

Особенности географического распределения соединений серы в Европе в начале XXI века

Р.Д. Гизатуллин¹⁾, А.В. Елисеев^{1),2),3)}, Ю.П. Переведенцев¹⁾

¹⁾ Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, 420097, Казань, ул. Товарищеская, 5

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, с. 2

³⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

*Адрес для переписки: eliseev@ifaran.ru

Реферат. По данным химического реанализа ЕМЕП MSC-W (European Program for Evaluation and Monitoring, Meteorological Synthesizing Center-West) проанализирована пространственно-временная изменчивость содержания диоксида серы и сульфатных аэрозолей для региона Европы в 2000-2015 гг. Выявлено, что в годовом ходе наибольшее среднее по пространству значение концентраций SO_2 и SO_4^{2-} отмечается в январе, а наименьшее – в июле для SO_2 и в апреле для SO_4^{2-} . Пространственное распределение концентраций соединений серы крайне неоднородно и характеризует естественные и антропогенные источники этих веществ, а также влияние метеорологического состояния атмосферы на химические преобразования серы в атмосфере. В первую очередь высокие значения концентрации серы отмечаются в развитых промышленных регионах, на территориях с высокой степенью вулканической активности.

В работе также был вычислен коэффициент отношения сульфатов и диоксида серы для территории Европы в сравнении с результатами, ранее полученными авторами работы для Китая. Выявлено, что в обоих случаях для регионов с приземной концентрацией сульфатов $q_{\text{SO}_4} \geq 1.5 \text{ мкг/м}^3$ соответствующие приземные концентрации связаны соотношением $q_{\text{SO}_4} / q_{\text{SO}_2} = k \cdot q_v$, с $k \approx 0.2 \text{ кг(air)/г(H}_2\text{O)}$, где q_v – приземная удельная влажность. Это говорит о достаточной широкой применимости построенной статистической модели, по крайней мере, на пространственном масштабе от сотен километров и более в регионах сильного загрязнения атмосферы соединениями серы.

Ключевые слова. Диоксид серы, сульфаты, статистическая модель, Европа.

Peculiarities of the geographical distribution of sulfur compounds over Europe in the early 21st century

R.D. Gizatullin¹⁾, A.V. Eliseev^{1),2),3)}, Yu.P. Perevedentsev¹⁾

¹⁾ Kazan Federal University,
5, Tovarishcheskaya, 420097, Kazan, Russian Federation

²⁾ Lomonosov Moscow State University,
1, bld.2, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation

³⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevsky, 119017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: eliseev@ifaran.ru

Abstract. Sulfates in the atmosphere modify the radiative budget of the Earth system. Their direct radiative forcing due to scattering of the solar radiation in the atmosphere from the pre-industrial period up to the 2010s is estimated to amount from -0.2 to -0.8 W m^{-2} . Because sulfates are hygroscopic, they are major contributors to the aerosol indirect effects on climate – the so-called aerosol-cloud interaction with the respective forcing from -0.2 to -1.2 W m^{-2} . Apart from influencing climate change, sulfur compounds impact terrestrial vegetation and thus the global carbon cycle via suppression of the terrestrial vegetation gross primary production arising from the uptake of sulfur dioxide by leaves with subsequent injury of photosynthesis tissues of plants as well as via acidification of soils and surface waters.

The spatial and temporal variability of sulfur dioxide and sulfate aerosols for the Europe region in 2000–2015 is studied based on the EMEP MSC-W chemical reanalysis data. It is found that the highest spatial average of SO_2 and SO_4^{2-} concentrations is observed in January, and the lowest in July for SO_2 and in April for SO_4^{2-} . Spatial distribution of concentrations of sulfur compounds is extremely heterogeneous and characterizes natural and anthropogenic sources of these substances, as well as the influence of the meteorological state of the atmosphere on chemical transformations of sulfur in the atmosphere. High values of sulfur concentrations are noted in the developed industrial regions, on the territories with a high degree of volcanic activity.

