

ЭКСТРЕМУМЫ И ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА МОСКВЫ

Е.В. Горбаренко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: catgor@mail.ru

Представленная работа продолжает исследование причин климатических изменений в Московском регионе на базе наблюдений МО МГУ. Проведен анализ многолетней динамики основного климатообразующего фактора – радиационного режима атмосферы. На протяжении 65-летнего периода наблюдений на фоне квазипериодических изменений отмечены значимые тенденции для всех радиационных параметров атмосферы, наиболее выраженные в зимний период. Наибольший рост на 26, 16 и 49% отмечен для среднегодовых значений и на 73, 41 и 34% для зимних значений радиационного, длинноволнового балансов и температуры поверхности почвы соответственно. В XXI в. усилились тенденции уменьшения аэрозольной мутности атмосферы, роста прямой и уменьшения рассеянной радиации. Практически вдвое увеличилась скорость повышения длинноволнового и радиационного баланса, температуры поверхности почвы. В отсутствии значительных вулканических извержений главным естественным фактором стал «парниковый эффект» облачности. Антропогенная составляющая аэрозольной мутности в последние годы существенно снизилась, что связано с рядом мер правительства Москвы по улучшению экологии в городе. Антропогенное влияние на радиационный режим в городе проявилось в усилении длинноволновых потоков, что привело к росту интенсивности «острова тепла» в XXI в.

Ключевые слова: мониторинг, радиационные потоки, облачность, аэрозоль, альbedo, изменение климата

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-90-103

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки климатических изменений и понимания их причин первостепенное значение имеет обобщение и анализ результатов мониторинга за метеорологическими величинами и климатообразующими факторами. Основой такого мониторинга являются репрезентативные, однородные, долговременные ряды данных, получаемые на сети наземных метеорологических и актинометрических станций.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова стал одним из первых университетов в мире, где в 1808 г. начались регулярные метеорологические наблюдения, которые продолжались до августа 1812 г. С тех пор наблюдения в МГУ возобновлялись неоднократно, но были эпизодическими и проводились на разных площадках [Шиловцева, 2014]. При формировании новой территории МГУ на Ленинских горах для практического обучения студентов географического факультета была построена и оснащена самым передовым оборудованием метеорологическая обсерватория (МО МГУ). В настоящее время МО МГУ является единственной станцией России, где более 65 лет проводится уникальный комплекс актинометрических наблюдений. МО МГУ входит в российскую актинометрическую сеть, а также в Мировой центр радиационных данных (МЦРД) ([http://wrdc.mgo.](http://wrdc.mgo.rssi.ru)

[rssi.ru](http://wrdc.mgo.rssi.ru)). Данные МО МГУ используются в оценочных докладах Росгидромета об изменениях климата и в мировых обзорах тенденций изменчивости радиационных потоков [Второй оценочный..., 2014; Wild, 2009; Ohmura, 2009].

В 2020 г. по гранту на обновление приборной базы в рамках федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» национального проекта «Наука» в МО МГУ был поставлен комплекс актинометрических приборов голландской фирмы Kipp & Zonen. Приборами этой фирмы оснащена сеть базовых станций по исследованию радиационных процессов (BSRN) мирового радиационного центра [Schmithüsen et al., 2019]. Модернизация актинометрического комплекса МО МГУ позволит соответствовать мировым исследованиям в этой области и продлить уникальный многолетний мониторинг за радиационным режимом атмосферы, начатый в МО МГУ в 1955 г.

Представленная работа продолжает исследование причин климатических изменений в Московском регионе на базе наблюдений МО МГУ [Абакумова и др., 2012; Климат Москвы..., 2017]. Проведен анализ многолетней (1955–2020) динамики основного климатообразующего фактора – радиационного режима атмосферы. Оценены особенности радиа-

ционного режима в XXI в. Рассмотрены изменения 30-летних климатических норм радиационных параметров атмосферы. Выделены и оценены их экстремальные сезонные и годовые значения, многолетние изменения. Экстремальные значения, выбранные за большой период наблюдений, определяют возможные пределы естественной изменчивости климата региона. Направленные тенденции – тренды отражают современные климатические изменения, вызванные естественными и антропогенными процессами. Исследование сезонной структуры трендов дает возможность через влияние облачности, отражающей особенности региональной циркуляции атмосферы на радиационные потоки, оценить важный естественный фактор изменения климата – изменение общей циркуляции атмосферы. Климатические изменения, вызванные естественными факторами, усиливаются городской средой [Кислов и др., 2017]. Это влияние прослеживается при подробном анализе временных рядов радиационных потоков и факторов, определяющих их изменчивость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

За основу работы взяты инструментальные ежедневные наблюдения МО МГУ за потоками интегральной солнечной радиации: прямой (S), рассеянной (D), суммарной (Q), отраженной (R_k); за радиационным балансом (B) и его длинноволновой составляющей (B_d). Составляющие длинноволнового баланса – собственное излучение поверхности и противоизлучение атмосферы (E_a) – рассчитываются. По данным регистрации рассчитываются часовые, суточные, месячные и годовые суммы радиации. В конце каждого месяца формируется электронная база данных и электронная версия «Бюллетеня МО МГУ».

В качестве факторов, регулирующих изменчивость потоков, в работе рассмотрены: продолжительность солнечного сияния в часах (ПСС), балл общей (N) и нижней (n) облачности, форма облаков, аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ), температура и альbedo (A) подстилающей поверхности. Подробное описание приборов и методов измерений приведено на сайте МО МГУ (www.momsu.ru).

Анализ многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы проведен для месячных, сезонных и годовых значений. Значения сумм радиационных потоков приведены в МДж/м². Динамика их климатических норм, в соответствии с требованиями ВМО, рассмотрена за 30-летние периоды (1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020). В работе [Gorbarenko, 2016] было показано, что, начиная с середины 1990-х гг., для многих радиационных параметров отмечаются значимые тенденции, отличные от прошлых лет. Представляется инте-

ресным проследить, сохраняются ли эти тенденции в последние десятилетия. Особенности радиационного режима XXI в. оценены путем сравнения между собой норм 1961–1990 и 1991–2020 и оценки относительно этих норм средних значений радиационных параметров за период с 2000 по 2020 г. Сравнение произведено по следующим формулам:

$$d = (\text{норма (1991–2020)} - \text{норма (1961–1990)}) / \text{норма (1961–1990)} \cdot 100\%;$$

$$d_1 = (\text{среднее (2000–2020)} - \text{норма (1961–1990)}) / \text{норма (1961–1990)} \cdot 100\%;$$

$$d_2 = (\text{среднее (2000–2020)} - \text{норма (1991–2020)}) / \text{норма (1991–2020)} \cdot 100\%.$$

Аномалии радиационного баланса и температуры воздуха оценивались как отклонения соответствующих величин от текущей нормы 1981–2010, выраженные в процентах. Для анализа условий изменений атмосферной циркуляции использовались временные ряды среднемесячных значений индексов атмосферной циркуляции – STANDARDIZED NORTHERN HEMISPHERE TELECONNECTION INDICES (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>), среди которых выделены следующие циркуляционные моды: Североатлантический (NAO), Полярно-Евразийский (Polar-Eurasia – POL), Скандинавский (Scandinavian – SCAN), Восточно-Атлантический (East Atlantic – EA), Восточно-Атлантический – Западно-Российский (East Atlantic – West Russia – EAWR).

Временные ряды аппроксимировались линейными функциями и полиномиальными уравнениями второго порядка. Оценка линейных трендов осуществлялась методом наименьших квадратов. Рассчитывалась относительная величина тренда $\Delta = (\Delta y / y_1) 100\%$. Где $\Delta y = y_n - y_1$ – общее линейное изменение параметра за рассматриваемый период; y_1 и y_n – значения параметра в первый и последний годы рассматриваемого периода, рассчитанные по уравнению линейного тренда ($y = ax + b$). Статистическая значимость линейного тренда оценивалась с помощью критерия Стьюдента. В качестве характеристик тренда в работе приведены коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость соответствующей тренду переменной, отнесенный к 10 годам ($a \cdot 10$), уровень значимости (P) и относительная величина тренда в процентах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетняя изменчивость факторов, определяющих приход и перераспределение радиационных потоков. Величины радиационных потоков в определенной точке земной поверхности зависят от ее географических координат, высоты солнца,

состояния атмосферы и подстилающей поверхности. Отклонения радиационных потоков от периодического хода являются откликом на колебания факторов, определяющих их изменчивость. Причины временной изменчивости этих факторов опосредованно определяют и изменчивость радиационных потоков.

