков в 2013 г.), общая облачность — на  $0,5$  балла.

Рассмотрим сезонные особенности межгодовой изменчивости основных метеорологических величин. Положительные тренды температуры воздуха наблюдаются во все месяцы года, но наиболее сильно они выражены в январе ( $0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) и в марте — апреле ( $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ). Наименее выражен тренд в июне и сентябре ( $0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ). Для осадков эти тенденции более разнообразны: весной (в апреле и мае) наблюдается тенденция к уменьшению осадков, во время как осенью отмечаются значимые положительные тренды (до  $0,5$ — $0,6$  мм/год). При сравнении средних значений температуры и осадков за последнее десятилетие с климатической нормой 1961—1990 гг. хорошо видно общее увеличение температуры с ноября по январь более чем на  $2,5^{\circ}\text{C}$  и некоторое уменьшение среднемесячной температуры февраля (на  $0,1^{\circ}\text{C}$ ). Следует отметить, что в последнее десятилетие (2004—2013 гг.) самым холодным месяцем вместо января стал февраль (средняя месячная температура  $-7,8^{\circ}\text{C}$ ). Во все сезоны, кроме летнего, в те или иные месяцы наблюдалось существенное увеличение количества осадков относительно климатической нормы. При этом происходило смещение наиболее “сухого” месяца с марта на апрель (см. табл. 1).

Температура поверхности почвы в сезонном ходе меняется соразмерно температуре воздуха, но имеет больший вариационный размах (соответственно  $31$  и  $27^{\circ}\text{C}$  под оголенной поверхностью и под естественным покровом). Рассмотрим, как меняется температура грунта. Для примера в табл. 1 приведен среднесезонный годовой ход температуры почвы на глубине  $240$  см за период с 1955 по 2013 г. Согласно второму закону Фурье, запаздывание максимумов и минимумов температуры почвы происходит пропорционально глубине, поэтому максимум достигается лишь в сентябре, а минимум — в апреле. Амплитуда годового хода на этой глубине составляет  $6,7^{\circ}\text{C}$  под естественным покровом и  $10,4^{\circ}\text{C}$  под оголенной поверхностью. Температура грунта под естественным покровом летом и осенью меньше, чем под оголенной поверхностью, вследствие дополнительных затрат тепла на транспирацию. Зимой и весной соотношение обратное из-за теплоизолирующей роли снежного покрова. Образование снежного покрова в Москве обычно происходит в ноябре, а его сход — в апреле [14], однако на глубине  $240$  см температура грунта под оголенной поверхностью начинает превышать его температуру под естественным покровом, как правило, только в июне.

Межгодовая изменчивость среднегодовых значений температуры почвы на глубине  $240$  см, характерная для обоих участков, показана на рис. 1а. Видно, что температура повышалась, причем под оголенной поверхностью значительно быстрее (со средней скоростью  $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ), чем под естественным покровом ( $0,03^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ). Это связано, по-видимому, с отсутствием теплоизолирующего слоя снежного покрова зимой, а также травяного покрова и дернины в теплое время года. В соответствии с критерием Стьюдента оба тренда являются статистически значимыми с доверительной вероятностью  $0,95$ . Следует отметить, что значения скорости повышения температуры почвы и воздуха за этот же период довольно близки.

Рассмотрим особенности ветрового режима. По многолетним содарным данным, за период с 2004 до 2012 г. над Москвой в слое воздуха на высоте от 40 до 500 м преобладал юго-западный ветер со скоростью от 5 до 10 м/с (рис. 2), реже — северный и северо-восточный ветер [17]. Наибольшие значения средней скорости ветра в слое воздуха на высоте от 40 до 200 м (в этом слое оценка скорости ветра наиболее надежна) обычно наблюдались поздней осенью (более 6 м/с), а наименьшие — летом (менее 5 м/с) (см. табл. 1). Среднегодовое значение скорости ветра составило 5,4 м/с. Дополнительные особенности ее годового хода были статистически незначимы и отражали особенности условий погоды отдельных лет. Похожие соотношения наблюдались и для сезонных изменений скорости ветра у земной поверхности, но сами значения скорости ветра были примерно в 2 раза меньше. Межгодовые непериодические изменения скорости ветра в слое воздуха 40—200 м были довольно значительны и сопоставимы с различиями в годовом ходе; среднемесячная скорость ветра в зависимости от синоптических условий изменялась в широких пределах — от 3 до 8 м/с. Так, она оказалась крайне малой (менее 4 м/с) и в очень жарком июле 2010 г., и в очень морозном феврале 2006 г. при господстве антициклональной погоды. Рекордно большие значения скорости в среднем за 10 мин достигали в отдельных случаях 34—35 м/с (обычно в верхней части диапазона зондирования, в слое воздуха на высоте > 400 м). Столь сильный ветер был возможен при условии нахождения Москвы в интенсивных градиентных потоках на периферии крупных барических образований (обычно глубоких и обширных циклонов), а также при одновременном образовании низкоуровневых струй в профиле ветра [16].

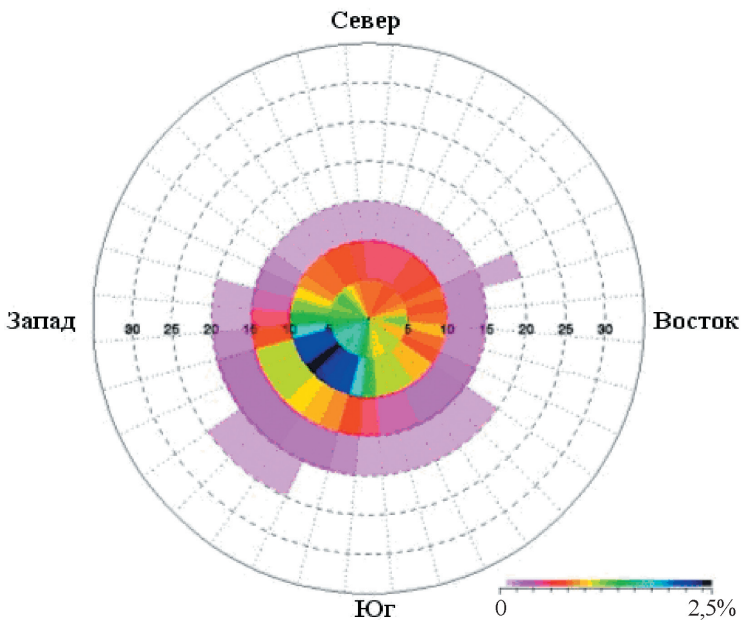


Рис. 2. Роза ветров в слое воздуха 40—500 м за период 2004—2012 гг. по данным содара “МО-DOS”, установленного в МО МГУ, с одновременными данными о скорости ветра (концентрические круги, м/с).  
Общее число случаев — 3 млн. Повторяемость скорости ветра в отдельных сегментах показана концентрическими кругами разного цвета, наибольшая повторяемость показана черным и синим цветом.

