

УДК 551.510.42;007(075);551.5;551.521

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ЭВОЛЮЦИИ СУЛЬФАТНОГО АЭРОЗОЛЯ И ЕГО РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИВМ РАН

© 2021 г. Н. Е. Чубарова^а, *, А. А. Полюхов^а, **, Е. М. Володин^б, ***

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^бИнститут вычислительной математики РАН, ул. Губкина, 8, Москва, 119991 Россия

*e-mail: natalia.chubarova@gmail.com

**e-mail: aeromsu@gmail.com

***e-mail: volodinev@gmail.com

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 09.04.2021 г.

Принята к публикации 14.04.2021 г.

Уточнен расчет сульфатного аэрозоля естественного происхождения за счет эмиссии диметилсульфида (ДМС) в модели ИВМ РАН, в результате чего существенно улучшилось согласие новых модельных оценок АОТ сульфатного аэрозоля с данными реанализа CAMS. Используя эти данные и последние рекомендованные оценки антропогенных эмиссий, рассчитаны радиационные эффекты (*RFE*) сульфатного аэрозоля разного генезиса на верхней границе атмосферы. Максимальный радиационный эффект сульфатного аэрозоля естественного происхождения наблюдается над морским побережьем Антарктиды, где за счет больших эмиссий ДМС средняя годовая величина *RFE* равна -0.14 Втм^{-2} с максимумом в январе, достигающим по абсолютной величине -0.45 Втм^{-2} . Для области $25^\circ\text{--}45^\circ$ с.ш. годовые зонально осредненные значения *RFE* превышают -0.7 Втм^{-2} за счет антропогенных выбросов. Среднеглобальное годовое значение *RFE* сульфатного аэрозоля на 2005 г. равно -0.36 Втм^{-2} и практически не меняется по сезонам года. В целом доля *RFE* за счет естественного сульфатного аэрозоля составляет 20%, однако отмечаются значительные вариации этой величины по месяцам с максимумом в январе, когда ее доля достигает 37%.

Ключевые слова: сульфатный аэрозоль, диметилсульфид, численное моделирование, климатическая модель ИВМ РАН, радиационные эффекты

DOI: 10.31857/S0002351521040040

ВВЕДЕНИЕ

Сульфатный аэрозоль является одной из основных аэрозольных фракций, влияние которой на радиационные свойства атмосферы велико [1–6]. Это связано с его высоким содержанием в атмосфере и гидрофильными свойствами, которые определяют его существенное влияние на облачные капли и не прямое воздействие на климатическую систему [7].

Сульфатный аэрозоль может иметь антропогенное и естественное происхождение. Он формируется в результате антропогенных выбросов в атмосферу сернистых газов, которые образуются при сжигании ископаемого топлива [8]. Кроме того, сульфатный аэрозоль формируется в атмосфере из окислов серы при вулканических извержениях, а также генерируется за счет естественных биогенных эмиссий диметилсульфида ДМС (химическая

формула – $(\text{CH}_3)_2\text{S}$) из океана в атмосферу. ДМС происходит в основном из диметилсульфониопропионата (ДМСП, химическая формула $\text{C}_3\text{H}_{10}\text{O}_2\text{S}$), который содержится в тканях фитопланктона, морских водорослей и некоторых других видов водных сосудистых растений [9]. ДМС окисляется в атмосфере до различных серосодержащих соединений, таких как диоксид серы, диметилсульфоксид (ДМСО), диметилсульфон, метансульфоновая кислота и серная кислота, в результате чего происходит образование новых сульфатных аэрозолей. В целом от 15 до 42% глобального содержания сульфатного аэрозоля образуется естественным путем [6, 10, 11]. Концентрации ДМС сильно варьируются в пространстве и имеют ярко выраженный сезонный ход, что во многом определяет и пространственно-временные вариации сульфатного аэрозоля естественного происхождения

в периоды отсутствия крупных вулканических извержений.

Если над северной Атлантикой и северо-западной частью Тихого океана рост концентрации сульфатного аэрозоля в основном происходит за счет антропогенных выбросов, то в юго-западной и восточной части Тихого океана — за счет окисления ДМС [11, 12]. По оценкам, приведенным в [13], в южном полушарии его доля превышает 80%.

Исследованиям циклов серы и сульфатного аэрозоля антропогенного и естественного происхождения посвящено довольно много публикаций [2, 4, 6, 10–15]. Однако до сих пор существуют большие неопределенности воспроизведения прямых и косвенных эффектов сульфатного аэрозоля [2, 3].

В связи с заметной долей этого естественного источника сульфатного аэрозоля, особенно в высоких широтах южного полушария, где антропогенные выбросы малы, в данном исследовании ставилась задача уточнить его вклад в формирование сульфатного аэрозоля, оценить его радиационные эффекты и сравнить их с эффектами сульфатного аэрозоля антропогенного происхождения.

ОПИСАНИЕ ДАННЫХ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследования использовалась климатическая модель ИВМ РАН (INM-CM4-8) [16]. В атмосфере шаг сетки составляет $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте и 21 уровень по вертикали до 10 гПа. В океане разрешение $1^\circ \times 0.5^\circ$ по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Данная версия модели принимала участие в Проекте по сравнению климатических моделей (CMIP5, Coupled Model Intercomparison Project, phase 5). Описание некоторых результатов моделирования климатических изменений в XIX–XXI вв. с использованием этой модели приведено в [17]. В аэрозольном блоке, реализованном в модели, рассматривается процесс эволюции концентрации 9 аэрозольных фракций естественного и антропогенного происхождения: мелкой и крупной морской соли, мелкой и крупной континентальной пыли, сульфатного аэрозоля, гидрофобного и гидрофильного черного углерода, гидрофобного и гидрофильного органического углерода, а также сернистого газа [18]. Под эволюцией понимается эмиссия аэрозоля или его газов-предшественников в атмосферу, перенос, горизонтальная и вертикальная диффузия, гравитационное оседание, а также вымывание осадками и поглощение поверхностью. В ряде случаев эмиссии первичных веществ задаются в соответствии с рекомендациями из специальных баз данных. В настоящем исследовании использовалась современная база данных по антропогенным эмиссиям сернистого газа, которая применялась в экспери-

ментах в проекте CMIP6 [8]. Однако для ряда веществ, в частности в случае диметилсульфида, эмиссии рассчитываются непосредственно в модели. В стандартной версии аэрозольного блока (см. [18]) поток ДМС из океана вычислялся по [19] с учетом скорости приземного ветра и температурной зависимости, а также его концентрации в океане по данным [20]. Предполагалось, что поступивший в атмосферу диметилсульфид мгновенно окислялся до сернистого газа. Характерное время образования сульфатного аэрозоля в модели соответствует примерно 3 сут.