Основной естественный процесс, влияющий на приход и перераспределение радиации, – режим облачности. За 1965–2020 гг. на фоне квазипериодических изменений количества облаков наблюдается значимый линейный тренд к увеличению средних годовых значений балла общей и нижней облачности (табл. 1; рис. 1А, 2А). В период последних 30 лет относительно периода 1961–1990 гг. разница (d) в среднем за год составила 3% как для общей, так и для нижней облачности, прежде всего за счет роста на 6 и 14% балла общей и нижней облачности в зимний период (табл. 2). Тенденция к увеличению общей облачности отмечается во все сезоны года. В XXI в. тенденция увеличения общей облачности сохранилась ($d_2 = 1\%$), для нижней облачности изменилась на противоположную ($d_2 = -1\%$) (табл. 1, 2; рис. 3А). При аппроксимации линейной зависимостью годовых значений ПСС за 1955–2020 гг. отмечается значимая положительная тенденция с увеличением на 20 часов в 10 лет. В годовых значениях она проявилась в основном за счет роста ПСС в весенние и летние, в меньшей степени осенние месяцы года, d равнялось 9, 6, и 4% соответственно (см. табл. 1, 2). Казалось бы, в тенденциях этих метеорологических величин есть несоответствие. Однако для облаков нижнего яруса, оказывающих основное влияние на ПСС для пяти месяцев в году, наметилась тенденция уменьшения балла. Наибольшее уменьшение на 1,4 балла за 10 лет наблюдалось в апреле, на 0,8 балла в августе и 0,3 балла в октябре (рис. 4А). Климатическая норма балла нижней облачности 1991–2020 гг., с весны до осени уменьшилась по сравнению с нормой 1961–1990 гг., d составило –5, –4, –2% соответственно (см. табл. 1; рис. 3А). Это уменьшение произошло за счет существенного снижения с середины 1990-х гг. повторяемости пасмурного (10/10 балла) неба, а также уменьшения повторяемости слоисто-дождевой облачности. Подобная тенденция проявилась в разных регионах [Второй оценочный доклад..., 2014; Chernokulsky et al., 2016; Foster et al., 2020]. Основным фактором изменчивости облачности является крупномасштабная атмосферная циркуляция, которая описывается индексами атмосферной циркуляции (АЦ). Их временная изменчивость играет важную роль в современных климатических изменениях Северного полушария [Кононова, 2013; Попова и др., 2018]. Для Северного полушария во внетропических широтах наиболее

значительно влияние индексов NAO и SCAN. При рассмотрении связи между количеством нижней облачности и индексами АЦ, характеризующими зональные и меридиональные залоки, обнаруживается ее внутригодовая изменчивость (табл. 3). В зимние месяцы повышение как общей, так и нижней облачности связано с повышением индекса NAO. Для нижней облачности эта связь более значима, при таких ситуациях, как правило, образуется дождевая облачность. NAO в основном определяет режим зимнего сезона, в летний период его влияние на облакообразование ослабевает, большую роль играет термическая конвекция. Усиление меридиональной составляющей циркуляции SCAN в течение всего года определяет уменьшение количества облачности, что связано с большей повторяемостью малооблачной погоды. Интересно сопоставить тренды балла нижней облачности с трендами основных индексов, определяющих синоптические особенности региона (см. рис. 2А). В межгодовой изменчивости периоды роста облачности совпадают с повышением индекса NAO и понижением индекса SCAN. Такие изменения индексов отражают преобладание зональной циркуляции. В эти же периоды отмечается понижение суммарного солнечного потока, о чем будет сказано ниже. Малооблачная погода в большей степени наблюдается при отрицательных фазах индекса NAO и увеличении индекса SCAN, при усилении меридиональной составляющей циркуляции. Ярким примером стало лето 2010 г. В течение почти всего июля и до 18 августа над всей ЕТР установился обширный, малоподвижный, блокирующий антициклон, сохранялась аномально жаркая погода. Москву накрыла дымная мгла, что привело к экстремальному аэрозольному загрязнению атмосферы. Подобные ситуации в Москве наблюдались и ранее, в 1972 и 2002 гг. В период дымной мглы от лесных и торфяных пожаров в августе 2010 г. среднее месячное значение АОТ (0,90) было наибольшим месячным значением АОТ, а значение АОТ (3,29) 7 августа – наибольшим суточным значением за весь период наблюдений МО МГУ. Сезонный летний максимум отмечен в 2010 г. (см. табл. 2).

Аэрозольная составляющая прозрачности атмосферы для солнечных лучей играет важную роль в изменении радиационных потоков в безоблачной атмосфере. Межгодовые колебания АОТ вызваны прежде всего влиянием естественных факторов. Экстремальные годовые значения АОТ наблюдались в периоды извержений вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991) – самых мощных взрывных извержений, оказавших глобальное влияние на загрязнение атмосферы в последующие два года (см. табл. 2, рис. 3Б). Годовой максимум АОТ (0,33) в 1983 г. соответствовал периоду наибольшего

Таблица 1

**Статистические характеристики сезонных и годовых значений
радиационных параметров атмосферы (1955–2020)**

Статистические характеристики	Радиационные параметры атмосферы									
	<i>N</i>	<i>n</i>	АОТ	ПСС	<i>t_n</i>	<i>A</i>	<i>Q</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B_d</i>
	балл			час	°C	%	МДж/м²			
<i>Зима</i>										
Среднее	8,7	7,2	0,13	38	−7,7	59	75,1	46,1	−23,0	−51,9
Мин.	6,6	4,0	0,02	15	−14,0	39	50,7	25,7	−55,7	−89,7
Макс.	9,5	8,4	0,33	74	−2,7	76	102,3	68,3	−3,7	−28,3
<i>V</i> , %	7	13	61	29	33	11	14	19	46	25
Год, мин.	1969	1969	1989	1960	1969	2008	1990	2008	1969	1969
Год, макс.	2000	2000	1966	1969	2020	1959	1969	1969	2013	2013
<i>a</i> ·10	0,19	0,3	−0,03	−0,90	0,47	−1,70	−2,5	−2,77	4,4	4,2
<i>P</i>	0,99	0,99	0,99	0,80	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
<i>Весна</i>										
Среднее	7,7	5,1	0,21	196	6,3	29	420,6	108,4	159,1	−153,2
Мин.	6,7	3,7	0,08	148	−4,0	21	360,7	74,7	121,3	−182,0
Макс.	8,7	6,3	0,47	266	10,3	41	503,0	181,7	212,7	−113,3
<i>V</i> , %	6	11	38	12	36	18	7	18	12	10
Год, мин.	1972	2014	2018	1955	1954	1995	1974	2008	1994	1960
Год, макс.	1966	1980	1983	2002	1975	1963	1963	1963	2014	2012
<i>a</i> ·10	0,06	−0,03	−0,02	4,40	0,53	−0,18	0,87	−0,44	4,8	3,5
<i>P</i>	0,8	0,5	0,99	0,99	0,99	0,40	0,4	0,35	0,99	0,99
<i>Лето</i>										
Среднее	7,3	271	0,21	271	21,0	20	561,3	112,7	273,8	−174,8
Мин.	5,7	213	0,09	213	16,7	16	500,3	93,7	238,0	−233,0
Макс.	8,3	324	0,43	324	26,7	24	627,0	138,7	326,0	−137,0
<i>V</i> , %	8	11	32	11	9	8	6	9	7	12
Год, мин.	1972	1980	>3 лет	1980	1962	2002	1976	2003	1993	1992
Год, макс.	1987	2011	2010	2011	2010	1965	1972	2015	2011	2020
<i>a</i> ·10	0,14	−0,006	−0,02	2,40	0,39	−0,21	0,99	−0,93	4,6	2,7
<i>P</i>	0,99	0,10	0,99	0,80	0,99	0,95	0,4	0,8	0,99	0,95
<i>Осень</i>										
Среднее	8,6	6,9	0,14	87	5,2	26	164,0	36,4	36,6	−91,0
Мин.	7,3	5,0	0,02	51	1,0	17	114,3	23,3	18,7	−125,7
Макс.	9,4	8,4	0,34	131	8,3	38	213,3	48,0	57,3	−61,7
<i>V</i> , %	5	10	45	21	29	19	11	17	25	14
Год, мин.	1975	1967	2013	1960	1993	2008	2013	2013	1973	1967
Год, макс.	2013	1997	1984	2018	2020	1960	1967	1965	2009	2013
<i>a</i> ·10	0,07	−0,005	−0,01	0,50	0,3	−1,37	−1,47	−1,67	2,8	2,6
<i>P</i>	0,95	0,10	0,99	0,35	0,99	1	0,75	0,99	0,99	0,99
<i>Год</i>										
Среднее	8,1	6,0	0,18	1776	6,3	25	3663	911	1338	−1413
Мин.	8,3	6,0	0,12	1868	7,3	25	3683	893	1490	−1298
Макс.	7	4,8	0,08	1478	4	19	3346	682	1117	−1726
<i>V</i> , %	8,6	6,8	0,33	2169	8,6	32	4065	1239	1690	−1061
Год, мин.	1972	1967	2017, 2018	1980	>3 лет	2002	1990	2008	1980	1967
Год, макс.	>3 лет	>3 лет	1983	2014	2020	2013	1963	1963	2014	2013
<i>a</i> ·10	4	8	33	9	19	10	5	11	11	10
<i>P</i>	0,1	0,06	−0,02	20	0,38	−0,3	−6	−17	50	40