Таблица 1  
Средние месячные и годовые значения метеорологических и радиационных величин по данным измерений в МО МГУ

Величина, период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Температура воздуха, °C (1954—2013 гг.)	-8,0 (0,96)	-7,5 (0,95)	-2,0 (0,68)	6,2 (0,57)	13,3 (0,59)	17,2 (0,55)	19,1 (0,55)	17,1 (0,40)	11,3 (0,46)	5,3 (0,48)	-1,3 (0,65)	-5,8 (0,86)	5,4 (0,29)
Парциальное давление водяного пара, зПа (1954—2013 гг.)	3,2 (0,22)	3,1 (0,23)	4,0 (0,20)	6,1 (0,25)	9,2 (0,31)	12,5 (0,35)	14,8 (0,34)	13,9 (0,35)	10,3 (0,25)	7,4 (0,23)	5,0 (0,23)	3,7 (0,22)	7,8 (0,11)
Относительная влажность, % (1954—2013 гг.)	83 (0,84)	79 (0,99)	72 (1,23)	64 (1,56)	61 (1,37)	65 (1,40)	68 (1,51)	72 (1,30)	77 (1,15)	80 (0,87)	84 (0,82)	84 (0,80)	74 (0,46)
Влагодержание атмосферы в столбе по данным AERONET, см (2001—2013 гг.)	0,29 (0,05)	0,32 (0,05)	0,48 (0,09)	0,70 (0,06)	1,33 (0,15)	1,71 (0,18)	2,24 (0,12)	2,03 (0,11)	1,57 (0,08)	0,89 (0,15)	0,60 (0,13)	0,33 (0,09)	1,08 (0,08)
Атмосферное давление, зПа (1954—2013 гг.)	992,4 (1,65)	993,6 (1,77)	993,1 (1,46)	992,2 (0,80)	992,4 (0,67)	989,9 (0,70)	989,4 (0,62)	990,8 (0,66)	992,2 (0,77)	993,2 (1,25)	993,5 (1,69)	991,8 (1,37)	992,0 (0,37)
Сумма осадков, мм (1954—2013 гг.)	47 (5,2)	40 (5,0)	37 (4,6)	41 (5,1)	55 (7,5)	76 (8,7)	81 (10,8)	78 (9,2)	64 (8,6)	63 (9,1)	52 (5,7)	52 (5,6)	685 (31,5)
Скорость приземного ветра, м/с (1954—2013 гг.)	3,1 (0,22)	3,0 (0,19)	2,9 (0,17)	2,8 (0,17)	2,6 (0,15)	2,5 (0,15)	2,3 (0,14)	2,3 (0,14)	2,6 (0,17)	3,0 (0,21)	3,0 (0,20)	3,1 (0,19)	2,8 (0,15)
Скорость ветра в слое 40—200 м, м/с (2004—2012 гг.)	5,8 (0,7)	5,2 (0,7)	5,5 (0,5)	5,1 (0,4)	4,9 (0,4)	4,8 (0,5)	4,3 (0,5)	4,8 (0,3)	5,5 (0,5)	5,9 (0,4)	6,4 (0,5)	6,0 (0,6)	5,8 (0,7)
Температура поверхности почвы, °C (1954—2013 гг.)	-8,9 (0,95)	-8,9 (0,99)	-3,8 (0,70)	6,4 (0,57)	16,0 (0,69)	20,9 (0,70)	22,5 (0,70)	19,4 (0,45)	12,0 (0,45)	4,8 (0,45)	-1,8 (0,64)	-6,4 (0,84)	6,0 (0,28)
Температура почвы на глубине 240 см в случае естественного (закрытого) участка, °C (1955—2013 гг.)	6,4 (0,2)	5,5 (0,2)	4,9 (0,1)	4,4 (0,2)	5,3 (0,2)	7,0 (0,2)	8,9 (0,2)	10,5 (0,2)	11,1 (0,2)	10,6 (0,1)	9,3 (0,2)	7,7 (0,2)	7,6 (0,2)
Температура почвы на глубине 240 см в случае оголенного (открытого) участка, °C (1955—2013 гг.)	5,9 (0,2)	4,5 (0,2)	3,5 (0,2)	3,1 (0,2)	4,2 (0,4)	7,7 (0,4)	11,0 (0,3)	13,2 (0,3)	13,5 (0,2)	12,1 (0,2)	9,9 (0,2)	7,7 (0,2)	8,0 (0,2)
Балл общей облачности (1954—2013 гг.)	8,6 (0,24)	8,1 (0,30)	7,5 (0,24)	7,5 (0,2)	7,0 (0,22)	7,0 (0,24)	6,9 (0,25)	6,8 (0,26)	7,4 (0,22)	8,3 (0,19)	8,7 (0,20)	8,9 (0,17)	7,7 (0,10)
Балл нижней облачности (1954—2013 гг.)	7,2 (0,38)	6,2 (0,41)	5,3 (0,27)	4,9 (0,24)	4,4 (0,27)	4,5 (0,26)	4,4 (0,26)	4,6 (0,25)	5,4 (0,31)	6,7 (0,27)	7,8 (0,27)	7,9 (0,26)	5,8 (0,12)