Для выявления качества воспроизведения сульфатного аэрозоля в климатической модели были проведены численные эксперименты по оценке аэрозольной оптической толщины (АОТ) на длине волны 550 нм при разных заданиях ДМС для климатических экспериментов с 10-летним осреднением при учете антропогенных выбросов сернистых соединений, типичных для 2005 г., и без их учета для выявления влияния только естественной составляющей сульфатного аэрозоля.

Результаты сопоставлялись с данными по АОТ сульфатного аэрозоля по реанализам CAMS [21] и MERRA-2 [22]. Аэрозольный реанализ CAMS основан на модели IFS ECMWF с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. При расчете аэрозольных свойств по CAMS применяют схему с эволюцией 12 различных мод аэрозольных частиц, которые корректируются по данным измерений с использованием системы усвоения 4DVAR [23]. Дополнительно используются спутниковые измерения по MODIS и AATSR. Реанализ MERRA-2 базируется на спектральной модели GEOS [24] и схеме анализа 3DVAR GSI [25] с горизонтальным разрешением около $0.5^\circ \times 0.625^\circ$. В реанализе MERRA-2 дополнительно производится усвоение большого числа спутниковых данных по приборам AVHRR, MODIS, MISR, а также учитываются данные наземных наблюдений на сети AERONET.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описание новой схемы расчета сульфатного аэрозоля естественного происхождения и результаты ее тестирования по данным реанализов CAMS и MERRA-2

На рис. 1 показаны существенные различия в содержании аэрозольной оптической толщины (АОТ) в ряде регионов при расчетах ДМС по [18] с данными реанализов CAMS и MERRA-2. Отмечается существенное систематическое завышение АОТ, которое во многих районах, удаленных от антропогенных источников, превышает 0.2. Большие различия, до 0.4, также наблюдаются над юго-восточными промышленными провинциями Китая во все сезоны года, что, вероятно, связано с неопределенностями задания антропогенных эмис-

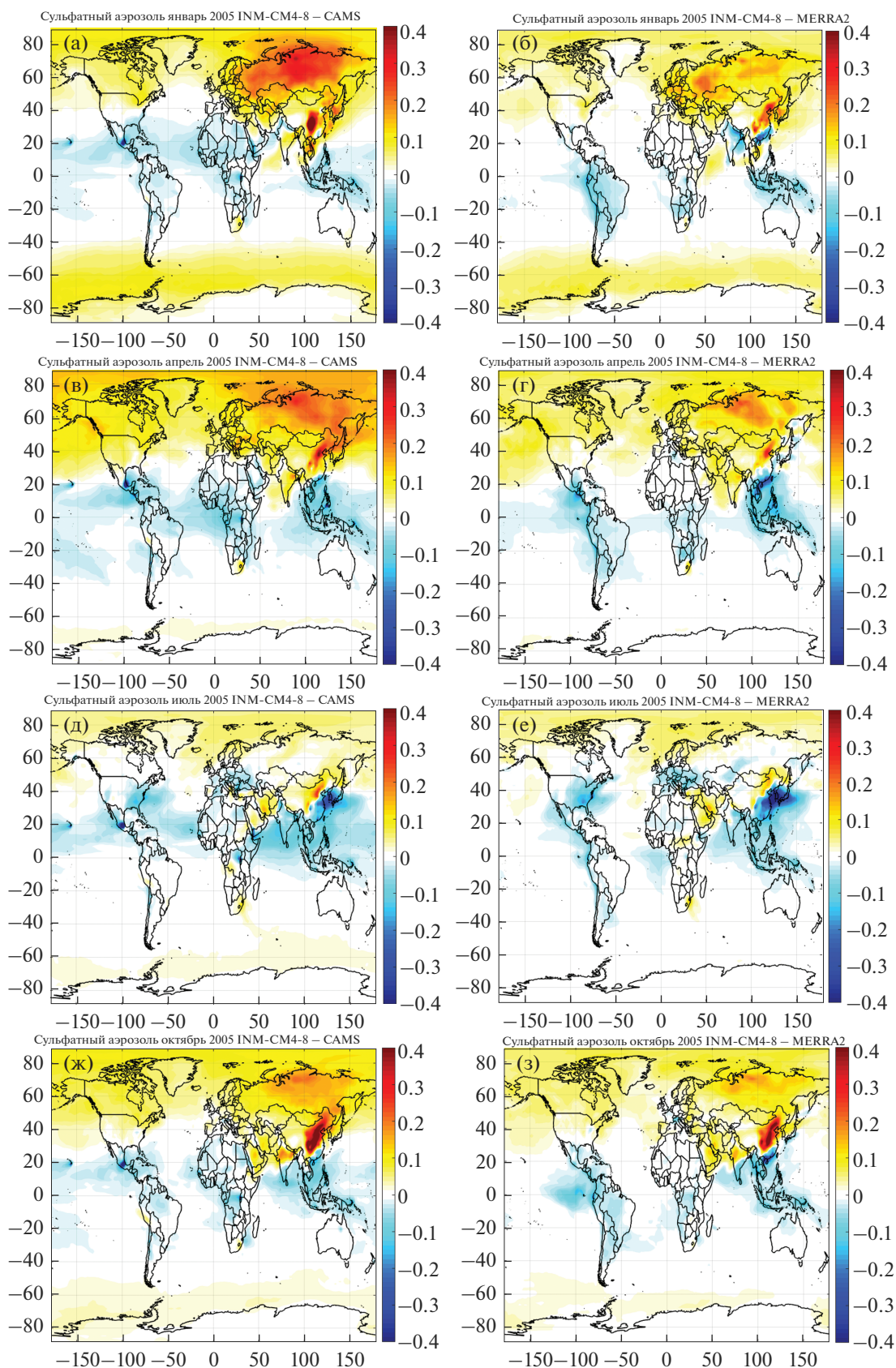


Рис. 1. Различия между среднемесячными значениями АОТ сульфатного аэрозоля на длине волны 550 нм, полученными по модели ИВМ РАН (численный эксперимент 1 согласно табл. 1) и по данным реанализов CAMS (левый столбец) и MERRA-2 (правый столбец) в январе, апреле, июле и октябре 2005 г.