The paper also calculated the ratio of sulfate to sulfur dioxide over Europe in comparison with the results previously obtained by the authors for China. It was found that in both cases for regions with a surface concentration of sulfate $q_{\text{SO}_4} \geq 1.5 \mu\text{g/m}^3$, the corresponding surface concentrations are related by the relation $q_{\text{SO}_4} / q_{\text{SO}_2} = k \cdot q_v$ with $k \approx 0.2 \text{ kg(air)/g(H}_2\text{O)}$, where q_v is the surface specific humidity. This indicates a sufficiently wide applicability of the constructed statistical model, at least on a spatial scale of hundreds of kilometers and more in regions of strong atmospheric pollution by sulfur compounds.

Keywords. Sulfur dioxide, sulfates, statistical model, Europe.

Введение

Увеличение содержания сульфатных аэрозолей в тропосфере одна из причин глобальных климатических изменений. В связи с изменением содержания этих аэрозолей в последние десятилетия модифицируется скорость изменения климата. В частности, сульфатные аэрозоли в атмосфере приводят к развитию охлаждающего радиационно-возмущающего воздействия, частично компенсирующего нагрев из-за увеличения содержания парниковых газов. Это воздействие связано как с прямым рассеянием солнечной радиации сульфатами (Зуев, Титов, 1996; Koch et al., 1999; Елисеев и др., 2007; Переведенцев и др., 2013; Naik et al., 2021), так и с влиянием на радиационные характеристики облаков (Charlson et al., 1992; Naik et al., 2021). Первый эффект приводит к радиационному возмущающему воздействию (РВВ), современное значение для которого составляет от 0.2 до 0.8 Вт м⁻² относительно доиндустриального периода, оценивается равным (Zelinka et al., 2014; Matus et al., 2019; Naik et al., 2021). Влияние сульфатных аэрозолей на радиационные характеристики облаков приводит к дополнительному соответствующему РВВ, равному от 0.2 до 1.2 Вт м⁻² (Zelinka et al., 2014; McCoy et al., 2017). Кроме того, соединения серы влияют на интенсивность наземного фотосинтеза – т.е. на характеристики углеродного цикла и показатели обратной связи между климатом и углеродным циклом (Семенов и др., 1998; Елисеев, 2015; Eliseev, 2015; Елисеев и др., 2019).

Источником серы для атмосферы служат как естественные (выделения из вулканов, продукты жизнедеятельности морской биоты, наземные экосистемы), так и антропогенные процессы. Для антропогенных процессов наиболее значимо выделение сернистого газа SO₂.

Соединения серы в атмосфере участвуют в цепочках химических преобразований с образованием сернистого газа из диметилсульфида и сульфатных аэрозолей из сернистого газа. Сернистый газ также выводится из атмосферы преимущественно сухим оседанием, а сульфатные аэрозоли – влажным. Дополнительный второстепенный источник SO₂ связан с сжиганием биомассы.

Основные соединения серы в атмосфере – сернистый газ SO₂, диметилсульфид (CH₃)₂S и сульфатные аэрозоли, содержащие сульфат-ион SO₄²⁻ (прежде всего – серная кислота H₂SO₄ и сульфат аммония (NH₄)₂SO₄) (Суркова, 2002; Seingeld, Pandis 2006; Warneck, 2000). Менее распространенными, но все же важными в глобальном цикле серы являются диметилсульфоксид (ДМСО) и метансульфоновая кислота (MSA). Все эти вещества химически взаимодействуют друг с другом и подвергаются влажному и сухому осаждению на поверхности Земли.

Ранее авторами данной работы была построена статистическая модель для связи приземных концентрации диоксида серы и сульфатов для региона Китая (Елисеев и др., 2019). Эта модель была включена в модель Земной системы промежуточной сложности (МЗСПС) ИФРАН-МГУ (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова). Это сделано для возможности восста-

новления поля приземной концентрации диоксида серы по соответствующему полю для сульфатов (для которых существуют стандартные сценарии, доступные, например, в рамках проекта Coupled Models Intercomparison Project (Lamarque et al., 2013)). В свою очередь, для приземной концентрации SO_2 такие сценарии недоступны. При этом в МЗСПС ИФРАН-МГУ поле приземной концентрации диоксида серы используется для вычисления влияния этого газа на интенсивность фотосинтеза наземной растительности (Елисеев, 2015; Eliseev, 2015; Елисеев и др., 2019).