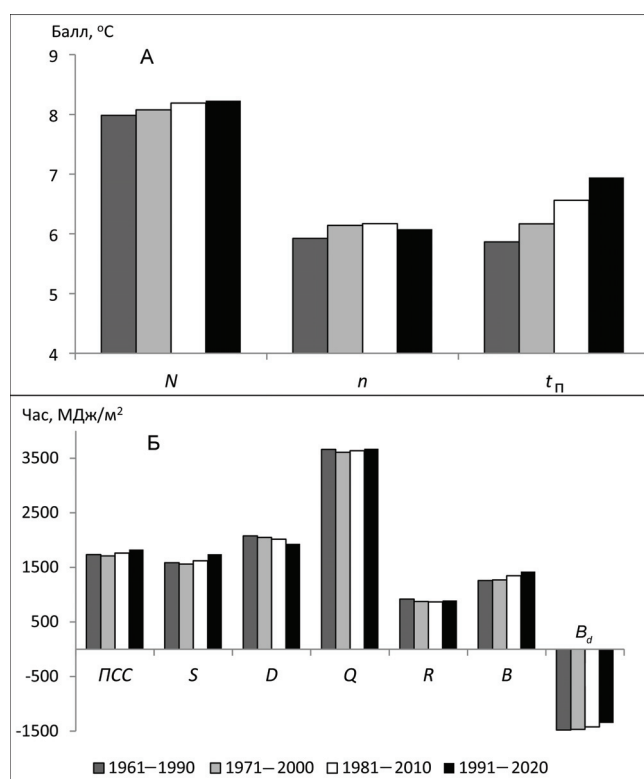


Рис. 1. Изменение климатических норм средних годовых значений: А – балл общей (N), нижней (n) облачности, температуры поверхности почвы (t_n , °C); Б – продолжительность солнечного сияния (ПСС, час), прямой на горизонтальную поверхность (S , МДж/м²), рассеянной (D , МДж/м²), суммарной (Q , МДж/м²), отраженной (R , МДж/м²) солнечной радиации, радиационного баланса (B , МДж/м²), длинноволнового баланса (B_d , МДж/м²)

Fig. 1. Change in climatic norms of average annual values: А – total cloudiness (N , cloud amount), low (n , cloud amount) cloudiness, soil surface temperature (t_n , °C); Б – sunshine duration (SSD, hour), direct on a horizontal surface (S , MJ/m²), diffuse (D , MJ/m²), total (Q , MJ/m²), reflected (R , MJ/m²) solar radiation, radiation balance (B , MJ/m²), longwave balance (B_d , MJ/m²)

влияния стратосферного аэрозоля вулканического происхождения, достигшего Московского региона [Горбаренко, 2019]. Наибольший рост АОТ, вызванный метеорологическими условиями, наблюдается при длительном их влиянии. В зимний период увеличение АОТ обусловлено ростом повторяемости приземных инверсий, при их существовании в течение нескольких дней АОТ повышается в 3–5 раз от среднего уровня. Минимальные годовые (0,08) и сезонные (0,02; 0,08) значения АОТ связаны с преобладанием чистых арктических воздушных масс и с благоприятными условиями, способствующими быстрому вымыванию аэрозоля из атмосферы. Городская среда оказывает влияние на аэрозольное загрязнение, однако, выделить антропогенную составляющую АОТ непросто из-за большой естественной ее изменчивости. Антропогенное влияние на аэрозольное загрязнение города возможно оценить в сравнении АОТ города и пригорода. В период с 1955 по 1985 г. разница в аэрозольном загрязнении города с пригородом, как в Москве и Подмоскowie, так и в других городах, достигала 30%, в последую-

щие годы разница сократилась до нескольких процентов. С середины 1980-х гг. в результате резкого сокращения промышленного производства в Москве и в России антропогенное загрязнение уменьшилось [Битюкова и др., 2017]. Начиная с 1994 г., после полного очищения атмосферы от вулканического аэрозоля средние месячные, сезонные и годовые значения АОТ значительно снижаются во все сезоны, особенно в последние годы (см. табл. 1; рис. 2Б, 3Б). Средние годовые значения АОТ в XXI в. на 40–60% ниже нормы 1961–1990 гг., значения АОТ в 2017 и 2018 гг. (0,08) стали абсолютными годовыми минимумами за весь период наблюдений. Аналогично с многолетними изменениями АОТ по данным МО МГУ меняется общая минерализация осадков [Еремина и др., 2014]. По данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» наблюдается отрицательная динамика основных веществ, загрязняющих воздушную среду Москвы (<http://www.mosecom.ru>). Уменьшение антропогенной составляющей аэрозольной мутности явилось отражением действий правительства Москвы по улучшению экологии