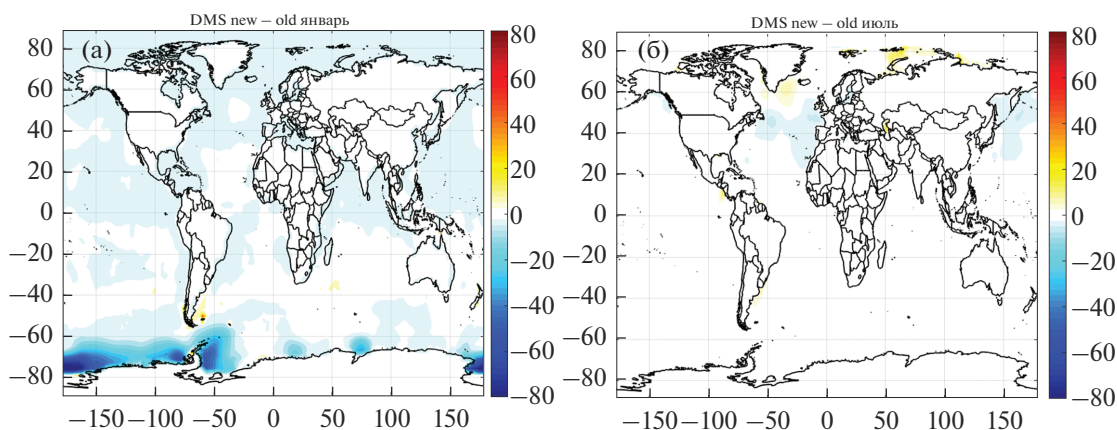


Рис. 2. Различия в концентрации ДМС ($\text{нМ} = \text{моль } 10^{-9}/\text{л}$) между данными [26] и данными расчетов ДМС по [20], использованными ранее в [18], в январе и июле.

сий и в данной работе подробно анализироваться не будут. Наибольший интерес вызывает наблюдаемое заметное завышение модельной величины АОТ в высоких широтах южного полушария над океанами летом (в январе), а также в северном полушарии в высоких широтах и над центральными районами Евразии во все сезоны, кроме летнего. Кроме того, в течение всего года отмечается некоторое занижение АОТ в тропиках. Пространственные различия АОТ между модельными значениями АОТ и данными реанализа в целом получились похожими при использовании CAMS и MERRA-2. Поэтому дальнейший анализ проведен только с использованием реанализа CAMS.

Поскольку завышенные величины АОТ в высоких широтах южного полушария в теплый период года в районах, удаленных от источников антропогенных выбросов, могут определяться только ДМС, то для их уточнения в модель ИВМ были внесены некоторые изменения. Были использованы современные данные по концентрациям ДМС в приповерхностном слое по [26], которые получены с применением искусственных нейронных сетей к данным экспериментальных измерений ДМС в отдельных регионах мира. Сопоставление этих данных с ранее использованными в [18] приведено на рис. 2. Видно заметное уменьшение новых концентраций ДМС в высоких широтах южного и северного полушария, где как раз наблюдались завышения АОТ сульфатного аэрозоля.

Наряду с этим была изменена параметризация потока ДМС из океана в атмосферу в соответствии с [27]. Эти данные были получены по результатам натуральных экспериментов по соотношению между наблюдениями за скоростью ветра и измерениями вертикальной скорости турбулентного потока ДМС. Для этого был уточнен расчет коэффициента обмена между морской поверхностью и воздухом K_w (см/ч), который, согласно данным рис. 8b в [27] для числа Шмидта $Sc = 660$, свя-

зан со скоростью ветра u_{10} на высоте 10 м следующим образом:

$$K_{w_{Sc=660}} = 0.7358 (u_{10}^{1.391}). \quad (1)$$

Число Шмидта, характеризующее относительную роль молекулярных процессов переноса количества движения и переноса массы примеси диффузией, рассчитывается по [28]:

$$Sc = 2674.0 - 147.12T + 3.726T^2 - 0.038T^3, \quad (2)$$

где T – температура воды в градусах Цельсия.

Приведенная степенная зависимость (1) позволяет более точно описывать зависимость при небольших скоростях ветра, чем линейная аппроксимация, предложенная самими авторами в статье, которая приводит к нереальным отрицательным величинам потоков при низких скоростях ветра. Предложенная параметризация увеличивает значения K_w на 1.5–2.5 см/ч при малых скоростях ветра до 4 м/с, несколько уменьшает величину K_w на 0.2–1 см/ч до скорости ветра 12 м/с и в целом более точно (с более высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0.98$) описывает полученные результаты измерений.

Величина K_w используется при расчете потока диметилсульфида из океана в атмосферу в соответствии с:

$$F_{DMS} = K_w C_w, \quad (3)$$

где C_w – концентрация диметилсульфида в океане по данным [26]. Поток из атмосферы в океан считается пренебрежимо малым. Согласно [19], изменение коэффициента обмена при значениях числа Шмидта, не равных 660, проводилось путем введения дополнительного множителя $(660/Sc)^{0.5}$.

Поскольку капли малых размеров могут оставаться жидкими и при очень низких температурах [29], то были уточнены параметризации, описывающие увеличение гравитационного осаждения за счет роста радиуса гидрофильных частиц при

Таблица 1. Описание задаваемых параметров при проведении численных экспериментов с климатической моделью ИВМ РАН

Номер эксперимента	Концентрации ДМС в приповерхностном слое	Параметризация потока ДМС	Коэффициенты вымывания (m^{-1}) для конвективных и крупномасштабных осадков	Учет температуры при описании гравитационного оседания	Учет покрытия льдом поверхности	Задание антропогенных выбросов
1	По [19, 20] согласно [18]	По [19, 20] согласно [18]	420	$T > 273.15$ К	Нет	2005 г. по [8]
2	[26]	[27]	210 и 840	$T > 233$ К	Есть	2005 г. по [8]

большой влажности для низких температур до значения $T = 233$ К, которые возможны в условиях высоких широт. Дополнительно введен учет ледового покрытия океана при расчете потока диметилсульфида в атмосферу: при наличии льда в ячейке поток ДМС обнулялся. Также были внесены уточнения в величины коэффициентов вымывания осадками, выпадающими из конвективной и крупномасштабной облачности. В частности, для конвективных осадков коэффициент вымывания задавался в 2 раза меньшим ($K = 210 m^{-1}$) за счет дополнительного учета процессов вовлечения аэрозоля и меньшего балла облаков внутри ячейки. Для условий крупномасштабных осадков, наоборот, коэффициент вымывания задавался более высоким ($K = 840 m^{-1}$). Эти величины примерно соответствуют параметрам, которые задавались в [30], которые соответственно были равны $210 m^{-1}$ для конвективных и $750 m^{-1}$ — для крупномасштабных осадков.

