

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 535.37

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-734-741>

Поступило в редакцию 11.10.2021

Received 11.10.2021

С. А. Лысенко, академик В. Ф. Логинов*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭМИССИИ АНТРОПОГЕННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НА СКОРОСТЬ ЛЕТНЕГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРОПЫ

Аннотация. Исследована связь между аэрозольными загрязнениями воздуха и летней температурой воздуха на территории Европы. Выявлены высокие коэффициенты корреляции между широтными распределениями зонально осредненных трендов отмеченных величин. На основе полученных уравнений регрессии оценены потенциальные эффекты от снижения аэрозольной эмиссии для оптической толщины облаков, температуры воздуха и количества атмосферных осадков на территории Европы. Показано, что в результате снижения эмиссии аэрозолей средняя летняя температура на территории Европы за период 2000–2020 гг. могла повыситься на 0,53 °С, что составляет примерно 73 % наблюдаемого здесь летнего потепления. Полученные эмпирические оценки подтверждены результатами спутниковых наблюдений и численными расчетами изменений составляющих радиационного баланса на верхней границе атмосферы. Показано, что снижение эмиссии антропогенных аэрозолей в Европе могло привести к увеличению среднего радиационного баланса для территории Европы в летние месяцы на 2,27 Вт/м², что составляет примерно 65 % его реального изменения. Увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере за те же годы внесло гораздо меньший вклад в наблюдаемое изменение радиационного баланса – 17,5 %, что свидетельствует в пользу гипотезы о главенствующей роли аэрозолей в летнем потеплении на территории Европы.

Ключевые слова: аэрозоли, облачность, радиационный баланс, изменение климата

Для цитирования. Лысенко, С. А. Оценки влияния эмиссии антропогенных аэрозолей на скорость летнего потепления на территории Европы / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 734–741. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-734-741>

Sergey A. Lysenko, Academician Vladimir F. Loginov*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

ESTIMATION OF THE ANTHROPOGENIC AEROSOL EMISSION EFFECT ON THE RATE OF SUMMER WARMING IN EUROPE

Abstract. A relationship between aerosol air pollutions and summer air temperatures in Europe was studied. High correlation coefficients between the latitudinal distributions of the zone-averaged trends of the mentioned parameters were found. The potential effects of decrease in the aerosol emission on the cloud optical depth, in the air temperature, and the amount of precipitation in the territory of Europe were estimated on the basis of the obtained regression equations. It was shown that due to the aerosol emission decrease, the average summer temperature in Europe in 2000–2020 could increase by 0.53 °C, which is ~73 % of total summer warming in the region. The empirical estimates obtained in the work were confirmed by the satellite observation data and the numerical calculations of changes in radiation balance components at the top of the atmosphere. It was shown that the radiation emission decrease in the territory of Europe could increase the average radiation balance in Europe in summer months by 2.27 W/m², which is ~65 % of its total change. The increase in the carbon dioxide content in the atmosphere during the same period contributed much less to the observed change in the radiation balance (17.5 %), which supports the hypothesis about the dominant role of aerosols in summer warming in Europe.

Keywords: aerosols, clouds, radiation budget, climate change

For citation. Lysenko S. A., Loginov V. F. Estimation of the anthropogenic aerosol emission effect on the rate of summer warming in Europe. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 6, pp. 734–741 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-734-741>

Введение. Европейские страны в последние десятилетия остро ощущают последствия неблагоприятных изменений климата, особенно в летние месяцы. Средняя температура воздуха в Европе в 2015–2020 гг. превысила доиндустриальное значение примерно на 2 °С, что на градус больше увеличения средней температуры Земного шара [1]. Проекция климатических моделей на конец текущего столетия показывают, что по отношению к периоду 1971–2000 гг. потепление на

территории Европы может составить от 1,0 до 4,5 °С при умеренной (RCP4.5) и от 2,5 до 5,5 °С при высокой (RCP8.5) антропогенной эмиссии парниковых газов в атмосферу [2]. Еще с более высокими темпами, опережающими прогнозы современных климатических моделей, растут максимальные температуры воздуха в Европе, представляющие серьезную угрозу для здоровья людей, сельского хозяйства и окружающей среды [3].