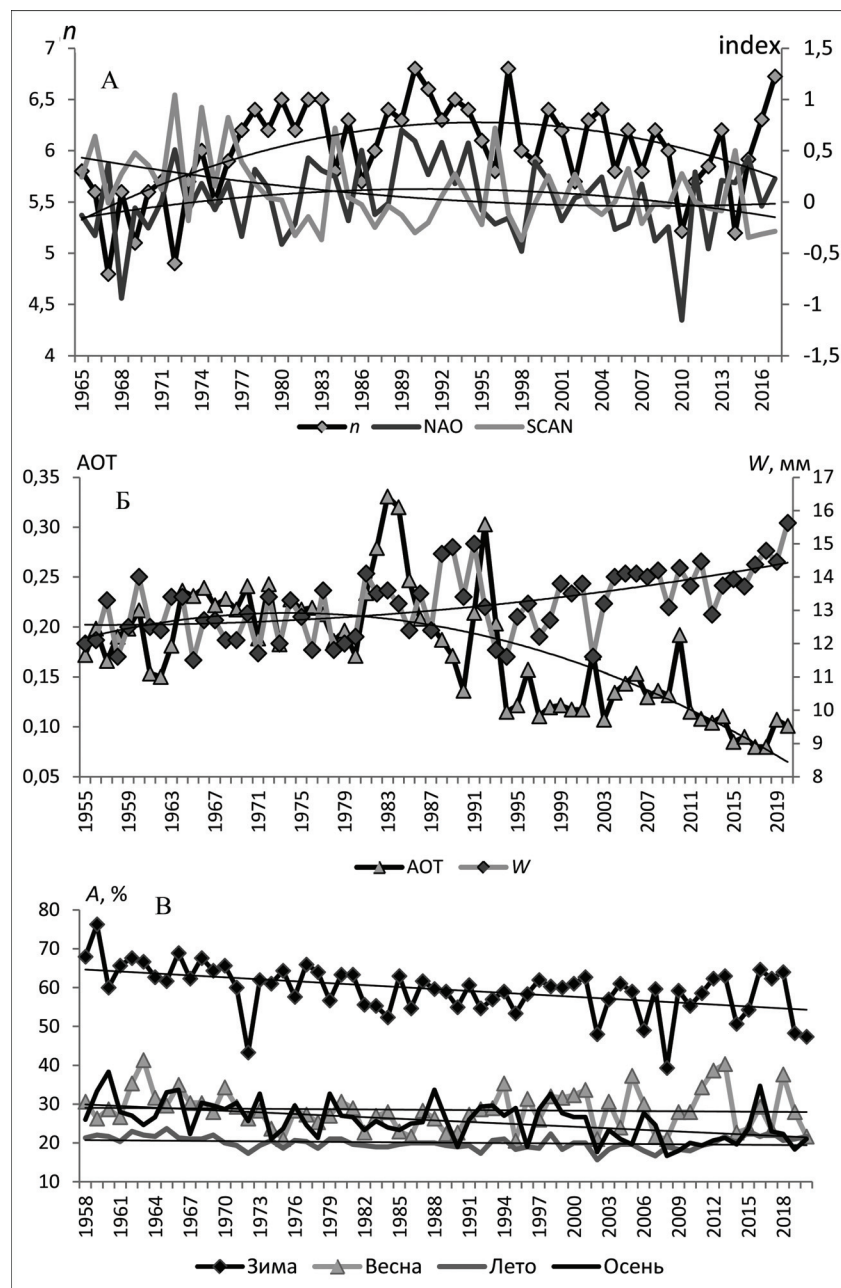


Рис. 2. Многолетние изменения метеорологических характеристик: А – средние годовые значения балла нижней облачности и индексов атмосферной циркуляции атмосферы; Б – средние годовые значения аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) и общего влагосодержания атмосферы (W , мм); В – сезонные значения альbedo (A , %) подстилающей поверхности. Тонкие черные кривые – линии тренда

Fig. 2. Long-term changes of meteorological parameters: А – average annual values of the lower cloud cover and atmospheric circulation indices; Б – average annual values of the aerosol optical thickness of the atmosphere (AOT) and the total moisture content of the atmosphere (W , mm); В – seasonal values of albedo (A , %) of the underlying surface. Thin black curves are trend lines

города [Доклад..., 2020]. Снижение АОТ зафиксировано на большинстве станций сети АЭРОНЕТ и на всех станциях АЭРОНЕТ, расположенных в Европе [Li et al., 2014]. При отсутствии вулканического аэрозоля единообразие в тенденциях изменения АОТ в Европе свидетельствует о существенной роли глобальных процессов, связанных с изменениями общей циркуляции атмосферы Северного

полушария. Влажная составляющая интегральной прозрачности атмосферы увеличивается, так как с ростом температуры воздуха растет содержание водяного пара в атмосфере. Влагосодержание атмосферы (W) в Москве значительно увеличивается со скоростью 0,3 мм в 10 лет (см. рис. 2Б), подобная тенденция отмечена и в других климатических регионах [Obregón et al., 2021].

Таблица 2

**Сравнение норм радиационных параметров и отклонение их средних значений за 2000–2020 гг.
от норм 1961–1990 и 1991–2020 гг., %**

	Радиационные параметры атмосферы										
	N	n	AOT	ПСС	t_{Π}	S	D	Q	R	B	B_d
<i>Зима</i>											
d	6	14	–57	–13	24	–14	–11	–12	–17	48	26
d_1	7	14	–64	–12	27	–10	–13	–12	–18	61	32
d_2	1	0	–18	1	4	4	–2	–1	–2	24	9
<i>Весна</i>											
d	2	–2	–39	9	11	13	–6	2	5	9	6
d_1	2	–5	–47	13	15	18	–9	3	6	15	9
d_2	0	–3	–13	3	4	4	–2	1	1	5	4
<i>Лето</i>											
d	4	–3	–31	6	7	10	–7	1	–2	7	5
d_1	5	–4	–34	8	8	12	–8	2	–1	9	7
d_2	2	–2	–5	2	1	2	–1	0	1	2	3
<i>Осень</i>											
d	1	–1	–33	4	17	4	–6	–2	–10	29	10
d_1	2	–2	–40	6	28	6	–7	–3	–14	43	14
d_2	1	–1	–9	2	9	1	–2	–1	–5	11	4
<i>Год</i>											
d	3	3	–38	6	18	10	–7	0	–3	13	9
d_1	4	1	–44	8	24	13	–9	1	–3	19	12
d_2	1	–1	–10	2	4	3	–2	0	0	5	4

Наиболее значимые сезонные различия отмечаются в состоянии подстилающей поверхности. Отражательные свойства подстилающей поверхности характеризует альbedo. На площадке МО МГУ самые высокие значения ($A > 75\%$) отмечаются для свежеснежного покрова, самые низкие (10–11%) – для поверхности, покрытой прошлогодней травой. Загрязнение снега приводит к уменьшению его альbedo более чем на 20%. Увлажнение всех видов поверхностей уменьшает их альbedo на 1–2% [Абакумова и др., 2012]. Снижение альbedo зимой связано с повышением температуры воздуха в зимние месяцы, увеличением повторяемости оттепелей, что приводит к изменению структуры снега. В последние десятилетия в холодный период альbedo все чаще не соответствует альbedo снега. Так, в декабре 2019 г. не отмечено ни одного дня со снежным покровом. Декабрьское значение альbedo 18% характеризует отражательные свойства зеленой травы. Это значение A и месячная сумма отраженной радиации в 2019 г. (4 МДж/м²) стали минимальными значениями за весь период наблюдений. В период установления и схода снежного покрова отмечается

наибольшая изменчивость значений A , коэффициент вариации (V) весной составил 18%, осенью – 19% (см. рис. 2В; табл. 2). В последние годы дата окончательного схода снежного покрова смещается на все более ранние сроки, а установление – на все более поздние, что приводит к уменьшению периода со снежным покровом. Наибольшее число дней со снежным покровом (170) наблюдалось в 1976 г., наименьшее (92) – в 2020-м. Бесснежный октябрь и ноябрь стали для Москвы нормой. Значения альbedo согласуются с изменением температуры поверхности почвы, для которой отмечается значимый рост (с уровнем значимости 0,99) на протяжении всего периода наблюдений во все сезоны года. Скорость роста средних годовых значений температуры почвы в целом за весь период наблюдений – 0,4, в XXI в. – 0,6°C в 10 лет. Наибольший рост произошел в зимний ($d=24\%$, $d_1=27\%$, $d_2=4\%$) и осенний ($d=17\%$; $d_1=28\%$, $d_2=9\%$) периоды (см. табл. 1, 2; рис. 1А, 3Ж). Зима, осень и в целом 2020 г. стали рекордными по температуре почвы и воздуха в Москве и в среднем по всему земному шару. Интересной особенностью весны 2013, 2016, 2018, 2019 гг.

стал сход снежного покрова в марте и установление снежного покрова в первой декаде апреля. С этим явлением связано повышение значений альбедо в период климатической нормы 1991–2020 гг. относительно предыдущей с 24 до 25%.