Как уже было отмечено, параметры схемы (Елисеев и др. 2019) были вычислены только с использованием данных для юго-восточной Азии. Как следствие, эта схема может быть неприменима для других регионов. Европейский регион принципиально отличается от региона Китая по метеорологическим показателям (Хромов, Петросянц, 2006). В частности, для юго-востока Азии характерна муссонная циркуляция с сезонным изменением направления ветра (приводящее к сезонному изменению доминирующего влияния воздушных масс из различных регионов – либо с суши, либо с океана) и значительной сезонной зависимостью осадков. В Европе основную роль играют обложные осадки, и в целом доминирует западная циркуляция атмосферы, так что на протяжении всего года основное влияние, наряду с локальными источниками влаги в атмосферу и локальными источниками эмиссий соединений серы, оказывают океанические воздушные массы, характеризующиеся повышенной влажностью и относительно малым загрязнением соединениями серы.

В связи с последним целесообразно расширение анализа, подобного (Елисеев и др., 2019) и на другие регионы относительно сильного аэрозольного загрязнения, но характеризующихся своими особенностями динамики атмосферы. Такая попытка сделана в данной работе, где проведён соответствующий анализ полей соединений серы для региона Европы и обобщение ранее построенной модели на этот регион.

Статистическая модель для связи приземных концентраций SO_2 и SO_4^{2-}

Используемая в данной работе статистическая модель для связи между приземными концентрациями сернистого газа и сульфат-иона (q_{SO_2} и q_{SO_4} соответственно) была получена в (Елисеев и др., 2019). Она основана на уравнении баланса массы SO_4^{2-} при наличии химических реакций его образования из SO_2 с интенсивностью R , притока SO_4^{2-} к данному объёму атмосферы (или оттока от него) за счёт динамических процессов (адвекции, диффузии и конвекции) с интенсивностью D и стока из атмосферы с интенсивностью S . Предполагая, что

- скорость химических реакций подчиняется кинетике первого порядка;
- q_{ox} – приземная концентрация окислителей SO_2 пропорциональна содержанию водяного пара q_v в данном объёме атмосферы с коэффициентом k_{ox} :

$$q_{\text{ox}} = k_{\text{ox}} q_v.$$

(это предположение основано на том, что эти окислители – гидроксил-радикал и пероксид-радикал (Суркова, 2002; Seinfeld, Pandis, 2012) – образуются при диссоциации водяного пара и перекиси водорода);

- сток сульфат-ионов из атмосферы обусловлен их захватом осадками и гравитационным оседанием, так что интенсивность этого стока пропорциональна q_{SO_4} с коэффициентом $-k_S \cdot S$, зависящим от интенсивности и типа осадков (Суркова, 2002; Seinfeld, Pandis 2006); в данной работе для простоты указанная зависимость не учитывается, и величина k_S считается постоянной;

- вклад динамики атмосферы D в изменение q_{SO_4} мал.

В таком случае то отношение концентраций q_{SO_4} и q_{SO_2} можно выразить в виде:

$$K = q_{SO_4} / q_{SO_2} = (k R k_{ox} / k_S S) q_v = k q_v.$$

В (Елисеев и др., 2019) по среднемесячным полям q_{SO_2} , q_{SO_4} , полученным по результатам расчётов с RAMS-CMAQ, и метеорологических показателей атмосферы по данным реанализа был вычислены коэффициенты K и k . При построении соответствующей линейной регрессии после горизонтального осреднения полей по всему расчётному домену оценка значения коэффициента $k = 0.22 \pm 0.05$ кг(air)/г(H₂O) (при этом предполагается, что концентрация SO₂ и SO₄²⁻ выражены в единицах массы элементарной серы в единице объёма воздуха).

Использованные данные

В данной работе коэффициент связи концентраций SO₂ и SO₄²⁻ был повторно вычислен для региона Европы 30°-82°с.ш. 30°з.д.-90°в.д для 2000-2015 гг. по данным расчётов с моделью EMEP MSC-W (European Program for Evaluation and Monitoring, Meteorological Synthesizing Center-West) (Simpson et al., 2012) для концентрации SO₂ и SO₄²⁻ в атмосфере, доступные на сайте https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html (EMEP, 2019, 2020, 2021). Проект EMEP MSC-W является частью проекта CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) (Inness et al., 2019). В частности, ряд антропогенных источников атмосферных примесей и их химических предшественников при расчётах EMEP MSC-W был задан по данным CAMS. Сравнение полей концентраций атмосферных примесей между проектами для 2019 г. доступно в (EMEP, 2019).