Важным фактором, обуславливающим колебания притока солнечной радиации и летней температуры воздуха, может быть аэрозольное загрязнение атмосферы. Природоохранные мероприятия, проводимые в последние десятилетия во многих развитых странах, наряду с экологизацией промышленного производства и автотранспорта способствуют снижению аэрозольного загрязнения атмосферы. Это, в свою очередь, способствует увеличению количества поступающего на Землю солнечного излучения и дополнительному нагреву подстилающей поверхности. Кроме того, аэрозольные частицы, выступая в качестве ядер конденсации, оказывают влияние на формирование облаков и их микрофизические характеристики [4; 5]. Некоторые аэрозоли с высокой светопоглощающей способностью могут увеличивать теплосодержание атмосферы и охлаждать подстилающую поверхность, вследствие чего замедляется атмосферная конвекция и, напротив, затрудняется формирование облаков [6; 7]. Таким образом, роль аэрозоля в изменении климата неоднозначна и требует тщательного изучения, что особенно актуально в свете современного глобального потепления.

В настоящей работе представлены модельные и эмпирические оценки вклада аэрозольных загрязнений атмосферы на летнее потепление в Европе. В исследованиях использовались: 1) данные дистанционного зондирования Земли, включающие оптическую толщину аэрозоля и облаков, общую облачность, интегральное содержание в атмосфере водяного пара, альbedo подстилающей поверхности и составляющие радиационного баланса на верхней границе атмосферы; 2) метеорологические данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5; 3) численные расчеты переноса коротковолнового и длинноволнового излучения в атмосфере для территории Европы. Эмпирические оценки изменения летней температуры на территории Европы в результате снижения эмиссии антропогенных аэрозолей сопоставлены с результатами численного моделирования и прямых спутниковых измерений радиационного баланса на верхней границе атмосферы.

Эмпирические оценки влияния аэрозольных загрязнений воздуха на температуру, облачность и количество осадков. Согласно данным Европейского агентства по окружающей среде, за период с 1990 по 2019 г. в странах ЕС произошло значительное снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [8]: диоксида серы (SO_2) в 12,2 раза, оксидов азота (NO_x) в 2,5 раза, аммиака (NH_3) на 26 %, неметановых летучих органических соединений в 2,7 раз, твердых частиц ($\text{PM}_{2,5}$) на 37 %. Такой значительный прогресс в сокращении эмиссии аэрозолей и предшествующих им газовых примесей стал результатом подписания и ратификации странами ЕС Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния – важного международного соглашения, затрагивающего вопросы загрязнения воздуха, его воздействие на окружающую среду и здоровье людей.

Снижение эмиссии загрязняющих веществ, безусловно, повлияло на прозрачность атмосферы и радиационный баланс в системе «атмосфера–подстилающая поверхность», что достаточно наглядно подтверждают данные дистанционного зондирования Земли, представленные на рис. 1.

Средняя для лета аэрозольная оптическая толщина (Aerosol Optical Thickness – AOT) за последние 20 лет уменьшилась практически на всей территории Европы, причем больше всего в наиболее развитых странах, лидирующих по уровню эмиссией антропогенных аэрозолей (рис. 1, *a*). Статистически достоверное снижение AOT при уровне значимости $p = 0,01$ отмечается на 40 % территории Европы. Средняя величина статистически достоверного уменьшения AOT составляет примерно $-0,045$.

Одновременно со снижением уровня аэрозольного загрязнения атмосферы, произошло уменьшение и средней оптической толщи (Cloud Optical Thickness – COT) облаков, заметно коррелирующее с изменением AOT (рис. 1, *b*). Учитывая преобладающее западное направление атмосферного переноса в Европе, корреляции между трендами AOT и COT целесообразно рассматривать для их зонально осредненных распределений. Соответствующие распределения представлены на рис. 2.