Описание особенностей задания параметров при проведении численных экспериментов по стандартной схеме (численный эксперимент 1) и новой схеме расчета (численный эксперимент 2) АОТ сульфатного аэрозоля приведено в табл. 1. Для выяснения качества расчета АОТ сульфатного аэрозоля естественного происхождения проводились сравнения с данными реанализа CAMS для районов, удаленных от антропогенных выбросов с преобладанием морской поверхности. В частности, были выбраны морские области высоких широт южного полушария (55° – 65° ю.ш.), приэкваториальной зоны (5° с.ш.– 5° ю.ш.), морской Арктической зоны северного полушария (70° – 80° с.ш.) и зоны вокруг Северного полюса (80° – 90° с.ш.). Зонально осредненные данные по АОТ и их сравнения с реанализом CAMS для января и июля приведены в табл. 2. Видно, что в целом наблюдается лучшее согласие новых данных расчетов АОТ (численный эксперимент 2) с данными CAMS. В частности, в высоких широтах южного полушария, в Антарктическом регионе, отмечается существенное уменьшение завышенной ранее величины АОТ на 0.054 летом (в январе) и на 0.013 зимой (в июле), что приводит к

практически незначимым различиям АОТ с данными CAMS в пределах 0.01. Видно, что летом сульфатный аэрозоль естественного происхождения в этом регионе преобладает: его АОТ в три раза выше по сравнению с АОТ антропогенного происхождения. Зимой его доля существенно понижается, главным образом из-за меньшей концентрации и большей доли ледяного покрова.

Для высоких широт северного полушария, в Арктике, летом величина АОТэксп2 незначимо отличается от данных реанализа в отличие от завышенных значений АОТэксп1. В зимний период ее согласие с данными CAMS также улучшилось: разница с данными CAMS сократилась примерно на 0.05–0.06, однако значения остаются завышенными примерно на 0.05 относительно данных CAMS. Это завышение связано с сульфатным аэрозолем антропогенного происхождения, АОТ которого составляет примерно величину различий с данными CAMS и существенно больше его естественной составляющей (см. табл. 2). Вероятно, это определяется неточными эмиссиями антропогенного аэрозоля по [18].

В приэкваториальной зоне после введения новых данных результаты практически не изменились. АОТ несколько ниже (на 0.02) данных CAMS и мало меняется по сезонам. Небольшие концентрации ДМС связаны с высокими температурами приэкваториальных вод и невысокой биогенной активностью в этом регионе. Доля антропогенной составляющей по данным расчетов превышает долю естественной компоненты, но в целом она невелика, и указанное занижение может быть связано именно с недоучетом аэрозоля антропогенного происхождения.

Численные эксперименты показали, что основными факторами в уменьшении АОТ явились новые данные по ДМС, уточнение коэффициентов вымывания и учет отсутствия эмиссии ДМС из ячеек, покрытых льдом.

Рассмотрим, к чему привело использование новых данных в масштабе всего Земного шара. На рис. 3 отчетливо видно, что в январе наблюдается заметное сокращение сульфатного аэрозоля прак-

Таблица 2. Зонально осредненные величины АОТ на длине волны 550 нм, полученные в ходе первого (АОТ_{эксп1}) и второго (АОТ_{эксп2}) численных экспериментов с моделью ИВМ РАН, и их различия с данными реанализа CAMS для районов, удаленных от источников антропогенных эмиссий над морской поверхностью

	АОТ _{CAMS}	АОТ _{эксп2}	$\Delta\text{АОТ}2 = \text{АОТ}_{\text{эксп2}} - \text{АОТ}_{\text{CAMS}}$	$\Delta\text{АОТ}1 = \text{АОТ}_{\text{эксп1}} - \text{АОТ}_{\text{CAMS}}$	АОТ _{CAMS}	АОТ _{эксп2}	$\Delta\text{АОТ}2 = \text{АОТ}_{\text{эксп2}} - \text{АОТ}_{\text{CAMS}}$	$\Delta\text{АОТ}1 = \text{АОТ}_{\text{эксп1}} - \text{АОТ}_{\text{CAMS}}$
	январь				июль			
Антарктида 55°–65° ю.ш.	0.019	0.032 (0.0014, 0.0303)	0.013	0.067	0.003	0.008 (0.0030, 0.0050)	0.005	0.018
Арктика 70°–80° с.ш.	0.007	0.058 (0.0556, 0.0029)	0.051	0.101	0.020	0.024 (0.0210, 0.0030)	0.004	0.030
Зона вокруг Северного полюса 80°–90° с.ш.	0.007	0.061 (0.0575, 0.0033)	0.054	0.118	0.014	0.024 (0.0210, 0.0030)	0.010	0.036
Экватор 5° с.ш.–5° ю.ш.	0.040	0.018 (0.0115, 0.0065)	–0.022	–0.019	0.035	0.016 (0.0100, 0.0060)	–0.019	–0.015

Примечание. Для АОТ_{эксп2} в скобках приведены антропогенная и естественная компоненты АОТ сульфатного аэрозоля.