Многолетняя изменчивость радиационных потоков. Изменения облачного покрова, а следовательно, и продолжительности солнечного сияния

приводит к существенным изменениям радиационных потоков [Фейгельсон, Краснокутская, 1978; Li et al., 2020; Orsini et al., 2002; Wan et al., 2021]. Коэффициенты корреляции между потоками Q , B_d и баллом общей облачности значимы и имеют обратный годовой ход (см. рис. 4Б). Увеличение облачности в летние месяцы приводит к уменьшению суммарной радиации и месячных сумм радиационного

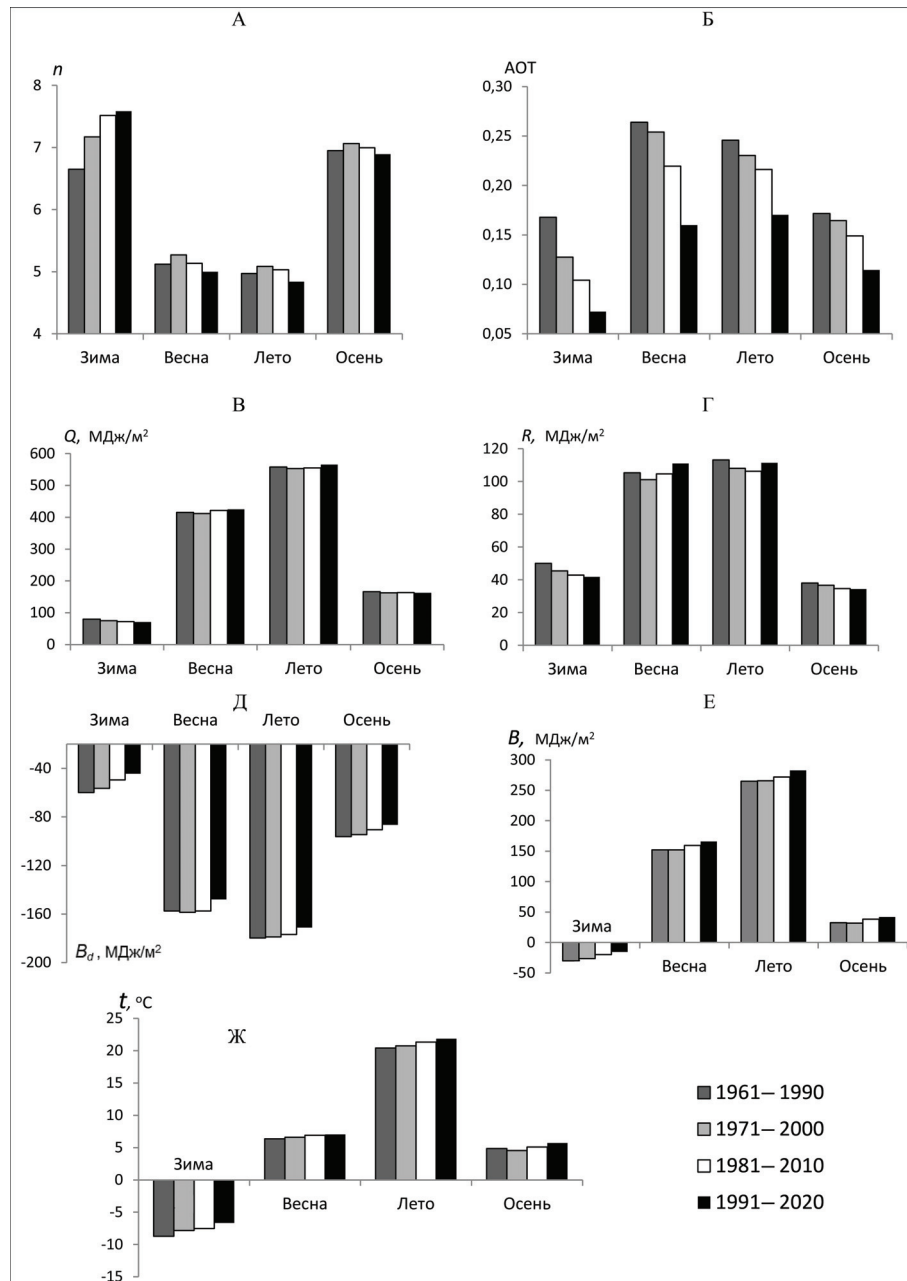


Рис. 3. Изменение сезонных климатических норм: А – балл нижней облачности (n); Б – аэрозольная оптическая толщина атмосферы (AOT); В – суммарная солнечная радиация (Q); Г – отраженная солнечная радиация (R , MJ/m²); Д – длинноволновый баланс (B_d , MJ/m²); Е – радиационный баланс (B , MJ/m²); Ж – температура поверхности почвы (t_p , °C)

Fig. 3. Changes in seasonal climatic norms: А – lower cloudiness score (n); Б – aerosol optical thickness of the atmosphere (AOT); В – total solar radiation (Q , MJ/m²); Г – reflected solar radiation (R , MJ/m²); Д – longwave balance (B_d , MJ/m²); Е – radiation balance (B , MJ/m²); Ж – soil surface temperature (t_p , °C)

Таблица 3

Годовой ход коэффициентов корреляции между баллом нижней облачности и индексами атмосферной циркуляции

Индекс	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
NAO	0,40	0,40	0,28	0,06	-0,16	-0,08	0,04	-0,17	-0,16	-0,08	-0,02	0,31
EA	0,27	0,28	0,05	-0,16	-0,28	0,05	-0,21	-0,14	0,05	-0,07	0,41	0,13
WP	0,18	0,24	-0,22	0,09	0,39	0,33	0,34	0,14	0,26	0,06	-0,06	0,01
PNA	0,21	0,24	-0,07	0,15	-0,10	-0,03	-0,12	-0,33	-0,19	-0,38	0,00	0,10
SCAN	-0,45	-0,44	-0,18	-0,10	-0,33	-0,26	-0,15	-0,29	-0,43	-0,07	-0,24	-0,08
POL	0,19	-0,10	-0,16	-0,12	-0,28	-0,28	-0,37	-0,35	-0,48	-0,10	0,02	-0,06

Примечание. Полужирным указаны значимые коэффициенты корреляции.

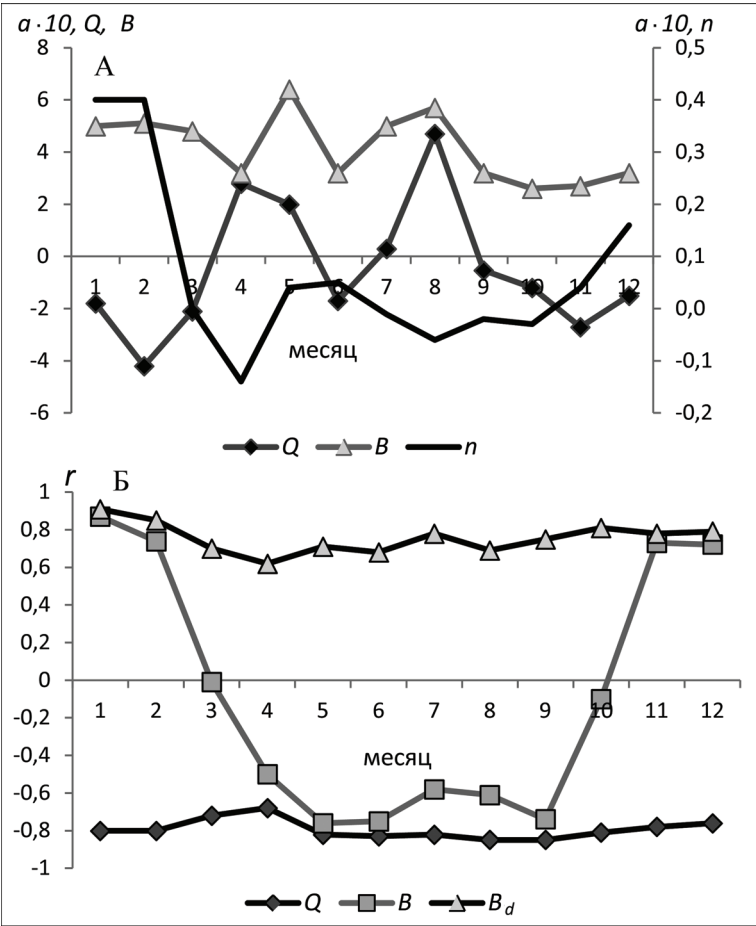


Рис. 4. Годовой ход радиационных характеристик: А – трендов ($a \cdot 10$) суммарной радиации, радиационного баланса и балла нижней облачности; Б – коэффициента корреляции (r) между баллом общей облачности и потоками (суммарная радиация (Q , МДж/м²), длинноволновый баланс (B_d , МДж/м²), радиационный баланс (B , МДж/м²))

Fig. 4. Annual variation of radiation parameters: А – characteristics of trends ($a \cdot 10$) of total radiation, radiation balance and low cloudiness; Б – correlation coefficient (r) between the total cloud cover and the streams (total radiation (Q , MJ/m²), longwave balance (B_d , MJ/m²), radiation balance (B , MJ/m²))