Продолжительность солнечного сияния (1955—2013 гг.)	1,00 (0,14)	2,33 (0,26)	4,41 (0,29)	6,02 (0,36)	8,57 (0,42)	9,42 (0,45)	9,17 (0,39)	7,72 (0,39)	4,98 (0,34)	2,47 (0,24)	1,08 (0,15)	0,63 (0,10)	4,83 (0,11)
Коэффициент прозрачности $P_2$ (1955—2013 гг.)	0,768 (0,013)	0,759 (0,011)	0,742 (0,012)	0,708 (0,012)	0,710 (0,010)	0,714 (0,010)	0,704 (0,007)	0,701 (0,012)	0,721 (0,012)	0,759 (0,010)	0,770 (0,010)	0,774 (0,012)	0,719 (0,006)
Аэрозольная оптическая толщина $AOT_{550}$ (1955—2013 гг.)	0,14 (0,03)	0,16 (0,02)	0,20 (0,02)	0,25 (0,03)	0,23 (0,02)	0,20 (0,02)	0,22 (0,02)	0,22 (0,02)	0,19 (0,03)	0,14 (0,02)	0,12 (0,02)	0,12 (0,03)	0,19 (0,01)
Средние суточные суммы ( $\Sigma$ ) суммарной радиации $Q$ , $MДж/м^2$ (1958—2013 гг.)	1,95 (0,10)	4,66 (0,22)	9,07 (0,32)	13,36 (0,4)	18,66 (0,56)	20,34 (0,56)	19,18 (0,5)	15,28 (0,42)	9,64 (0,37)	4,64 (0,21)	1,96 (0,12)	1,22 (0,07)	10,03 (0,13)
$\Sigma$ рассеянной радиации $D$ , $MДж/м^2$ (1958—2013 гг.)	1,59 (0,07)	3,31 (0,12)	5,45 (0,17)	7,47 (0,18)	9,31 (0,22)	10,17 (0,20)	9,70 (0,16)	8,03 (0,18)	5,68 (0,11)	3,16 (0,09)	1,54 (0,06)	1,06 (0,05)	5,55 (0,08)
$\Sigma$ прямой радиации на горизонтальной поверхности $S'$ , $MДж/м^2$ (1958—2013 гг.)	0,35 (0,06)	1,35 (0,16)	3,62 (0,30)	5,88 (0,42)	9,34 (0,59)	10,17 (0,60)	9,48 (0,54)	7,25 (0,43)	3,96 (0,33)	1,48 (0,17)	0,42 (0,07)	0,16 (0,03)	4,47 (0,14)
$\Sigma$ радиационного баланса $B$ , $MДж/м^2$ (1958—2013 гг.)	-0,88 (0,12)	-0,72 (0,14)	0,95 (0,24)	5,54 (0,20)	8,82 (0,29)	10,02 (0,28)	9,57 (0,27)	6,87 (0,22)	3,42 (0,15)	0,71 (0,09)	-0,58 (0,10)	-0,84 (0,10)	3,60 (0,09)
$\Sigma$ длинноволнового баланса $Vd$ , $MДж/м^2$ (1958—2013 гг.)	-1,62 (0,16)	-2,40 (0,21)	-3,72 (0,23)	-5,37 (0,28)	-6,07 (0,32)	-6,12 (0,31)	-5,81 (0,32)	-5,35 (0,28)	-4,32 (0,24)	-2,95 (0,20)	-1,80 (0,15)	-1,39 (0,13)	-3,92 (0,17)
Альbedo поверхности, % (1958—2013 гг.)	62 (1,6)	63 (2,0)	48 (3,4)	18 (1,2)	20 (0,4)	20 (0,4)	20 (0,5)	20 (0,6)	20 (0,6)	21 (1,3)	37 (2,9)	54 (2,7)	25 (0,7)
$\Sigma$ фотосинтетически активной радиации $Q_{ФАР}$ , $MДж/м^2$ (1998—2013 гг.)	0,7 (0,1)	1,7 (0,1)	3,7 (0,2)	5,8 (0,2)	8,2 (0,6)	8,9 (0,6)	8,4 (0,6)	6,4 (0,4)	4,0 (0,3)	1,8 (0,2)	0,7 (0,1)	0,4 (0,1)	4,2 (0,1)
Естественная освещенность, $клк \cdot ч$ (1964—2013 гг.)	54 (3)	128 (6)	263 (9)	392 (12)	566 (18)	624 (18)	590 (16)	472 (12)	292 (12)	136 (6)	54 (3)	32 (2)	300 (4)
$\Sigma$ УФ радиации в области спектра 300—380 нм, $КДж/м^2$ (1968—2013 гг.)	77 (3)	177 (7)	347 (13)	502 (15)	726 (20)	828 (23)	783 (19)	628 (17)	381 (14)	181 (8)	77 (4)	50 (2)	396 (6)
$\Sigma$ эритемной радиации, $КДж/м^2$ (1999—2013 гг.)	0,11 (0,0)	0,29 (0,08)	0,79 (0,21)	1,39 (0,37)	2,28 (0,61)	2,77 (0,74)	2,78 (0,74)	2 (0,54)	1,13 (0,3)	0,42 (0,11)	0,14 (0,04)	0,07 (0,02)	1,18 (0,32)
Максимальный УФ-индекс (1999—2013 гг.)	0,8	2,7	3,8	4,9	6,4	7,7	7,2	6,2	4,5	2,5	1,2	0,5	7,7*

Примечание. Величины  $P_2$  и  $AOT_{550}$  рассчитаны по данным измерений прямой радиации. В скобках указаны доверительные интервалы ( $\pm$ ) на уровне доверительной вероятности 95% для средних значений, оцененных по их межгодовой изменчивости. Звездочкой отмечено максимальное за год значение УФ-индекса.

Таблица 2

Средние месячные и годовые значения аэрозольного и газового загрязнения атмосферы, кислотности и минерализации атмосферных осадков