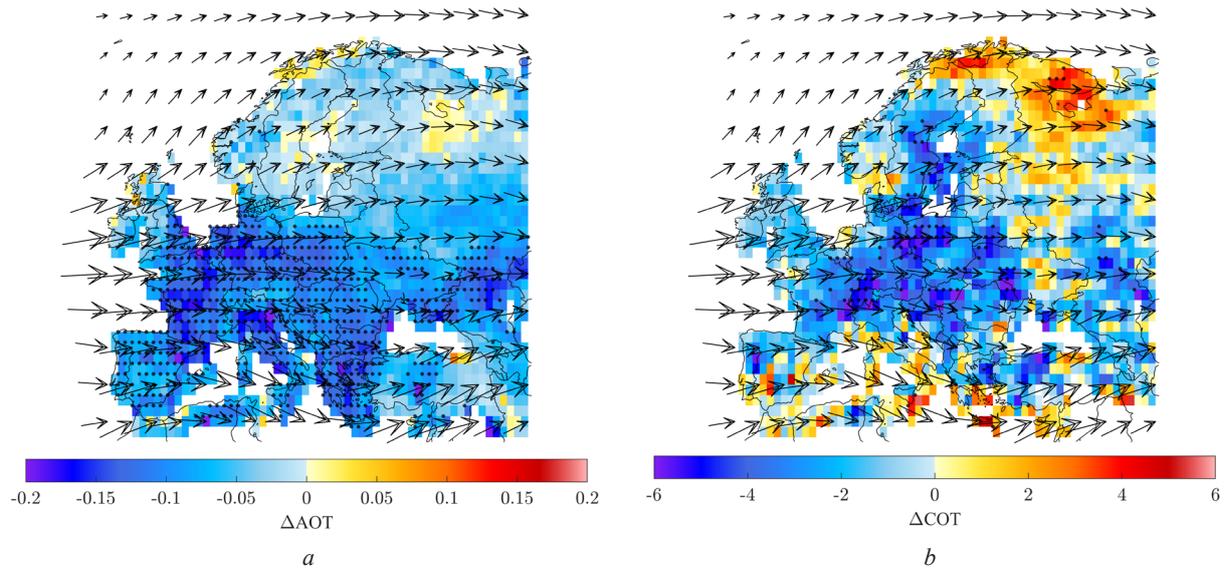


Рис. 1. Пространственные распределения изменений оптических толщин аэрозоля (*a*) и облаков (*b*) с 2000 по 2020 г. Стрелками на рисунках показано среднее для лета направление адвекции воздушных масс

Fig. 1. Spatial distribution of changes in aerosol (*a*) and cloud (*b*) optical depth from 2000 to 2020. Arrows indicate average direction of air mass advection in summer