тически повсеместно по сравнению со старыми данными (см. верхнюю панель рис. 3). Причиной этого явления в континентальных районах стал, в первую очередь, более детализированный учет коэффициентов вымывания для осадков конвективного и крупномасштабного типов. Это в целом улучшает согласие с данными CAMS, особенно в южном полушарии и частично в высоких широтах северного полушария летом (ср. нижняя панель рис. 3 и 1). В то же время остается ряд проблемных территорий: излишне высокие значения АОТ еще наблюдаются зимой над Северной Евразией, и разнонаправленные тенденции завышения и занижения АОТ отмечаются над территорией Китая, что может быть вызвано несоответствием задания модельных источников эмиссий антропогенного аэрозоля реальным локальным источникам. В то же время над морскими акваториями вне зон влияния адвекции антропогенного аэрозоля наблюдается удовлетворительное согласие, что может также говорить об адекватном описании сульфатного аэрозоля естественного происхождения в модели. В низких широтах некоторое наблюдающееся занижение АОТ сульфатного аэрозоля, судя по особенно выраженным заниженным локальным точкам в промышленных регионах (например, восточное побережье Северной Амери-

ки, Мексики, восточный Китай), связано с заниженными эмиссиями антропогенной компоненты сульфатного аэрозоля, принятыми в модельных расчетах.

Радиационные эффекты сульфатного аэрозоля

На основании уточненных значений АОТ был оценен радиационный эффект (*RFE*) на верхней границе атмосферы (ВГА) для всего сульфатного аэрозоля и его компоненты естественного происхождения согласно:

$$RFE = B(\text{aerosol_SO}_4) - B(\text{no aerosol_SO}_4), \quad (4)$$

где *B* – коротковолновый радиационный баланс на ВГА.

Рассчитанные величины учитывали влияние сульфатного аэрозоля при средних условиях облачности. Поскольку сульфатный аэрозоль практически не поглощает в видимом диапазоне спектра, то его присутствие в атмосфере должно приводить к отрицательному радиационному эффекту, который проявляется в увеличении отражательной способности атмосферы и ведет к понижению температуры воздуха. В то же время в связи со значительными вариациями АОТ сульфатного аэрозоля антропогенного и естественного происхож-

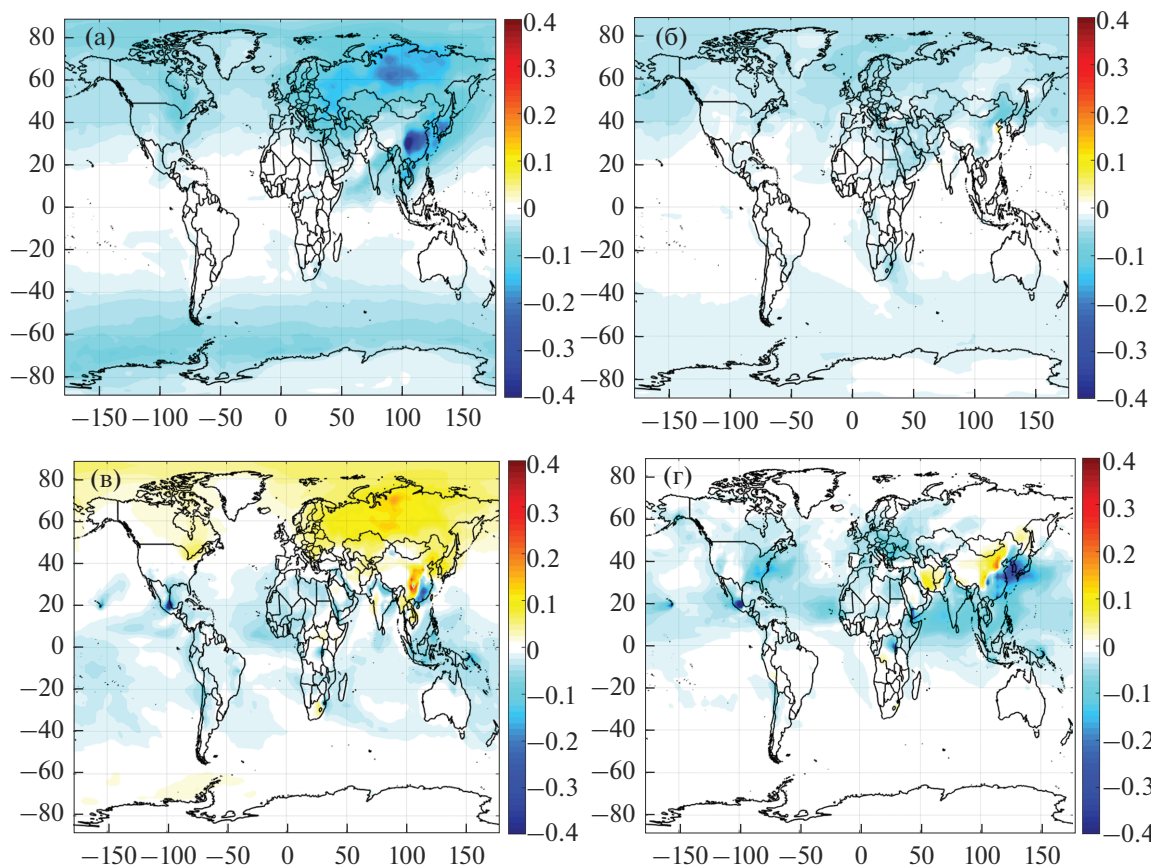


Рис. 3. Различия в АОТ сульфатного аэрозоля между результатами численных экспериментов $dAOT = AOT_{\text{эксп}2} - AOT_{\text{эксп}1}$ (верхняя панель) и между новыми данными $AOT_{\text{эксп}2}$ и AOT_{CAM5} (нижняя панель) в январе (а, в) и июле (б, г).

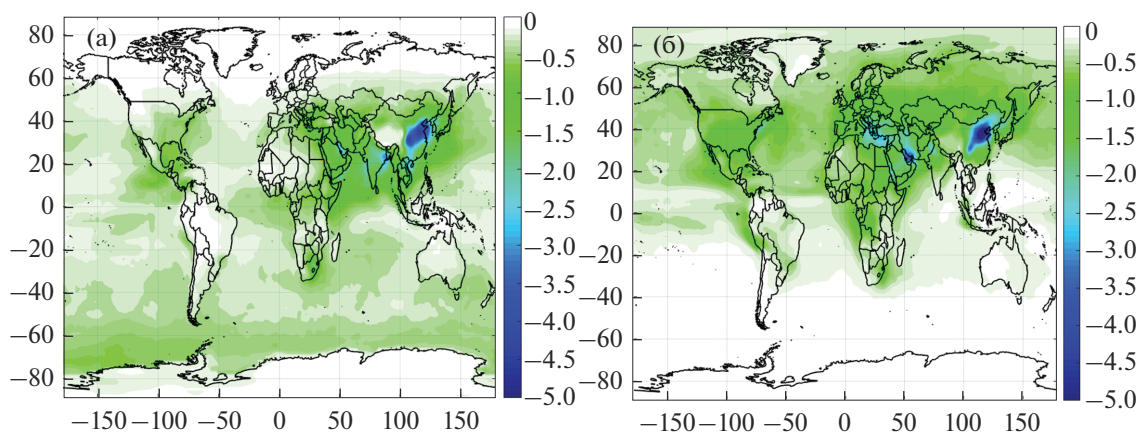


Рис. 4. Радиационный эффект сульфатного аэрозоля на ВГА (Вт м^{-2}) в январе (а) и июле (б) 2005 г.