баланса, в зимние, за счет значительного парникового эффекта облачности, – к росту его длинноволновых составляющих. Во временной изменчивости годовых сумм суммарной радиации с 1955 г. прослеживается тенденция к понижению ее значений, ко-

торая в конце 1980-х гг. сменилась ростом. Периоды изменения Q , связанные с изменениями облачности и прозрачности атмосферы, описаны в научной литературе как global dimming и brightening. Наблюдения мировой сети показывают, что потепление,

вызванное парниковым эффектом, в XX в. сильно модулировалось изменениями солнечной радиации. Снижение поступления Q в период global dimming, вероятно, было одной из причин ослабления глобального потепления, тогда как brightening могло способствовать быстрому потеплению в конце XX и начале XXI в., а возможно, и в первой половине XX в. [Wild, 2009]. При рассмотрении годового хода показателя тренда, приведенного на рис. 2А, очевидна зависимость между тенденциями в изменениях Q и баллом нижней облачности. За весь период наблюдения в годовых значениях, зимой и осенью наблюдается тенденция к понижению Q , весной и летом – к повышению (см. табл. 1, 2; рис. 3В). Однако статистически значим только отрицательный линейный тренд в зимний период. Климатическая норма суммарной радиации за период 1991–2020 гг. наибольшая из рассматриваемых, тем не менее в период с 2000 по 2020 г. отмечен незначимый тренд уменьшения Q (см. рис. 1Б). В 2008 и 2017 гг. годовые значения Q приблизились к минимуму, от-

меченному в 1990 г., и стали соответственно третьим и вторым значениями с конца ранжированного ряда Q . Снижение повторяемости пасмурного неба, уменьшение в некоторые месяцы балла нижней облачности и рост прозрачности атмосферы для солнечных лучей привели к значимым тенденциям увеличения прямой и уменьшению рассеянной солнечной радиации (рис. 5А; см. табл. 2). Для XXI в., в отличие от XX в., стало характерным увеличение доли прямой радиации в суммарном потоке. Статистически значимая тенденция к уменьшению годовых, зимних и весенних значений сумм отраженной солнечной радиации при рассмотрении всего периода наблюдений обусловлена уменьшением альbedo поверхности. За счет роста отраженной радиации в снежные апрельские дни в последние годы, о чем сказано выше, наблюдалось повышение значений весенней нормы R 1991–2020 гг. относительно нормы 1961–1990 гг. на 5%, отмечена незначимая тенденция роста годовых значений отраженной радиации в 2000–2020 гг. (см. табл. 1; рис. 1Б, 3Г).

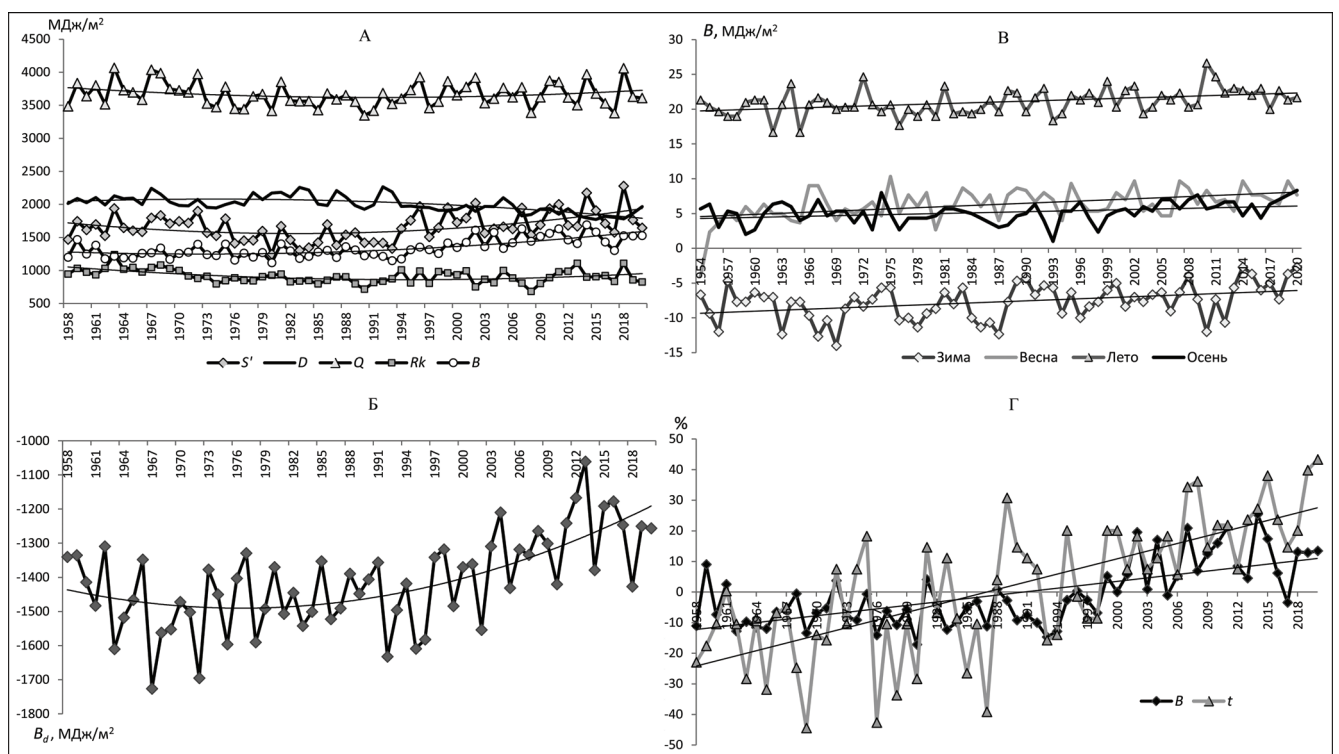


Рис. 5. Многолетние изменения радиационных характеристик: А – средние годовые значения потоков солнечной радиации; Б – средние годовые значения длинноволнового баланса; В – сезонные значения радиационного баланса; Г – аномалии радиационного баланса и температуры воздуха. Тонкие черные линии – линии тренда

Fig. 5. Long-term changes of radiation parameters: А – average annual values of solar radiation fluxes; Б – average annual values of the long-wave balance; В – seasonal values of the radiation balance; Г – anomalies of the radiation balance and air temperature. Thin black lines are the trends

Нисходящий и восходящий длинноволновые потоки одинаково зависят от температуры, облачности и влажности воздуха, но имеют противоположные направления, величина длинноволнового баланса меняется в соответствии с соотношением их величин. Скорость роста длинноволнового баланса в XXI в. увеличилась практически в два раза: за весь период наблюдений средняя скорость изменения составила $40 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$, в период с 2000 по 2020 г. – $76 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$. Причиной стабильного значимого увеличения длинноволнового баланса во все сезоны года (средняя скорость изменения для зимы, весны, лета и осени составила 4,2; 3,5; 2,7; $2,6 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$ соответственно) (см. табл. 1, 2; рис. 1Б, 3Д, 5Б) является повышение противоизлучения атмосферы [Gorbarenko, 2020]. Именно за счет повышения противоизлучения атмосферы, по мнению многих ученых, связанного с повышением содержания «парниковых газов» в атмосфере, происходят основные изменения климата [IPCC..., 2013]. Оценка влияния углекислого газа на противоизлучение атмосферы по результатам модельных расчетов показала, что увеличение E_a при изменении количества CO_2 в атмосфере на 50 млн^{-1} (с 330 до 380 млн^{-1}) составило 0,3 и $0,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ для лета и зимы соответственно [Gorbarenko, 2013]. Город с его асфальтированными улицами, плотной многоэтажной застройкой, системой отопления, развитой транспортной структурой становится самостоятельным источником длинноволновой радиации, что является дополнительным источником тепла и определяет повышение температуры в центре города относительно окраин. Такое явление получило название «остров тепла» [Климат Москвы..., 2017; Кислов и др., 2017].