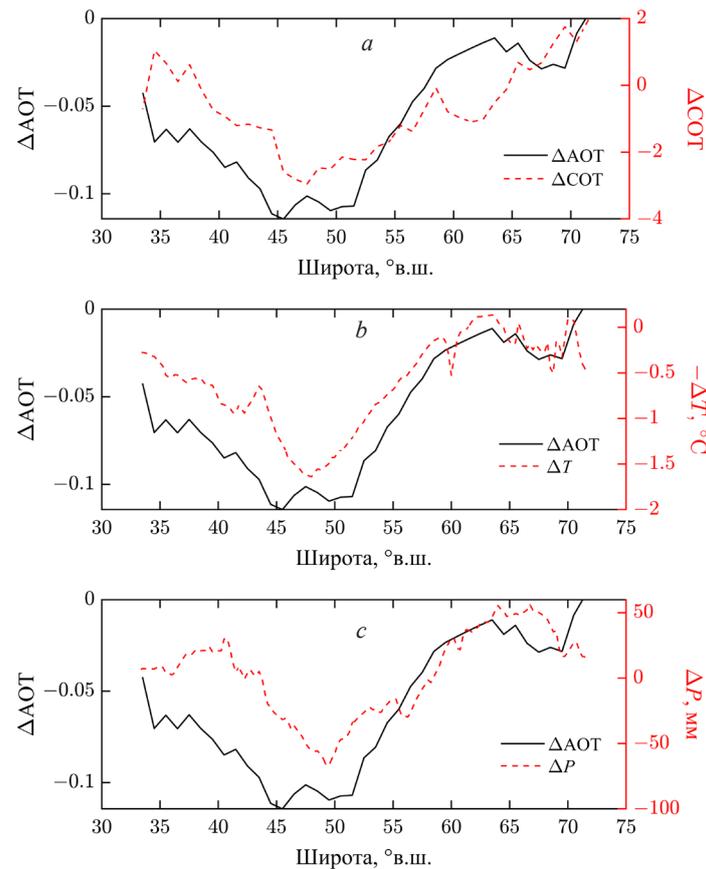


Рис. 2. Широтные распределения зонально осредненных изменений оптической толщины облаков (*a*), средней температуры (*b*) и суммы атмосферных осадков (*c*) в сопоставлении с изменением аэрозольной оптической толщины для летнего периода

Fig. 2. Latitudinal distribution of zonally averaged changes in cloud optical depth (*a*), average temperature (*b*) and amount of precipitation (*c*) in comparison with changes in aerosol optical depth for summer

Минимум обоих распределений приходится на центральную зону Европы (44–52° с. ш.), где сконцентрировано основное промышленное производство и транспортные потоки. Их экологизация, вероятно, и обеспечила столь сильное снижение уровня аэрозольных загрязнений воздуха. Коэффициент корреляции между широтными распределениями трендов АОТ и СОТ составляет 0,71. Исходя из уравнения регрессии между ними ($\Delta\text{СОТ} = 26\Delta\text{АОТ} + 0,04$) можно оценить влияние уменьшения аэрозольного загрязнения воздуха на среднюю оптическую толщину облаков в Европе. Так при средней для Европы величине статистически достоверного уменьшения АОТ ($-0,045$) из данного уравнения получим $\Delta\text{СОТ} \approx 1,21$, что составляет примерно 7,1 % от среднего для Европы значения $\text{СОТ} = 16,93$. Таким образом, уменьшение эмиссии антропогенных аэрозолей могло оказать существенное влияние на оптические свойства облаков, а значит и на радиационный и тепловой баланс на территории Европы.

Теперь рассмотрим связь изменений АОТ и температурно-влажностных условий на территории Европы. Среднезональные изменения летней температуры воздуха (T), суммы летних осадков (P) и АОТ в рассматриваемом регионе с 2000 по 2020 г. сопоставлены на рис. 2 *b, c*. Видно, что среднезональные изменения указанных величин достаточно хорошо согласуются друг с другом. Статистически значимые изменения температуры и количества осадков приходятся на широтную зону, соответствующую максимальному снижению АОТ. Однако в отличие от изменений АОТ, максимумы изменений T и P смещены к востоку Европы, что может быть следствием западного переноса воздуха. Несмотря на то что аэрозоли способны влиять на формирование облаков и их свойства в пределах каждого конкретного региона, осадки из облаков, «модифицированных» аэрозолями, могут выпадать на значительном удалении от источника аэрозолей. Кроме того, сами аэрозоли могут увлекаться воздушными течениями и переноситься на расстояние в тысячи километров, что хорошо подтверждается примером переноса пыли из пустыни Сахара через всю тропическую часть Атлантического океана.

Коэффициент корреляции между $\Delta\text{АОТ}$ и ΔT составляет $-0,89$. Его отрицательный знак свидетельствует об охлаждающем эффекте атмосферных аэрозолей, проявляющемся посредством как их прямого, так и косвенного (через изменение оптической толщины облаков) радиационного эффекта. Уравнение регрессии между $\Delta\text{АОТ}$ и ΔT ($\Delta T = -12\Delta\text{АОТ} - 0,01$) позволяет оценить потенциальный температурный эффект от уменьшения АОТ на территории Европы в XXI в.: $\Delta T \approx 0,53$ °С. Фактическое увеличение средней летней температуры воздуха в рассматриваемом регионе составляет по данным реанализа ERA5 примерно 0,73 °С. Таким образом, снижение уровня аэрозольного загрязнения воздуха может обуславливать до 73 % летнего потепления в Европе.