Величина, период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Аэрозольные характеристики													
Аэрозольная оптическая толщина на длине волны 500 нм по данным AERONET, AOT <sub>500</sub> (2001—2013 гг.)	0,10 (0,01)	0,15 (0,02)	0,17 (0,02)	0,23 (0,02)	0,20 (0,01)	0,16 (0,01)	0,24 (0,02)	0,31 (0,08)	0,24 (0,06)	0,13 (0,02)	0,09 (0,01)	0,07 (0,01)	0,18 (0,03)
Волновой показатель Ангстрема в области спектра 440—870 нм по данным AERONET (2001—2013 гг.)	1,38 (0,11)	1,39 (0,11)	1,40 (0,07)	1,47 (0,05)	1,47 (0,08)	1,61 (0,07)	1,72 (0,07)	1,60 (0,05)	1,53 (0,05)	1,41 (0,13)	1,35 (0,11)	1,42 (0,17)	1,47 (0,05)
Концентрация PM <sub>2,5</sub> , мкг/м <sup>3</sup> (2011—2013 гг.)	17,0 (8,5)	18,8 (15,1)	12,8 (8,5)	18,4 (6,6)	22,4 (12,9)	23,2 (13,9)	23,4 (3,3)	22,0 (8,0)	16,4 (8,9)	14,8 (7,7)	14,5 (8,7)	16,6 (7,4)	18,3 (7,3)
Концентрация газовых примесей													
O <sub>3</sub> , млрд <sup>-1</sup> (2002—2013 гг.)	8,8 (1,6)	10,8 (1,5)	20,0 (1,9)	22,0 (1,9)	22,2 (1,2)	19,5 (2,2)	20,0 (3,8)	16,3 (2,1)	9,9 (1,2)	8,4 (1,1)	7,4 (1,2)	7,3 (1,5)	14,4 (0,7)
NO, млрд <sup>-1</sup> (2002—2013 гг.)	18,0 (5,9)	21,7 (5,5)	12,9 (4,7)	12,2 (2,6)	9,5 (1,4)	9,3 (2,7)	11,2 (3,4)	14,1 (2,6)	21,4 (5,8)	16,8 (4,2)	15,2 (5,1)	17,6 (4,5)	15,0 (1,9)
NO <sub>2</sub> , млрд <sup>-1</sup> (2002—2013 гг.)	21,7 (4,4)	25,5 (1,8)	24,0 (2,5)	26,2 (3,8)	20,6 (1,9)	17,7 (2,6)	20,6 (3,3)	22,0 (3,9)	19,2 (2,9)	18,4 (2,7)	18,2 (3,4)	20,5 (3,6)	21,2 (1,8)
CO, млн <sup>-1</sup> (2002—2013 гг.)	0,5 (0,1)	0,6 (0,1)	0,5 (0,1)	0,5 (0,1)	0,5 (0,1)	0,4 (0,1)	0,5 (0,2)	0,6 (0,3)	0,5 (0,2)	0,4 (0,1)	0,4 (0,1)	0,5 (0,1)	0,5 (0,1)
CO <sub>2</sub> , млн <sup>-1</sup> (2002—2013 гг.)	403 (6)	405 (7)	399 (6)	398 (4)	391 (4)	381 (5)	384 (5)	385 (6)	388 (5)	392 (7)	396 (6)	399 (6)	393 (4)
SO <sub>2</sub> , млрд <sup>-1</sup> (2004—2013 гг.)	1,5 (0,9)	2,3 (1,5)	1,6 (0,8)	1,4 (0,5)	1,2 (0,3)	1,4 (0,8)	1,2 (0,2)	1,5 (0,5)	1,2 (0,6)	1,0 (0,3)	1,0 (0,3)	1,2 (0,5)	1,4 (0,4)
Атмосферные осадки													
Кислотность осадков, pH (1981—2013 гг.)	5,9 (0,2)	5,4 (0,2)	5,1 (0,3)	5,0 (0,3)	4,8 (0,3)	4,6 (0,2)	4,6 (0,2)	4,6 (0,2)	5,0 (0,2)	5,2 (0,2)	5,6 (0,2)	5,7 (0,2)	4,9 (0,2)
Минерализация, мг/л (1981—2013 гг.)	20,4 (2,8)	19,6 (3,4)	27,7 (4,1)	28,4 (5,4)	21,5 (5,9)	17,7 (3,9)	15,2 (3,8)	16,3 (3,9)	16,0 (2,7)	12,5 (2,4)	18,5 (3,0)	18,2 (3,6)	17,8 (1,4)

Примечание. В скобках указаны доверительные интервалы (±) на уровне доверительной вероятности 95% для средних значений, оцененные по их межгодовой изменчивости.



Одним из основных климатообразующих факторов является радиационный баланс подстилающей поверхности  $B$ . Известно, что в стационарных условиях тепловое состояние земной поверхности и приземного слоя воздуха определяется величиной и знаком значений  $B$ . Начиная с конца 1970-х годов наблюдается тенденция увеличения радиационного баланса, что соответствует положительному тренду температуры воздуха и почвы (см. рис. 1а и рис. 3). Особенно резкое увеличение годовых сумм радиационного баланса наблюдается с 1994 г. [6]. Закономерности многолетних изменений  $B$  определяются изменчивостью соотношения нисходящих и восходящих коротковолновых и длинноволновых потоков. В многолетнем ходе нисходящей коротковолновой радиации  $Q$  наблюдается уменьшение до конца 1980-х годов и некоторое увеличение в последующие годы, главным образом, из-за изменения балла общей и нижней облачности. Это увеличение  $Q$  происходит в результате увеличения прямой солнечной радиации (рис. 3), которое связано с уменьшением балла нижней облачности, а также со значительным уменьшением (на 40%) аэрозольной мутности атмосферы. Известно, что уменьшение облачности и аэрозольной оптической толщины с 1990-х годов имеет глобальный характер [1, 25, 35, 39] и хорошо прослеживается на территории Европы, что в свою очередь может несколько увеличивать региональные положительные тренды температуры воздуха [39]. Коротковолновая часть радиационного баланса с середины 1990-х годов несколько увеличивалась вследствие сокращения периода со снежным покровом, что существенно уменьшало отраженную радиацию  $Rk$ . В последние несколько лет в связи с сохранением снежного покрова до середины апреля эта тенденция уменьшилась (рис. 3). Для всего периода наблюдений отмечаются статистически незначимые тенденции небольшого увеличения коротковолнового (на 3%) и более значительного увеличения длинноволнового радиационного баланса (на 7%). Таким образом, наблюдаемый статистически значимый положительный

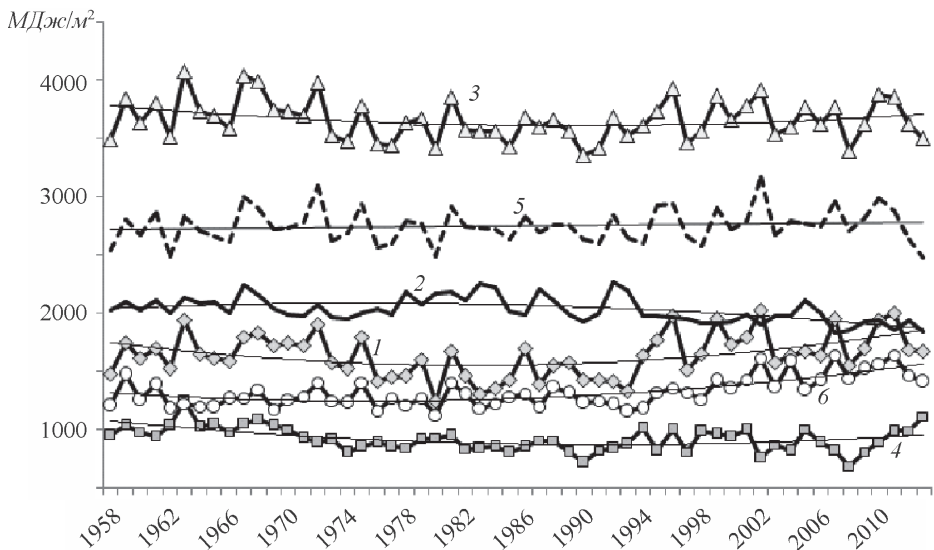


Рис. 3. Межгодовая изменчивость годовых сумм составляющих радиационного баланса в период 1958—2013 гг.