дения величина RFE имеет выраженную неоднородность в пространственном и временном распределении (рис. 4). В сезонном ходе в январе сульфатный аэрозоль разного генезиса представлен в северном и южном полушариях примерно одинаково, в то время как в июле он в основном

сконцентрирован в северном полушарии. Годовые значения RFE меняются от -0.018 Вт м^{-2} в высоких широтах южного полушария при низкой высоте Солнца и очень малом аэрозольном содержании до -4.5 Вт м^{-2} — над районами Китая. Отметим, что оценки RFE в Китае несколько завы-

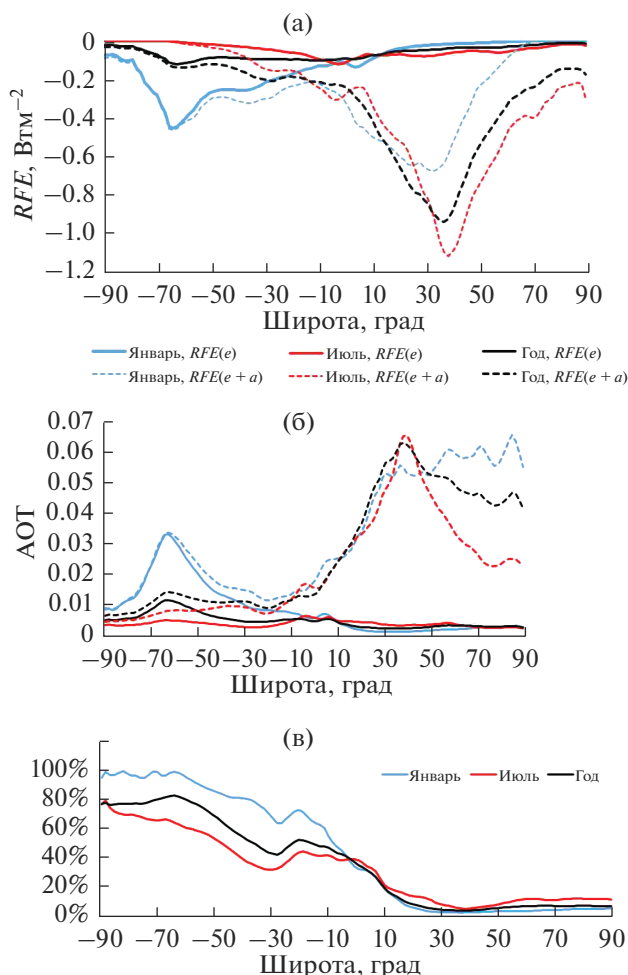


Рис. 5. Зонально осредненные радиационные эффекты (RFE , $Втм^{-2}$) сульфатного аэрозоля естественного и антропогенного происхождения, $RFE(e)$, и только естественного происхождения, $RFE(e+a)$, (а), АОТ сульфатного аэрозоля различного генезиса (легенда та же) (б), доля естественного аэрозоля в суммарном (в) в январе, июле и в целом за год.

шены по абсолютной величине в связи с локальным завышением эмиссий серосодержащих веществ (см. рис. 4).

Анализ зонально осредненных радиационных эффектов сульфатного аэрозоля естественного и антропогенного происхождения приведен на рис. 5а. Для сульфатного аэрозоля естественного происхождения минимальные по абсолютной величине годовые значения RFE порядка -0.01 – 0.02 $Втм^{-2}$ отмечаются в высоких широтах над Антарктическим континентом и в Арктике в связи с низкими высотами Солнца и удаленностью от антропогенных источников. В то же время над морским побережьем Антарктиды вследствие влияния увеличения зонально осредненного АОТ за счет эмиссий ДМС до 0.012 (см. рис. 5б) годовая величина RFE уже существенно выше, достигая

-0.14 $Втм^{-2}$, что является максимальным по абсолютному значению радиационным эффектом сульфатного аэрозоля естественного происхождения. Эти оценки соответствуют максимальным оценкам АОТ = 0.012, приведенным в [5], которые, однако, отмечены в приэкваториальной зоне. В целом, годовые значения АОТ ДМС в [5] несколько выше наших расчетных значений (соответственно 0.01 и 0.005), что, вероятно, связано с уточнением концентраций ДМС по [26], которое используется в этой работе. В летнее время (январь) у берегов Антарктиды в период максимальных сезонных концентраций ДМС и относительно большой высоты Солнца RFE за счет аэрозоля естественного происхождения достигает -0.45 $Втм^{-2}$. На рис. 5в видно, что в средних и высоких широтах южного полушария относительная доля аэрозоля этого генезиса преобладает, особенно в январе, когда ее величина доходит почти до 100%. Вследствие этого в южном полушарии летом максимальное по абсолютной величине значение RFE за счет суммарного эффекта естественного и антропогенного сульфатного аэрозоля лишь на 0.014 $Втм^{-2}$ выше RFE естественного сульфатного аэрозоля и равно -0.464 $Втм^{-2}$.

В то же время в северном полушарии доля естественного аэрозоля существенно меньше, составляя 12–13% летом в высоких широтах и уменьшаясь до 4–7% зимой в средних и высоких широтах. Однако эти величины могут быть несколько заниженными вследствие возможного завышения антропогенной компоненты сульфатного аэрозоля в этом регионе (см. дискуссию выше). В низких широтах в связи с отсутствием значительных антропогенных эмиссий доля естественного аэрозоля несколько увеличивается.