Положительный коэффициент корреляции ($r = 0,78$) между широтными распределениями $\Delta\text{АОТ}$ и ΔP может означать, что аэрозоли в целом увеличивают количество атмосферных осадков в Европе, а их систематическое снижение «иссушает» климат в летний период. Исходя из эмпирического уравнения регрессии $\Delta P = 704\Delta\text{АОТ} + 2,26$ можно сделать вывод, что в результате сокращения аэрозольной эмиссии средняя сумма летних осадков на территории Европы могла уменьшиться на 29,4 мм, т. е. примерно на 17 % от ее среднего значения.

Модельные оценки изменений радиационного баланса на территории Европы в результате снижения эмиссии аэрозолей. Оценки прямого эффекта аэрозолей на коротко- и длинноволновую радиацию, уходящую с верхней границы атмосферы, выполнялись использованием разработанной модели переноса излучения в системе «атмосфера–подстилающая поверхность» [9], адаптированной для территории Европы.

Влияние аэрозолей на атмосферную радиацию оценивалось для летнего периода, когда солнечная радиация и прямой радиационный эффект аэрозолей достигают максимальных значений. Средний поток солнечного излучения, поступающего на верхнюю границу атмосферы, рассчитывался в зависимости от широты местности. Модельные параметры микроструктуры аэрозоля (функция распределения частиц по размерам и комплексный показатель преломления) выбраны в соответствии с данными многолетних наблюдений в сети AERONET для территории Европы. Остальные параметры модели переноса излучения задавались в соответствии с данными спутникового спектрорадиометра MODIS. Оптическая толщина аэрозоля, содержание в атмосфере

водяного пара и облачное покрытие – наиболее изменчивые во времени и в пространстве параметры атмосферы – задавались отдельно для каждого узла расчетной сетки, покрывающей территорию Европы с шагом 1° . Оптическая толщина и высота верхней границы облаков, а также эффективный радиус облачных капель задавались во всех узлах расчетной сетки равными их средним значениям для территории Европы в летние месяцы. Спектр альbedo подстилающей поверхности рассчитывался как суперпозиция обобщенных спектров альbedo почвы и зеленой растительности, взятых из базы данных ASTER. Весовой вклад каждого из упомянутых спектров в общий спектр альbedo задавался на основе среднего значения вегетационного индекса NDVI, пространственное распределение которого соответствовало данным MODIS. Для концентрации малых газовых компонент и других физических параметров атмосферы использовалась стандартная модель для лета средних широт. Концентрация углекислого газа в атмосфере задавалась равной ее современному значению – около 415 ppm.

Спектры уходящего с верхней границы атмосферы электромагнитного излучения рассчитывались при двух значениях аэрозольной оптической толщины, соответствующих начальной и конечной точкам ее линейного тренда для периода 2000–2020 гг. Вычисленное изменение интегрального по спектру потока уходящего излучения дает оценку радиационного эффекта от снижения эмиссии аэрозолей за отмеченные годы для случая безоблачной атмосферы. Аналогичный радиационный эффект при частичной облачности можно оценить (без учета косвенных эффектов аэрозолей на облака) с использованием среднего покрытия атмосферы облаками, полученного по данным MODIS. Пространственное распределение результирующего радиационного эффекта аэрозолей, рассчитанного на основе модели переноса излучения, представлено на рис. 3. Преимущественно отрицательный знак изменения потока электромагнитного излучения, уходящего с верхней границы атмосферы, говорит о том, что в системе «атмосфера–подстилающая поверхность» стало оставаться больше энергии, доступной для ее нагревания, по причине уменьшения обратного рассеяния солнечного излучения атмосферными аэрозолями.