1 — прямая радиация; 2 — рассеянная радиация; 3 — суммарная радиация; 4 — отраженная радиация; 5 — коротковолновый баланс; 6 — общий радиационный баланс.

линейный тренд радиационного баланса определяется не столько увеличением его коротковолновой части, сколько существенным увеличением длинноволнового баланса из-за увеличения нисходящего длинноволнового излучения [7].

Исследования межгодовых вариаций естественной освещенности показали наличие ее квазициклических колебаний за период 1964—2013 гг. (рис. 4а). Однако линейный тренд ее изменчивости статистически незначим. Наибольшая естественная освещенность наблюдалась в 1967 и 2002 гг. (около  $120 \cdot 10^6$  лк/год), наименьшая — в 1974 и 2008 гг. (около  $100 \cdot 10^6$  лк/год).

Анализ многолетней изменчивости суммарной ФАР в области спектра 400—700 нм был проведен за весь вегетационный период со среднесуточной температурой воздуха выше 5°C (рис. 4а). Для Москвы — это период в среднем между 15 апреля и 15 октября, во время которого поступление ФАР составляет около 1240 МДж/м<sup>2</sup>. Следует отметить, что в последние годы наблюдается некоторая тенденция к увеличению ФАР, однако линейный тренд статистически незначим. В целом в межгодовой изменчивости проявляются такие же тенденции, что и в изменении суммарной радиации (рис. 3, рис. 4а) с заметным увеличением с середины 1980-х годов.

Анализ суточных сумм УФ радиации в области спектра 300—380 нм выявил ее существенные сезонные вариации: от 50 кДж/м<sup>2</sup> в декабре до 828 кДж/м<sup>2</sup> в июне. Среднее значение годовой суммы суммарной УФ радиации в области спектра 300—380 нм за весь период наблюдений составило 145,2 МДж/м<sup>2</sup>. В целом относительная межгодовая изменчивость УФ радиации в области спектра 300—380 нм находится примерно в пределах  $\pm 10\%$ . Однако с середины 1980-х годов наблюдается заметное увеличение УФ радиации, что соответствует межгодовым изменениям наиболее оптически плотной нижней облачности. Так, наименьшие годовые суммы суммарной УФ радиации приходятся на период со второй половины 1970-х до середины 1980-х годов, когда отмечалось существенное увеличение как общей, так и нижней облачности (рис. 4б). В 1978 и 1980 гг. ее годовой приход был меньше на 11% по сравнению со средней величиной за последние 15 лет.

Анализ биологически активной эритемной радиации с эффективной длиной волны, лежащей в УФ-В области спектра, показал ее более существенные межгодовые вариации, чем УФ радиации в области спектра 300—380 нм, главным

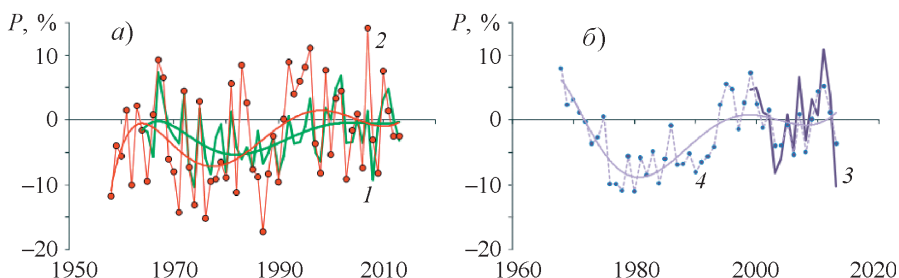


Рис. 4. Межгодовая относительная изменчивость естественной освещенности (1), суммарной фотосинтетически активной радиации в области спектра 400—700 нм за вегетационный период со средней температурой воздуха выше 5°C (2) (а), эритемной радиации (3) и суммарной УФ радиации в области спектра 300—380 нм (4) (б).

Средние суммы, относительно которых производилось нормирование, брались за период 1999—2013 гг. Для естественной освещенности они равны  $112,5 \cdot 10^6$  лк · ч, для ФАР ( $T > 5^\circ\text{C}$ ) — 1272,1 МДж/м<sup>2</sup>, для УФ в области спектра 300—380 нм — 148,5 МДж/м<sup>2</sup>, для эритемной радиации — 433,4 КДж/м<sup>2</sup>.

образом, из-за дополнительного влияния озона. Так, в 2011 г. вследствие относительно небольшого общего содержания озона и уменьшения эффективного балла нижней облачности [4, 30] отмечался абсолютный максимум поступления эритемной радиации (+11%).

На основании данных измерений МО МГУ с помощью разработанной методики [34] были оценены ресурсы УФ радиации для Москвы: периоды с условиями ее оптимума, недостаточности и избыточности. Так, например, условия УФ-оптимума, когда можно получить полезную дозу УФ радиации, способствующую образованию витамина D, и когда нет повышенных доз УФ радиации, при которых возникает эритема, наблюдаются в Москве в среднем примерно с 9 марта по 22 апреля и с 6 сентября по 16 октября. Условия 100%-ной недостаточности УФ радиации существуют в период с середины ноября по конец января.

### 3.2. Особенности газовой-аэрозольного загрязнения атмосферы

По данным измерений аэрозольных характеристик атмосферы в МО МГУ в рамках сети AERONET, аэрозольная оптическая толщина (АОТ) на длине волны 500 нм равна 0,18 (табл. 2), что заметно меньше, чем в континентальной аэрозольной модели WCP112 ( $АОТ_{500} = 0,22$ ) [40]. Увеличение АОТ в условиях городского аэрозольного загрязнения по сравнению с данными измерений на Звенигородской научной станции ИФА РАН составляет около 0,02 в видимом диапазоне спектра и существенно увеличивается в зимние месяцы [33].