Наибольшие по абсолютной величине годовые зонально осредненные значения RFE , свыше -0.7 $Втм^{-2}$, отмечаются в области 25° – 45° с.ш., главным образом за счет влияния сульфатного аэрозоля антропогенного происхождения в Китае, на Ближнем Востоке и Средиземноморье. Отчетливо проявляются и сезонные особенности RFE : летом за счет большей высоты Солнца в средних и высоких широтах северного полушария он существенно больше, несмотря на более низкие АОТ по сравнению с зимним периодом. Максимальные зонально осредненные годовые значения RFE (-0.94 $Втм^{-2}$) приурочены к промышленным районам Китая на широте 36.5° с.ш.

Общий радиационный эффект сульфатного аэрозоля в южном полушарии в связи с преобладанием аэрозоля естественного происхождения меньше, чем в северном, и составляет примерно 30%.

Согласно численным экспериментам, на 2005 г. среднеглобальное годовое значение RFE сульфатного аэрозоля равно -0.36 $Втм^{-2}$ и мало меняется по сезонам года (табл. 3). В целом RFE за счет

Таблица 3. Глобально осредненные значения радиационного эффекта на верхней границе атмосферы (Втм^{-2}) за счет сульфатного аэрозоля естественного ($RFE(e)$) и антропогенного ($RFE(a)$) происхождения и суммарного их действия ($RFE(e+a)$), а также доля RFE естественного происхождения $K = RFE(e)/RFE(e+a)$, %

	$RFE(e)$	$RFE(a)$	$RFE(e+a)$	$K, \%$
Январь	-0.13	-0.22	-0.35	37
Июль	-0.06	-0.30	-0.36	16
Год	-0.07	-0.29	-0.36	20

Примечание. Эмиссии антропогенного аэрозоля задавались по данным на 2005 г.

естественного сульфатного аэрозоля составляет 20%, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [11]. Однако отмечаются значительные вариации этой величины по сезонам. Особенно усиливается роль естественной компоненты сульфатного аэрозоля в январе, когда ее доля RFE достигает 37%. Радиационный эффект антропогенной составляющей сульфатного аэрозоля составляет порядка -0.29 Втм^{-2} и несколько уменьшается по абсолютной величине в январе — до -0.22 Втм^{-2} за счет уменьшения вклада RFE северного полушария в зимний период из-за низких высот Солнца и несколько меньших АОТ в средних широтах. Это близко к величинам, полученным в [1], согласно модельному эксперименту AEROCOM II для периода с 1850 по 2010 г. [1, 2]. По этим данным величина радиационного форсинга сульфатного аэрозоля за счет антропогенных выбросов лежит в диапазоне от -0.13 до -0.61 Втм^{-2} с медианой -0.34 Втм^{-2} . Величина среднеглобального радиационного эффекта от сульфатного аэрозоля естественного происхождения меньше полученного в [5] (соответственно $RFE = -0.07$ и -0.23 Втм^{-2}). Это связано, прежде всего, с уточнениями, сделанными по концентрациям ДМС в [26]. Вполне удовлетворительное согласие расчетных данных АОТ сульфатного аэрозоля в удаленных регионах с данными реанализа позволяет говорить о надежности полученных нами оценок по RFE аэрозоля естественного происхождения.

ВЫВОДЫ

Уточнен расчет сульфатного аэрозоля естественного происхождения за счет эмиссии диметилсульфида (ДМС). Показано, что в результате существенно улучшилось согласие новых модельных оценок АОТ сульфатного аэрозоля с данными реанализа CAMS над морскими поверхностями в разные сезоны года.

Рассчитаны радиационные эффекты сульфатного аэрозоля на верхней границе атмосферы с учетом влияния суммарного эффекта аэрозоля естественного и антропогенного происхождения

и только аэрозоля естественного происхождения. Получены значительные пространственные и сезонные вариации радиационного эффекта. Над морским побережьем Антарктиды вследствие влияния увеличения зонально осредненной величины АОТ до 0.012 за счет эмиссий ДМС годовая величина RFE достигает по абсолютной величине 0.14 Втм^{-2} , что является максимальным радиационным эффектом сульфатного аэрозоля естественного происхождения. В то же время в январе в период максимальных сезонных концентраций ДМС и относительно большой высоты Солнца RFE за счет аэрозоля естественного происхождения вырастает по абсолютной величине до 0.45 Втм^{-2} .

Для годовых зонально осредненных величин в области $25^\circ-45^\circ$ с.ш RFE за счет аэрозоля естественного и антропогенного происхождения превышает 0.7 Втм^{-2} по абсолютной величине за счет антропогенных выбросов в Китае, Средиземноморье и Ближнем Востоке.

Согласно численным экспериментам на 2005 г., среднеглобальное годовое значение RFE сульфатного аэрозоля равно -0.36 Втм^{-2} и практически не меняется по сезонам года. В целом RFE за счет естественного сульфатного аэрозоля составляет 20%, однако отмечаются значительные вариации этой величины по месяцам. Особенно усиливается роль естественной компоненты сульфатного аэрозоля в январе, когда ее доля достигает 37%.

Величина среднеглобального радиационного эффекта от сульфатного аэрозоля естественного происхождения составляет $RFE = -0.07 \text{ Втм}^{-2}$, что меньше по абсолютной величине значения, полученного в [5]. Это связано, вероятно, с уточнениями пространственно-временного распределения концентрации ДМС по [26], которое было использовано в настоящей работе. Вполне удовлетворительное согласие расчетных данных АОТ сульфатного аэрозоля в удаленных регионах с данными реанализа позволяет говорить о надежности полученных нами оценок радиационного эффекта сульфатного аэрозоля естественного происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC: 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, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Myhre G., Samset B.H., Schulz M., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T.K., Bian H., Bellouin N., Chin M., Diehl T., Easter R.C., Feichter J., Ghan S.J., Hauglustaine, D.,