За счет снижения эмиссии аэрозолей приток радиации в систему «атмосфера–подстилающая поверхность» для территории Европы увеличился лишь за последние 20 лет в среднем на $2,27 \text{ Вт/м}^2$,

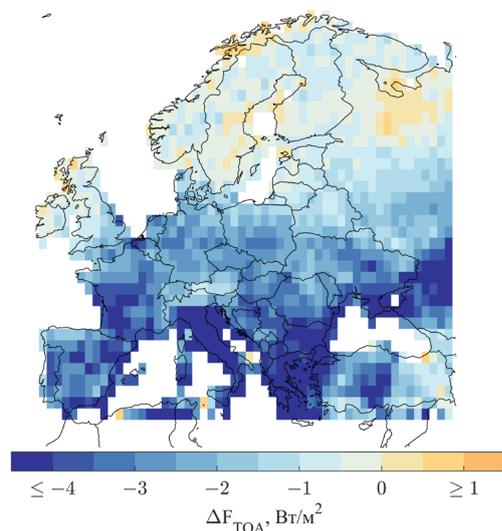


Рис. 3. Пространственное распределение изменения потока излучения, уходящего с верхней границы атмосферы, связанного с уменьшением содержания в атмосфере аэрозолей за период с 2000 по 2020 г.

Fig. 3. Spatial distribution of changes in radiation flux from the top of the atmosphere, related to decrease in aerosol content in the atmosphere from 2000 to 2020

что примерно в полтора раза превышает парниковый эффект, вызванный увеличением концентрации CO_2 в атмосфере за период 1960–2020 гг. Это обстоятельство, безусловно, сыграло свою роль в повышении летних температур на территории Европы.

В подтверждение к вышесказанному рассмотрим результаты прямых измерений радиационного баланса на верхней границе атмосферы, выполняемых в рамках спутникового эксперимента CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) с 2000 года. Карты изменений общего радиационного баланса и отдельно его коротковолновой и длинноволновой составляющих за 2000–2020 гг., полученные по данным CERES, приведены на рис. 4. Положительные значения изменений радиационного баланса соответствуют увеличению энергии, поглощаемой в системе «атмосфера–подстилающая поверхность», а отрицательные – ее уменьшению.

Представленные распределения позволяют сделать несколько важных выводов. Во-первых, европейский регион, обозначенный на рис. 4, *a* прямоугольником, отличается одним из наибольших для материковой части северного полушария повышением дисбаланса между приходящей от Солнца энергией и энергией, излучаемой обратно в космос. Особенно сильное увеличение радиационного баланса приходится на территорию