В сезонном ходе наблюдается типичный для данного региона двойной весенний и летний максимум АОТ. Величина волнового показателя Ангстрема, качественно свидетельствующая о размере частиц, существенно варьируется в течение года с максимумом в теплый период, что указывает на преобладание мелкодисперсного аэрозоля, связанного, вероятно, с процессами вторичного образования частиц (табл. 2). Данные измерений спектральной яркости с помощью фотометра CIMEL сети AERONET также свидетельствуют об этой закономерности [32]. Приземные концентрации аэрозольных частиц размером менее 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ), полученные по данным измерений в экологическом павильоне МО МГУ, тоже достигают значимого максимума в летний период (июнь — август). Меньший по величине максимум концентраций  $PM_{2,5}$  наблюдается и в зимний период (декабрь — февраль). Анализ среднесуточных значений  $PM_{2,5}$  показывает, что в ряде случаев они превышают установленный гигиенический норматив для среднесуточной концентрации. В 2011 г. случаев таких превышений было 4, в 2012 г. — 10, в 2013 г. — 31. Увеличивается и среднегодовая концентрация  $PM_{2,5}$ : в 2011 г. — 14,6, в 2012 г. — 18,5 и в 2013 г. — 21,4 мкг/м<sup>3</sup>. В то же время максимальные разовые значения ПДК  $PM_{2,5}$  за период наблюдений не были превышены.

Рассмотрим сезонный характер вариаций газовых примесей. Для приземного озона характерен сезонный ход концентрации с существенным максимумом в весенние месяцы, а также вторичным максимумом в середине летнего периода. Вариации концентраций NO от года к году демонстрируют максимумы в феврале и сентябре и существенное уменьшение значений в летний период. На сезонный ход CO некоторое влияние оказали существенные аномалии погоды в августе 2002 и 2010 гг., сопровождавшиеся торфяными пожарами в Подмосковье и резким увеличением концентрации CO в Москве. Концентрации диоксида углерода имеют характерный минимум в летний период. Повышенные концен-

трации  $\text{SO}_2$  отмечались в феврале, когда в условиях существенного понижения температуры, в частности, в 2005—2006 гг., на московских ТЭЦ использовали источники резервного топлива (мазута), сжигание которого сопровождалось значительными эмиссиями  $\text{SO}_2$ . Значительный разброс доверительных интервалов концентраций газовых примесей по сравнению с их средними значениями (особенно для  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$ ) объясняется существенными межгодовыми вариациями их концентраций. Аналогичный вывод был сделан в работе [8] по данным ГПБУ “Мосэкомониторинг”.

Предварительный анализ долговременных вариаций концентраций газовых примесей не позволяет однозначно утверждать о наличии их статистически значимых трендов, хотя и существуют тенденции к уменьшению загрязнения атмосферы Москвы оксидами азота и углерода. В то же время отмечается увеличение концентрации  $\text{CO}_2$ , наблюдаемое по всему земному шару. По мере дальнейшего накопления данных наблюдений анализ долговременных трендов будет продолжен.

По сравнению с мегаполисами Евразии и Америки следует отметить весьма умеренный уровень газового загрязнения атмосферы Москвы. В наибольшей степени загрязняют воздух оксиды азота, по содержанию которых Москва сопоставима с крупными городами промышленно развитых стран. При этом концентрация озона, угарного газа и диоксида серы в атмосфере Москвы в среднем существенно меньше, чем в большинстве мировых мегаполисов, и лишь в экстремальных случаях (задымление от природных пожаров) превышает ПДК. По отношению к другим наблюдениям газового состава атмосферы, проводимым в Москве, МО МГУ выгодно отличается относительной удаленностью от авто-трасс и других локальных источников загрязнения, что позволяет более явно отслеживать характерную для города картину загрязнения. При этом осредненные данные наблюдений хорошо согласуются с данными ГПБУ “Мосэкомониторинг”.

Ограниченный объем статьи не позволяет привести более подробный анализ вариаций концентраций газовых примесей в атмосфере Москвы. Детальные сведения об особенностях газового загрязнения воздуха города по данным наблюдений в экологическом павильоне МО МГУ приведены в работах [3—5, 10].

Анализ химического состава атмосферных осадков и их кислотности, проводимый в МО МГУ с 1980 г., демонстрирует их значительную сезонную и межгодовую изменчивость (рис. 5). В среднем за год выпадает 20,7% кислых осадков с  $\text{pH} < 5$ , в теплый период — 31,0%, и только 5,7% проб бывают кислыми в зимний период. В начале наблюдений в 1980—1991 гг. средняя кислотность составляла 4,8  $\text{pH}$ , доля кислых осадков — в среднем около 25% всех выпадающих в году осадков. Однако с 1999 по 2004 г. количество кислотных осадков резко уменьшилось, среднее значение их  $\text{pH}$  за эти годы составило 5,6. С 2005 г. кислотные осадки вновь выпадают в значительном количестве, причем их доля увеличивается год от года. В 2009—2012 гг. третья часть всех проб осадков имела  $\text{pH} < 5,0$ , а среднее  $\text{pH}$  за эти годы было равно 4,8 [12]. Средние годовые значения минерализации осадков изменялись в пределах от 11,8  $\text{мг/л}$  (2001 г.) до 27,0  $\text{мг/л}$  (1991 г.). До конца 1990-х годов средняя минерализация составляла около 20  $\text{мг/л}$ , а в последние годы — около 15  $\text{мг/л}$ . Уменьшение загрязнения осадков происходило в основном из-за уменьшения содержания в них сульфат-ионов, хлоридов, кальция, натрия. В период отсутствия кислотных

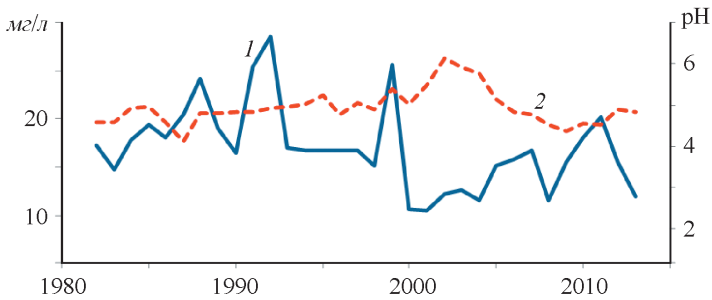


Рис. 5. Минерализация (1) и pH (2) атмосферных осадков в Москве.

осадков (1999—2004 гг.) увеличивалось содержание гидрокарбонат-ионов, а с 2005 г. стало заметно увеличиваться содержание хлоридов. Обычно осадки в районе МГУ относили к сульфатно-кальциевому классу, но в последние годы с связи с уменьшением содержания сульфатов их стали относить к хлоридно-кальциевому классу.