Радиационный баланс подстилающей поверхности – результирующая величина приходящей и уходящей радиации – является основной составляющей теплового баланса. С уменьшением периода залегания снежного покрова значимо уменьшается число дней с отрицательными суточными суммами радиационного баланса. В XXI в. число таких дней уменьшилось практически в два раза. Максимальные изменения B произошли в зимний период – разница между нормами и периодом 2000–2020 гг. составила $d = 48\%$, $d_1 = 61\%$, $d_2 = 24\%$ (см. табл. 1, 2; рис. 1Б, 3Е). Годовые и сезонные значения радиационного баланса подвержены наибольшим из всех радиационных параметров изменениям в период наблюдений МО МГУ. Значимый тренд повышения значений B наблюдается во все месяцы, во все сезоны года и в целом за год, резкий рост значений годовых сумм B наблюдается с 1994 г. (см. рис. 4А, 5В). В 2000–2020 гг. за счет увеличения отраженной радиации отмечается некоторое замедление роста его значений. Так, при рассмотрении всего периода наблюдений скорость роста сред-

них годовых значений составила $50 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$, а за 2000–2020 гг. уменьшилась до $33 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$ (см. табл. 1). Максимальные значения годовых и сезонных значений радиационного и длинноволнового баланса наблюдались во втором десятилетии XXI в. (см. табл. 1). Абсолютный максимум годового значения радиационного баланса $1690 \text{ МДж}/\text{м}^2$, отмеченный в 2014 г., на 26% больше нормы 1961–1990 гг. и на 19% больше нормы 1991–2020 гг. Ученые НАСА и Национального управления океанических и атмосферных исследований по данным спутниковых наблюдений и наблюдений в точке показали значительное увеличение значений баланса океана с середины 2005 до середины 2019 г. [Norman et al., 2021]. С конца 1990-х гг. наблюдается практически синхронное межгодовое колебание аномалий значений радиационного баланса и температуры воздуха, при этом с 2000 г. наблюдаются только положительные значения аномалий этих величин (см. рис. 5Г). Подобная временная изменчивость характерна для интенсивности «острова тепла» в Москве [Кислов и др., 2017]. «Остров тепла» является проявлением антропогенного влияния города на радиационный режим.

ВЫВОДЫ

Оценка относительной величины тренда для средних годовых значений за 65-летний период наблюдений МО МГУ показала: увеличение на 8 и 7% общей и нижней облачности; уменьшение на 50% аэрозольной оптической толщины атмосферы; увеличение на 15% влагосодержания атмосферы; уменьшение на 1% суммарной и на 11% отраженной солнечной радиации; рост продолжительности солнечного сияния на 7%. Сократился период со снежным покровом, бесснежные октябрь, ноябрь стали для Москвы нормой. Значительный рост на 26 и 16% наблюдается в тенденциях изменения радиационного и длинноволнового баланса, на 49% температуры поверхности почвы. В XXI в. усилились тенденции уменьшения аэрозольной мутности атмосферы, практически вдвое увеличилась скорость повышения длинноволнового баланса, температуры поверхности почвы.

Тренды в зимний период для всех радиационных параметров имеют значения, превышающие тренды среднегодовых значений и величин в другие сезоны. На 28% произошло уменьшение главной расходной части радиационного баланса – отраженной радиации. Основная причина – сокращение на 17% числа дней со снежным покровом и уменьшение альбедо. В зимний период радиационный баланс увеличился на 73%, его длинноволновая часть – на 41%, что привело к росту температуры поверхности почвы на 34%.

Совокупность оценок причин тенденций в изменчивости факторов, оказывающих основное влия-

яние на формирование радиационного режима, а также проявление подобных тенденций на территории Европы позволяют предположить глобальный характер процессов, определяющих эти изменения. Основным из них является изменение общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии. В отсутствии значительных вулканических извержений радиационный эффект облаков существенно выше радиационного эффекта аэрозоля.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность всему инженерно-техническому персоналу метеорологической обсерватории МГУ, осуществляющему мониторинг радиационных параметров атмосферы.

Работа частично выполнялась за счет мегагранта Минобрнауки 075-15-2021-574 и выполнена в рамках научной темы госзадания «Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия», номер ЦИТИС: 121051400081-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Климатические ресурсы солнечной радиации Московского региона. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 312 с.
- Битюкова В.Р., Саульская Т.Д. Изменение антропогенного воздействия производственных зон Москвы за последние десятилетия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 3. С. 24–33.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
- Горбаренко Е.В. Локальные и глобальные факторы, определившие многолетние изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Москве в 1955–2018 годах // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 169–190.
- Еремич И.Д., Чубарова Н.Е., Алексеева Л.И., Суркова Г.В. Кислотность и химический состав осадков на территории Московского региона в теплый период года // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 5. С. 3–11.
- Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. «Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 4. С. 12–19.
- Климат Москвы в условиях глобального потепления / под ред. А.В. Кислова, М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. 288 с.
- Кононова Н.В. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2003. Т. 1. С. 133–162.
- Попова В.В., Мацковский В.В., Михайлов А.Ю. Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 1. С. 3–12.
- Фейгельсон Е.М., Краснокутская Л.Д. Потоки солнечного излучения и облака. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 158 с.
- Шиловцева О.А. История метеорологических наблюдений в Московском университете – эколого-климатические характеристики атмосферы в 2014 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ / под ред. О.А. Шиловцевой. М.: МАКС Пресс, 2015. 236 с.
- Chernokulsky A., Esau I., Bulygina O., Davy R., Mokhov I., Outten S., Semenov V. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late 19th century, *J. Climate*, 2016, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0329.1.
- Foster M.J., Di Girolamo L., Frey R.A., Heidinger A.K., Phillips C., Menzel W., Zhao G. Global Cloudiness, State of the Climate in 2019, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020, vol. 101(8), p. S51–53, DOI: 10.1175/2020BAMS.
- Gorbarenko E.V. Long-term variations of long-wave radiation in Moscow Russian, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, p. 669–676.
- Gorbarenko E.V. Radiation climate of Moscow, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, p. 478–487.
- Gorbarenko E.V. Climate changes in atmospheric radiation parameters from the MSU meteorological observatory data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 11/12, p. 789–797.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Li J., Carlson B.E., Dubik O., Lacis A.A. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 1227112289.
- Li J., You Q., He B. Distinctive spring shortwave cloud radiative effect and its inter-annual variation over southeastern China, *Atmospheric Science Letters*, 2020, vol. 21(6), e970, DOI: 10.1002/asl.970.
- Loeb N.G., Johnson G.C., Thorsen T.J., Lyman J.M., Rose F.G., Kato S. Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate, *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, iss. 13, e2021GL093047, DOI: 10.1029/2021GL093047.
- Obregón M., Serrano A., Costa M.J., Silva A.M. Global Spatial and Temporal Variation of the Combined Effect of Aerosol and Water Vapour on Solar Radiation, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(4), p. 708, DOI: 10.3390/rs13040708.

- Ohmura A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes, *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D05, DOI: 10.1029/2008JD011290.
- Orsini A., Tomasi C., Calzolari F., Nardino M., Cacciari A., Georgiadis T. Cloud cover classification through simultaneous ground-based measurements of solar and infrared radiation, *Atmospheric Research*, 2002, vol. 61(4), p. 251–275, DOI: 10.1016/S0169-8095(02)00003-0.
- Schmithüsen H., Koppe R., Sieger R., König-Langlo G. *BSRN Toolbox V2.5 – a tool to create quality checked output files from BSRN datasets and station-to-archive files*, 2019, Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA, DOI: 10.1594/PANGAEA.901332.
- Wan X., Qin F., Cui F., Chen W., Ding H., Li C. Correlation between the distribution of solar energy resources and the cloud cover in Xinjiang, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 675(1), p. 012060, DOI: 10.1088/1755-1315/675/1/012060.
- Wild M. How well do IPCC-AR4/CMIP3 climate models simulate global dimming/brightening and twentieth century daytime and nighttime warming? *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D11, DOI: 10.1029/2008JD011372.

Электронный ресурс

Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году» / под ред. А.О. Кульбачевского. Москва. 2020. 222 с. URL: http://www.ecology.moscow/eco/ru/report_result (дата обращения 15.05.2020).