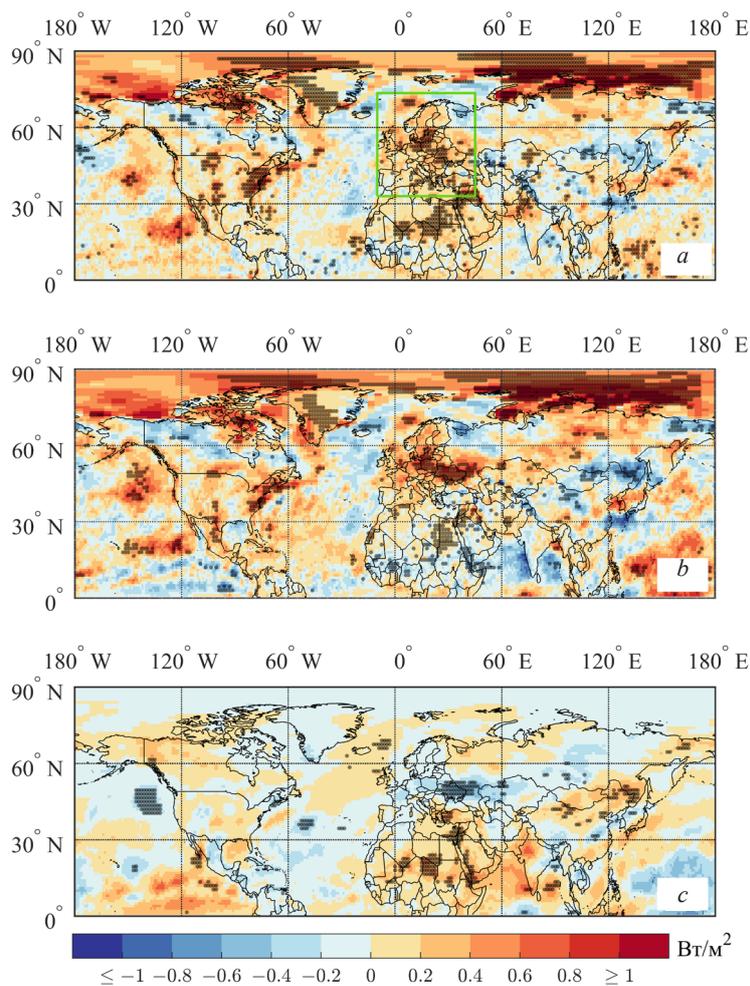


Рис. 4. Изменения суммарного радиационного баланса (a) и его коротковолновой (b) и длинноволновой составляющих (c) за 2000–2020 гг., рассчитанные на основе данных спутникового эксперимента CERES. Точками отмечены регионы со статистически достоверными трендами (при уровне значимости $p = 0,05$)

Fig. 4. Changes in total radiation balance (a) and its shortwave (b) and longwave components (c) in 2000–2020, calculated on the basis of CERES satellite experiment data. Regions with statistically reliable trends are marked with dots (significance level $p = 0.05$)

Восточной Европы, где оно соответствует уровню значимости $p = 0,05$. Сопоставимые с Европой темпы увеличения радиационного баланса отмечаются на восточном побережье США, где также располагаются наиболее промышленно развитые районы. В обоих регионах в последние два десятилетия отмечается уменьшение аэрозольно-газовых выбросов и увеличение прозрачности атмосферы.

Второй важный вывод состоит в том, что увеличение радиационного баланса в Европе и США происходит главным образом за счет коротковолновой радиации (рис. 4, b). В Европе наибольшее увеличение притока солнечной радиации отмечается для Украины и Прибалтийских стран, в которых темпы промышленного производства в последние десятилетия значительно снизились, а вместе с этим уменьшилась и эмиссия антропогенных аэрозолей.

Согласно данным CERES, приток солнечной радиации в систему «атмосфера–подстилающая поверхность» для территории Европы за период 2000–2020 гг. составил в среднем $4,9 \text{ Вт/м}^2$, тогда как отток длинноволнового излучения за отмеченные годы составил $-1,19 \text{ Вт/м}^2$. Увеличение суммарного радиационного баланса за те же годы составило в среднем $3,48 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, общий радиационный форсинг за отмеченные годы примерно на 71 % был обусловлен уменьшением уходящего в космос коротковолнового излучения, что могло быть следствием уменьшения

облачности и содержания аэрозолей в атмосфере. Уменьшением облачности также можно объяснить и наблюдаемое увеличение потока уходящего длинноволнового излучения (рис. 4, с).

Как было показано на основе численного моделирования переноса излучения в атмосфере, увеличение радиационного баланса за счет очищения атмосферы от аэрозолей составило для территории Европы в среднем $2,27 \text{ Вт/м}^2$, что на 65 % объясняет реальное увеличение радиационного баланса за отмеченные годы. Примечательно, что увеличение концентрации CO_2 за те же годы (с 369,7 ppm в 2000 г. до 414,2 ppm в 2020 г.) оказало парниковый эффект около $0,61 \text{ Вт/м}^2$, что может объяснить лишь 17,5 % наблюдаемой величины радиационного форсинга для территории Европы.

Таким образом, снижение эмиссии антропогенных аэрозолей, достигнутое в результате природоохранных мероприятий, экологизации промышленности и транспорта, а также перехода к «зеленой» экономике в ряде европейских стран, могло оказать преобладающий эффект на рост летней температуры в Европе в последние десятилетия. В пользу этого вывода говорят и данные метеорологических наблюдений [3], согласно которым скорость роста максимальных дневных температур достигает наибольших значений в Центральной Европе, включающей наиболее продвинутое в плане «зеленой» экономики страны. В этом регионе рост экстремальных летних температур (выше 99 процентиля) за период 1950–2018 гг. на 50 % превысил рост средней летней температуры. При этом современные климатические модели семейства EURO-CORDEX оказываются не способны объяснить наблюдаемый рост экстремальных летних температур и количества дней с такими температурами в Европе и склонны существенно занижать рост температурных экстремумов. В связи с этим можно полагать, что учет отмеченных нами климатических эффектов от снижения эмиссии аэрозолей позволит значительно уменьшить расхождение между расчетами климатических моделей и данными наблюдений.