Для оценки пространственных закономерностей химического состава снежного покрова в Москве и Подмоскowie проводится сбор и анализ проб сезонного снега. Установлено, что по мере удаления от Москвы загрязнение сезонного снега постепенно уменьшается, при этом загрязнение снега в центре Москвы в 3 раза больше, чем на ее окраинах и в Подмоскowie. Мощным источником загрязнения снега являются автомагистрали. При этом в городских условиях самые чистые пробы снежного покрова обычно собираются на площадке в МО МГУ, расположенной на территории Ботанического сада [11].

#### 4. Обсуждение и выводы

На основании данных измерений МО МГУ можно сделать вывод о существенном потеплении регионального климата за последние 60 лет с трендом температуры  $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в 1954—2013 гг., увеличившимся до  $0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в 1976—2012 гг. В целом ускорение роста температуры в последние годы соответствует общей мировой тенденции, а сама величина тренда, по данным МО МГУ, близка к тренду температуры в ЦФО, несколько превосходя его [22]. Причинами дополнительного повышения температуры в городе могут служить, например, расширение городской застройки и развитие городской инфраструктуры, вызывающих дополнительное тепловое излучение из-за выбросов тепла от разных промышленных предприятий, ТЭЦ и других источников, что приводит к увеличению не только температуры воздуха, но и содержания в нем водяного пара. Так, по данным AERONET, в Москве по сравнению с пригородом в зимний период года было зафиксировано значимое увеличение влагосодержания атмосферы [33]. По данным измерений МО МГУ также наблюдается положительный тренд нисходящей длинноволновой радиации [2]. Высокоточные измерения этого излучения показали, что именно температура и тесно связанное с ней влагосодержание атмосферы являются наиболее эффективными факторами его увеличения [37]. Отметим, что увеличение нисходящего длинноволнового излучения в городе может также происходить в результате эмиссии в городскую атмосферу других парниковых газов, например  $\text{CO}_2$ . Известно, что концентрация  $\text{CO}_2$  в городах даже с населением чуть более 500 тыс. человек может на 8,5% превосходить содержание диоксида углерода в пригородных районах

[29], однако этот механизм не является определяющим [41]. В свою очередь увеличение длинноволнового излучения приводит к дополнительному увеличению температуры воздуха в крупных городских агломерациях, т. е. работает механизм положительной обратной связи. Такой механизм следует учитывать при объяснении более значительных трендов температуры воздуха в Москве по сравнению с ЦФО. Существенное влияние увеличения длинноволнового нисходящего излучения на положительную динамику температуры воздуха было установлено при исследованиях, проведенных в Швейцарии [38].

Таким образом, в Москве прослеживаются низкочастотные колебания, которые проявляются в изменчивости метеорологических и радиационных величин. По данным наблюдений за химическим составом осадков и кислотностью в течение последних 30 лет установлены периодичность изменения кислотности осадков и преобладание разных ионов в разные периоды наблюдений.

Авторы статьи не имели возможность рассмотреть все особенности климатических изменений в Москве и провести их детальный анализ, но в дальнейшем это планируется сделать. Целью авторов данной статьи было показать общие тенденции изменения климатических и экологических характеристик в Москве и взаимосвязь некоторых из них. Именно проведение комплекса измерений в течение 60 лет позволяет рассматривать все процессы в их взаимосвязи и получать достаточно входных параметров для численных экспериментов на разных мезомасштабных атмосферных моделях.

Авторы выражают благодарность инженерно-техническому персоналу Метеорологической обсерватории МГУ им. М. В. Ломоносова. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-05-00877, 13-05-00956, 14-05-00594) и госконтракта № 0604-31/14.

## Литература

1. **Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В.** Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и ее изменения на территории России. — М., Изд-во ЛКИ, 2008, 192 с.
2. **Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В., Незваль Е. И., Шиловцева О. А.** Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. — М., Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2012, 310 с.
3. **Беликов И. Б., Горбаренко Е. В., Елохов А. С. и др.** Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2011 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ. /Под ред. Н. Е. Чубаровой — М., МАКС Пресс, 2012, 230 с.
4. **Беликов И. Б., Горбаренко Е. В., Еремина И. Д. и др.** Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2010 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ. /Под ред. Н. Е. Чубаровой. — М., МАКС Пресс, 2011, 180 с.
5. **Беликов И. Б., Горбаренко Е. В., Еремина И. Д. и др.** Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2012 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ. /Под ред. Н. Е. Чубаровой. — М., МАКС Пресс, 2013, 207 с.
6. **Горбаренко Е. В.** Многолетние изменения длинноволновой радиации в Москве. — Метеорология и гидрология, 2013, № 10, с. 29—39.
7. **Горбаренко Е. В., Абакумова Г. М.** Вариации радиационного баланса подстилающей поверхности по многолетним наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ. — Метеорология и гидрология, 2011, № 6, с. 42—54.
8. **Горчаков Г. И., Семутникова Е. Г., Зоткин Е. В. и др.** Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006, т. 42, № 2, с. 176—190.
9. **Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 г. — М., Росгидромет, 2013, 86 с.
10. **Еланский Н. Ф., Локощенко М. А., Беликов И. Б. и др.** Изменчивость газовых



примесей в приземном слое атмосферы Москвы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 2, с. 246—259.

**11. Еремина И. Д.** Мониторинг химического состава атмосферных осадков по наблюдениям метеорологической обсерватории МГУ. — Альтернативная энергетика и экология, 2013, № 6 (часть 2), с. 80—87.

**12. Еремина И. Д., Григорьев А. В.** Кислотность и химический состав снежного покрова в Москве и Подмоскowie за период 1999—2006 гг. — Вестник Московского ун-та. Серия 5. География, 2010, № 3, с. 55—60.

**13. Локощенко М. А.** О содарных наблюдениях свободной конвекции. — Вестник Московского ун-та. Серия 5. География, 1995, № 4, с. 43—51.

**14. Локощенко М. А.** Снежный покров и его современные изменения в Москве. — Метеорология и гидрология, 2005, № 6, с. 71—82.

**15. Локощенко М. А.** О метеорологических наблюдениях в обсерватории МГУ и их показательности с учетом местных условий. — Вестник Московского ун-та. Серия 5. География, 2005, № 6, с. 25—31.

**16. Локощенко М. А.** О ветровом режиме нижней атмосферы над Москвой по данным многолетнего акустического зондирования. — Метеорология и гидрология, 2014, № 4, с. 19—31.