Поступила в редакцию 07.08.2021

После доработки 09.01.2022

Принята к публикации 13.05.2022

EXTREMES AND GENERAL TRENDS IN LONG-TERM VARIABILITY OF ATMOSPHERIC RADIATION PARAMETERS IN MOSCOW

E.V. Gorbarenko

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: catgor@mail.ru

The work continues the study of the causes of climatic changes in the Moscow region basing on the observations of the MSU Meteorological Observatory. Long-term dynamics of the main climate-forming factor, i. e. the radiation regime of the atmosphere, was analyzed. During the 65 year observation period in Moscow, significant trends were noted for all radiation parameters of the atmosphere, most pronounced in winter. The average annual values of radiation, long-wavelength balances and soil surface temperature increase by 26, 16 and 49% respectively, and their winter values by 73, 41 and 34%. In the 21st century, the decrease in aerosol turbidity of the atmosphere, the increase in direct and the decrease in scattered radiation have intensified. The rate of increase in the long-wave and radiation balance, as well as in the soil surface temperature, has almost doubled. In the absence of significant volcanic eruptions, the “greenhouse effect” of cloud cover has become a principal natural factor. The anthropogenic component of aerosol turbidity has significantly decreased in recent years, which is associated with a number of measures taken by the Moscow government to improve the state of the environment in the city. The anthropogenic influence on the radiation regime in the city manifested itself in higher long-wave fluxes, which led to increased intensity of the “heat island” in the 21st century.

Keywords: monitoring, radiation fluxes, cloudiness, aerosol, albedo, climate change

Acknowledgements. The author is deeply grateful to all engineers and technicians of the MSU Meteorological Observatory who monitored the radiation parameters of the atmosphere. The study was partly financed by the Ministry of Science and Higher Education (megagrant 075-15-2021-574) and carried out under the research theme of the state task “Weather and climatic processes of different spatio-temporal dimensions under anthropogenic pressure” (CITIS no. 121051400081-7).

REFERENCES

- Abakumova G.M., Gorbarenko E.V., Nezval' E.I., Shilovceva O.A. *Klimaticheskie resursy solnechnoj radiatsii Moskovskogo regiona* [Climatic resources of solar radiation of the Moscow region], Moscow, LIBROKOM Publ., 2012, 312 p. (In Russian)
- Bitukova V.R., Saul'skaya T.D. *Izmenenie antropogennogo vozdeistviya proizvodstvennykh zon Moskvy za poslednie desyatiletiya* [Changes of the anthropogenic impact of Moscow industrial zones during the recent decades], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 3, p. 24–33. (In Russian)
- Chernokulsky A., Esau I., Bulygina O., Davy R., Mokhov I., Outten S., Semenov V. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late 19th century, *J. Climate*, 2016, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0329.1.
- Eremina I.D., Chubarova N.E., Alekseeva L.I., Surkova G.V. *Kislotsnost' i khimicheskii sostav osadkov na territorii*

- Moskovskogo regiona v teplyi period goda [Acidity and chemical composition of summer precipitation within the Moscow region], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 5, p. 3–11. (In Russian)
- Feigel'son E.M., Krasnokutskaya L.D. *Potoki solnechnogo izlucheniya i oblaka* [Streams of solar radiation and clouds], Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1978, 158 p. (In Russian)
- Foster M.J., Di Girolamo L., Frey R.A., Heidinger A.K., Phillips C., Menzel W., Zhao G. Global Cloudiness, State of the Climate in 2019, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020, vol. 101(8), p. S51–S53, DOI: 10.1175/2020BAMS.
- Gorbarenko E.V. Lokal'nye i global'nye faktory, opredelivshie mnogoletnie izmeneniya aerol'noi opticheskoi tolshchiny atmosfery v Moskve v 1955–2018 godakh [Local and global factors that determined long-term changes in the aerosol optical thickness of the atmosphere in Moscow in 1955–2018], *Proceedings of the A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory*, 2019, no. 595, p. 169–190. (In Russian)
- Gorbarenko E.V. Long-term variations of long-wave radiation in Moscow Russian, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, p. 669–676.
- Gorbarenko E.V. Radiation climate of Moscow, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, p. 478–487.
- Gorbarenko E.V. Climate changes in atmospheric radiation parameters from the MSU meteorological observatory data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 11/12, p. 789–797.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Kislov A.V., Varentsov M.I., Gorlach I.A., Alekseeva L.I. “Ostrov Tepla” Moskovskoi aglomeratsii i urbanisticheskoe usilenie global'nogo potepeniya [“Heat island” of the Moscow agglomeration and the urban-induced amplification of global warming], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 4, p. 12–19. (In Russian)
- Klimat Moskvy v usloviyakh global'nogo potepeniya [Climate of Moscow in conditions of global warming], A.V. Kislov (ed.), Moscow, MSU Publ., 2017, 288 p. (In Russian)
- Kononova N.V. Izmeneniya tsirkulyatsii atmosfery severnogo polushariya v XX–XXI stoletiyakh i ikh posledstviya dlya klimata [Changes in the circulation of the atmosphere of the northern hemisphere in the XX–XXI centuries and their consequences for the climate], *Fundamental and Applied Climatology*, 2003, vol. 1, p. 133–162. (In Russian)
- Li J., Carlson B.E., Dubik O., Laci A.A. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 12271–12289.
- Li J., You Q., He B. Distinctive spring shortwave cloud radiative effect and its inter-annual variation over southeastern China, *Atmospheric Science Letters*, 2020, vol. 21(6), e970, DOI: 10.1002/asl.970.
- Loeb N.G., Johnson G.C., Thorsen T.J., Lyman J.M., Rose F.G., Kato S. Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate, *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, iss. 13, e2021GL093047, DOI: 10.1029/2021GL093047.
- Obregón M., Serrano A., Costa M.J., Silva A.M. Global Spatial and Temporal Variation of the Combined Effect of Aerosol and Water Vapour on Solar Radiation, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(4), p. 708, DOI: 10.3390/rs13040708.
- Ohmura A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes, *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D05, DOI: 10.1029/2008JD011290.
- Orsini A., Tomasi C., Calzolari F., Nardino M., Cacciari A., Georgiadis T. Cloud cover classification through simultaneous ground-based measurements of solar and infrared radiation, *Atmospheric Research*, 2002, vol. 61(4), p. 251–275, DOI: 10.1016/S0169-8095(02)00003-0.
- Popova V.V., Matskovskii V.V., Mikhailov A.Yu. Sovremennye izmeneniya klimata sushi vnetropicheskoi zony severnogo polushariya [Recent climate change over the terrestrial part of the extratropical northern hemisphere zone], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 1, p. 3–12. (In Russian)
- Schmithüsen H., Koppe R., Sieger R., König-Langlo G. *BSRN Toolbox V2.5 – a tool to create quality checked output files from BSRN datasets and station-to-archive files*, 2019, Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA, DOI: 10.1594/PANGAEA.901332.
- Shilovtseva O.A. [History of meteorological observations at Moscow University], *Ekologo-klimaticheskie kharakteristiki atmosfery v 2014 g. po dannym Meteorologicheskoy Observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova* [Environmental and climate characteristics of the atmosphere in 2014 according to the measurements of the Meteorological Observatory of Moscow State University], O.A. Shilovtseva, E.I. Nezval' (eds.), Moscow, MAKSPress Publ., 2015, p. 181–214. (In Russian)
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The second assessment report of Roshydromet on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation], Moscow, Roshydromet Publ., 2014, 58 p. (In Russian)
- Wan X., Qin F., Cui F., Chen W., Ding H., Li C. Correlation between the distribution of solar energy resources and the cloud cover in Xinjiang, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 675(1), p. 012060, DOI: 10.1088/1755-1315/675/1/012060.
- Wild M. How well do IPCC-AR4/CMIP3 climate models simulate global dimming/brightening and twentieth century daytime and nighttime warming? *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D11, DOI: 10.1029/2008JD011372.
- Web source
Doklad “O sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2019 godu” [Report “On the state of the environment in the city of Moscow in 2019”], A.O. Kulbachevsky (ed.), Moscow, 2020, 222 p., URL: http://www.ecology.moscow/eco/ru/report_result (access date 15.05.2020) (In Russian)

Received 07.08.2021

Revised 09.01.2022

Accepted 13.05.2022