Список использованных источников

1. C3S, 2020. European state of the climate 2019 // *Climate Bulletin*. – Copernicus Climate Change Service [Electronic resource]. – Mode of access: <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/>. – Date of access: 20.11.2020.
2. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research / D. Jacob [et al.] // *Reg. Environ. Change*. – 2013. – Vol. 14, N 2. – P. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
3. Lorenz, R. Detection of a Climate Change Signal in Extreme Heat, Heat Stress, and Cold in Europe From Observations / R. Lorenz, Z. Stalhandske, E. M. Fischer // *Geophys. Res. Lett.* – 2019. – Vol. 46, N 14. – P. 8363–8374. <https://doi.org/10.1029/2019gl082062>
4. Гинзбург, А. С. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат / А. С. Гинзбург, Д. П. Губанова, В. М. Минашкин // *Рос. хим. журн.* – 2008. – Т. 52, № 5. – С. 112–119.
5. Кондратьев, К. Я. Свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля: от нано- до глобальных масштабов / К. Я. Кондратьев, Л. С. Ивлев, В. Ф. Крапивин. – СПб., 2007. – 859 с.
6. Reduction of tropical cloudiness by soot / A. S. Ackerman [et al.] // *Science*. – 2000. – Vol. 288, N 5468. – P. 1042–1047. <https://doi.org/10.1126/science.288.5468.1042>
7. Langenbrunner, B. Aerosol-driven seasonality / B. Langenbrunner // *Nat. Clim. Chang.* – 2020. – Vol. 10, N 8. – Art. 708. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0868-z>
8. Air pollutant emissions data viewer (Gothenburg Protocol, LRTAP Convention) 1990–2019 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-pollutant-emissions-data-viewer-4>. – Date of access: 20.11.2020.
9. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск, 2019. – 315 с.

References

1. C3S, 2020. *European state of the climate 2019. Climate Bulletin. Copernicus Climate Change Service*. Available at: <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/> (accessed 20 November 2020).
2. Jacob D., Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O. B., Bouwer L. M., Braun A., Colette A., Déqué M., Georgievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., Meijgaard E. van, Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Rounsevell M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.-F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B., Yiou P. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 2013, vol. 14, no. 2, pp. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

3. Lorenz R., Stalhandske Z., Fischer E. M. Detection of a Climate Change Signal in Extreme Heat, Heat Stress, and Cold in Europe From Observations. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, no. 14, pp. 8363–8374. <https://doi.org/10.1029/2019gl082062>
4. Ginzburg A. S., Gubanova D. P., Minashkin V. M. Influence of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate. *Russian Journal of General Chemistry*, 2009, vol. 79, no. 9, pp. 2062–2070. <https://doi.org/10.1134/s1070363209090382>
5. Kondrat'ev K. Ya., Ivlev L. S., Krapivin V. F. *Properties, formation processes and consequences of atmospheric aerosol impacts: from nano- to global scales*. Saint Petersburg, 2007. 859 p. (in Russian).
6. Ackerman A. S., Toon O. B., Stevens D. E., Heymsfield A. J., Ramanathan V., Welton E. J. Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*, 2000, vol. 288, no. 5468, pp. 1042–1047. <https://doi.org/10.1126/science.288.5468.1042>
7. Langenbrunner B. Aerosol-driven seasonality. *Nature Climate Change*, 2020, vol. 10, no. 8, art. 708. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0868-z>
8. *Air pollutant emissions data viewer (Gothenburg Protocol, LRTAP Convention) 1990–2019*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-pollutant-emissions-data-viewer-4> (accessed 20 November 2020).
9. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Modern changes of global and regional climate*. Minsk, 2019. 315 p. (in Russian).

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Логинов Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Loginov Vladimir F. – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.