- Iversen T., Kinne S., Kirkevåg A., Lamarque, J.-F., Lin G., Liu X., Lund M.T., Luo G., Ma X., van Noije T., Penner J.E., Rasch P.J., Ruiz A., Seland, Ø., Skeie R.B., Stier P., Takemura T., Tsigaridis, K., Wang P., Wang Z., Xu L., Yu H., Yu F., Yoon J.-H., Zhang K., Zhang H., Zhou C. Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 1853–1877.
3. Myhre G., Myhre C.E.L., Samset B.H., Storelvmo T. Aerosols and their Relation to Global Climate and Climate Sensitivity // *Nature Education Knowledge*. 2013. V. 4(5): 7.
 4. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S.K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X.Y. Clouds and Aerosols // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2013. P. 571–659.
 5. Rap A., Scott C.E., Spracklen D.V., Bellouin N., Forster P.M., Carslaw K.S., Schmidt A., Mann G. Natural aerosol direct and indirect radiative effects // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 3297–3301.
 6. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons, 2016. 1149 p.
 7. Zheng G., Wang Y., Wood R. et al. New particle formation in the remote marine boundary layer // *Nat. Commun.* 2021. V. 527. № 12. 1 AB.
 8. Hoesly R.M., Smith S.J., Feng L., Klimont Z., Janssens-Maenhout G., Pitkanen T., Seibert J.J., Vu L., Andres R.J., Bolt R.M., Bond T.C., Dawidowski L., Kholod N., Kurokawa J.-I., Li M., Liu L., Lu Z., Moura M.C.P., O'Rourke P.R., Zhang Q. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS) // *Geosci. Model Dev.* 2018. V. 11. P. 369–408.
 9. Andreae M.O. Ocean–atmosphere interactions in the global biogeochemical sulfur cycle // *Marine Chem.* 1990. V. 30. P. 1–29.
 10. Chin M., Rood R.B., Lin S.-J., Msihler J.-F., Thompson A.M. Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Model description and global properties // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2000. V. 105. № D20. P. 24671–24687.
 11. Chin M., Savoie D.L., Huebert B.J., Bandy A.R., Thornton D.C., Bates T.S., Quinn P.K., Saltzman E.S., De Bruyn W.J. Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART' Comparison with field observations and regional budgets // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2000. V. 105. P. 24689–24712.
 12. Chin M., Jacob D.J., Gardner G.M., Foreman M.S., Fowler Spiro P.A., Savoie D.L. A global three-dimensional model of tropospheric sulfate // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1996. V. 101. D13. P. 18667–18690.
 13. Chin M.A., Jacob D.J. Anthropogenic and natural contributions to tropospheric sulfate: A global model analysis // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 18691–18699.
 14. Yang Y., Wang H., Smith S.J., Easter R.C., Rasch P.J. Sulfate aerosol in the Arctic: Source attribution and radiative forcing // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123. P. 1899–1918.
 15. Carslaw K.S., Boucher O., Spracklen D.V., Mann G.W., Rae J.G.L., Woodward S., Kulmala M. A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 1701–1737.
 16. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostrykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // *Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2018. V. 33. № 6. P. 367–374.
 17. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 4. С. 379–400.
 18. Володин Е.М., Кострыкин С.В. Аэрозольный блок в климатической модели ИВМ РАН // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 5–17.
 19. Putaud J., Nguyen C. Assessment of dimethylsulfide sea-air exchange rate // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № D2. P. 4403–4441.
 20. Kettle A., Andreae M., Amourou D. et al. A global database of sea surface dimethylsulfide (DMS) measurements and a procedure to predict sea surface DMS as a function of latitude, longitude, and month // *Global Biogeochem. Cycles*. 1999. V. 13. № 2. P. 399–444.
 21. Morcrette J.-J., Boucher O., Jones L., Salmond D., Bechtold P., Beljaars A. et al. Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: Forward modeling // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D06206.
 22. Gelaro R.W., McCarty M.J., Suárez R., Todling A., Molod L., Takacs C.A., Randles et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate*. 2017. V. 30. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
 23. Courtier P., Thépaut J. N., Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1994. V. 120. № 519. P. 1367–1387.
 24. Molod A., Takacs L., Suarez M., Bacmeister J. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2 // *Geosci. Model Dev.* 2015. V. 8. P. 1339–1356.
 25. Kleist D., Parrish D., Derber J., Treadon R., Errico R., Yang R. Improving incremental balance in the GSI 3D-VAR analysis system // *Monthly Weather Review*. 2008. V. 137. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2623.1>
 26. Wang W.-L., Song G., Primeau F., Saltzman E.S., Bell T.G., Moore J.K. Global ocean dimethyl sulfide climatology

- estimated from observations and an artificial neural network // *Biogeosciences*. 2020. V. 17. P. 5335–5354.
27. *Goddijn-Murphy L., Woolf D.K., Marandino C.* Space-based retrievals of air-sea gas transfer velocities using altimeters: Calibration for dimethyl sulfide // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C08028.
28. *Saltzman E.S., King D.B., Holmen K., Leck C.* Experimental determination of the diffusion coefficient of dimethylsulfide in water // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 16481–16486.
29. *Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. Мазина И.П., Хргиана А.Х. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 646 с.*
30. *Lohmann U., Feichter J., Chuang C., Penner J.* Prediction of the number of cloud droplets in the ECHAM GCM // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 104. № D8. P. 9169–9198.

Improving the Calculation of the Sulfate Aerosol Evolution and Its Radiative Effects in the INM RAS Climate Model

N. E. Chubarova^{1,*}, A. A. Poliukhov^{1,**}, and E. M. Volodin^{2,***}

¹*Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Lenin Hills, 1, Moscow, 119991 Russia*

²*Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Gubkin str., 8, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: natalia.chubarova@gmail.com*

***e-mail: aeromsu@gmail.com*

****e-mail: volodinev@gmail.com*

The improvements of sulfate aerosol simulations from natural dimethyl sulfide (DMS) emissions in the INM RAS model provide a better agreement between the new model estimates and the data of the CAMS reanalysis. Using these data and new recommended anthropogenic emissions the radiation effects (*RFE*) of the sulfate aerosol of different genesis are calculated at the upper boundary of the atmosphere. The maximum (in absolute values) radiation effect of natural sulfate aerosol is observed due to high DMS emissions over the sea coast of Antarctica where the annual *RFE* value is -0.14 Wm^{-2} , (up to -0.45 Wm^{-2} in January). For the 25° – 45° N area the annual zonally averaged *RFE* values exceed -0.7 Wm^{-2} due to anthropogenic emissions. The average global annual *RFE* value of the sulfate aerosol for 2005 is -0.36 Wm^{-2} without changing practically during the year. In general, the ratio of *RFE* due to natural sulfate aerosol comprises 20%, but there are significant variations in this value over the months with maximum in January, when this fraction reaches 37%.

Keywords: sulfate aerosol, dimethyl sulfide, numerical modeling, climate model of the INM RAS, radiative effects