**17. Локощенко М. А.** Направление ветра в Москве. — Метеорология и гидрология (в печати).

**18. Махоткина Е. Л.** Цветные пиранометры. — Труды ГГО, 1983, вып. 456, с. 71—77.

**19. Метеорологическая** обсерватория МГУ; <http://momsu.ru>.

**20. Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам. — Л., Гидрометеиздат, 1985, вып. 3, ч. 1.

**21. Никольская Н. П., Евневич Т. В., Янишевский Ю. Д., Луцько Л. В.** Рекомендации по учету светового климата при проектировании естественного освещения. — Строительная светотехника, 1972, вып. 5(19), с. 15—105.

**22. Оценочный** доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — М., Росгидромет, 2008, 28 с.

**23. Розенталь В. А., Чубарова Н. Е., Изакова О. М., Шараев Г. А.** Мониторинг радиационных потоков аппаратно-программным комплексом SUN. — Оптика атмосферы и океана, 1999, т. 12, № 1, с. 82—86.

**24. Справочник** эколого-климатических характеристик Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ). Том 1. Солнечная радиация, солнечное сияние. Метеорологические элементы и явления. Характеристики пограничного слоя атмосферы. /Под ред. А. А. Исаева. — М., Изд-во МГУ, 2003, 302 с.

**25. Чернокульский А. В., Мохов И. И.** Сравнительный анализ характеристик глобальной облачности по различным спутниковым и наземным наблюдениям. — Исследования Земли из космоса, 2010, № 3, с. 12—29.

**26. Чубарова Н. Е.** Мониторинг биологически активной УФ радиации в Московском регионе. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2002, т. 38, № 3, с. 354—365.

**27. Шиловцева О. А., Дьяконов К. Н., Балдина Е. А.** Косвенные методы расчета суммарной фотосинтетически активной радиации по данным актинометрических и метеорологических наблюдений. — Метеорология и гидрология, 2005, № 1, с. 37—47.

**28. Bais A. F., Lubin D., Arola A., et al.** Surface Ultraviolet Radiation: Past, Present and Future./In: Scientific Assessment of Ozone Depletion, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 50, Ch. 7. — Geneva, WMO, 2007.

**29. Büns C. and Kuttler W.** Path-integrated measurements of carbon dioxide in the urban canopy layer. — Atmos. Environ., 2012, vol. 46, pp. 237—247.

**30. Chubarova N. E.** UV variability in Moscow according to long-term UV measurements and reconstruction model. — Atmos. Chem. Phys., 2008, vol. 8, pp. 3025—3031.

**31. Chubarova N. and Nezval' Ye.** Thirty year variability of UV irradiance in Moscow. — J. Geophys. Res., Atmospheres, 2000, vol. 105, pp. 12529—12539.

**32. Chubarova N., Smirnov A., and Holben B. N.** Aerosol properties in Moscow according to 10 years of AERONET measurements at the Meteorological Observatory of Moscow State University. — Geography, Environment, Sustainability (GES), 2011, vol. 4, No. 1, pp. 19—32.

**33. Chubarova N. Y., Sviridenkov M. A., Smirnov A., and Holben B. N.** Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects. — Atmos. Meas. Tech., 2011, No. 4, pp. 367—378; [www.atmos-meas-tech.net/4/367/2011/](http://www.atmos-meas-tech.net/4/367/2011/) doi: 10.5194/amt-4-367-2011.

**34. Chubarova N. and Zhdanova Ye.** Ultraviolet resources over Northern Eurasia. — J.

Photochemistry and Photobiology B: Biology, Elsevier BV (Netherlands), 2013, vol. 127, pp. 38—51.

**35. European** Monitoring and Evaluation Programme, EMEP Assessment, Part II: National Contributions. /J. Bartnicki and G. E. Lövblad (eds.). — Oslo, Norw. Meteorol. Inst., 2004, 244 p.

**36. Lokoshchenko M. A., Yavlyayeva E. A., and Kirtzel H.-J.** Sodar data about wind profiles in Moscow city. — Meteorologische Zeitschrift, 2009, vol. 18, No. 3, pp. 321—330.

**37. Nezval E. I., Chubarova N. E., Groebner J., and Omura A.** Influence of atmospheric parameters on downward longwave radiation and features of its regime in Moscow. — Izv., Atmos. and Oceanic Physics, 2012, vol. 48, No. 6, pp. 610—617.

**38. Philipona R.** Greenhouse warming and solar brightening in and around the Alps. — In-

tern. J. Climatology, 2012, vol. 33, pp. 1530—1537.

**39. Ruckstuhl C., Philipona R., Behrens K., et al.** Aerosol and cloud effects on solar brightening and the recent rapid warming. — Geophys. Res. Lett., 2008, vol. 35, L12708; doi: 10.1029/2008GL034228.

**40. World** Meteorological Organization, Radiation Commission, A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computations. — WCP-112, WMO/TD-24, World Clim. Res. Programme, Int. Assoc. for Meteorol. and Atmos. Phys., Geneva, 1986, 53 p.

**41. Yamada K., Hayasaka T., and Iwabuchi H.** Contributing Factors to Downward Longwave Radiation at the Earth's Surface. — SOLA, 2012, vol. 8, pp. 094—097; doi: 10.2151/sola.2012-024.

**42. www.licor.com.**

Поступила  
21 V 2014

## CLIMATIC AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS IN MOSCOW MEGALOPOLIS ACCORDING TO MOSCOW STATE UNIVERSITY METEOROLOGICAL OBSERVATORY DATA OVER 60 YEARS

N. E. Chubarova, E. I. Nezval', I. B. Belikov, E. V. Gorbarenko, I. D. Eremina, E. Yu. Zhdanova, I. A. Korneva, P. I. Konstantinov, M. A. Lokoshchenko, A. I. Skorokhod, and O. A. Shilovtseva

*Analyzed are the results of meteorological and environmental measurements over the 60-year period (1954–2013) at the Lomonosov Moscow State University Meteorological Observatory. The significant positive temperature trend (0.04°C/year for 1954–2013) was obtained which increased up to 0.07°C/year in 1976–2012. Considered are the features of seasonal variations of different atmospheric characteristics. Discussed are the type and causes of low-frequency changes in meteorological parameters, radiation balance components, radiation in different spectral ranges, and chemical composition of precipitation. Demonstrated are possible mechanisms of the observed more significant increase in air temperature in Moscow as compared with that in Central Federal District and their connection with the greenhouse effect in the urban atmosphere.*