Значения удельной приземной влажности на уровнях 850, 900 и 1000 гПа были взяты из данных реанализа ERA-Interim (Dee et al., 2011) для 2000-2015 гг. Отметим, что выбор трёх уровней для задания полей удельной влажности для статистической модели связи приземных концентраций соединений серы обусловлен быстрым (за несколько часов при отсутствии метеорологических инверсий) перемешиванием в приземном пограничном слое с типичной толщиной 1-2 км. Как следствие, использование трёх близких между собой (но не идентичных друг другу) вариантов задания значений поля удельной влажности позволяет проанализировать чувствительность полученных результатов к неопределённости данного параметра.

Географическое распределение содержания диоксида серы в Европе

По данным географического распределения концентраций частиц SO_2 и SO_4^{2-} , полученным по расчетам с моделью EMEP MSC-W за указанный выше период времени наибольшее среднее значение концентрации SO_2 на всей рассматриваемой территории отмечается в январе и составляет 1.4 мкг/м^3 , наименьшее значение приходится на июль – 0.61 мкг/м^3 (рис. 1).

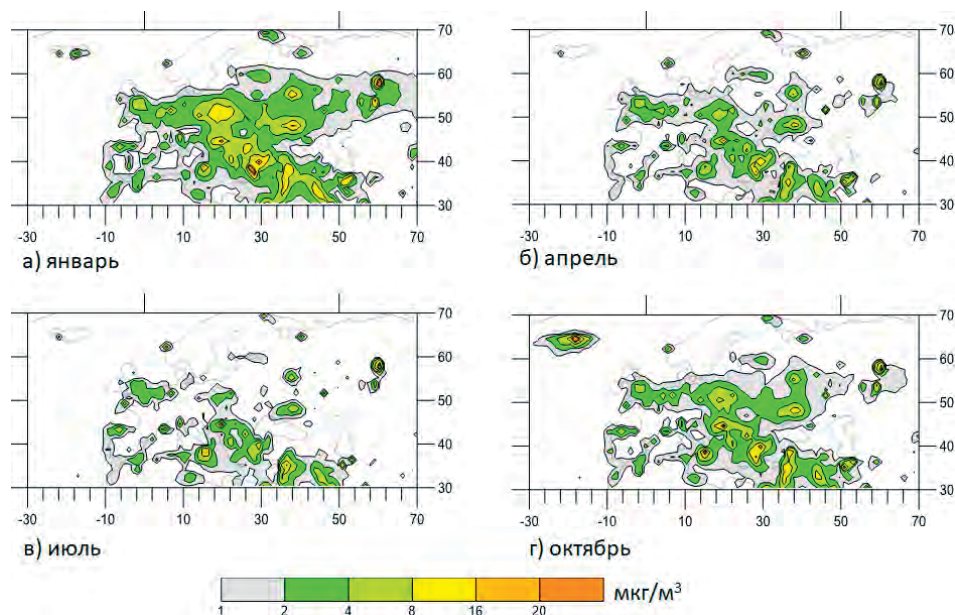


Рисунок 1. Приземная концентрация SO_2 по данным EMEP, осреднённая за 2000-2015 гг.

Figure 1. Near-surface SO_2 concentration from the EMEP data averaged over 2000-2015

В пространственном распределении концентрации диоксида серы выделяются несколько максимумов – территория Исландии, Центральная Европа, южная часть Италии, запад Турции и Сирии, на территории России это – Свердловская и Челябинская области, значения концентрации вещества в перечисленных районах достигают $15\text{-}20 \text{ мкг/м}^3$.

Причиной высоких значений концентрации над Исландией является, по-видимому, вулканическая деятельность – в 2000-2015 гг. произошли четыре вулканических извержения. Максимальные значения q_{SO_2} в годовом ходе отмечаются в октябре и достигают 35 мкг/м^3 . Высокие значения концентрации двуокиси серы над Центральной Европой и югом Италии, где они достигают $15\text{-}20 \text{ мкг/м}^3$, связаны с выбросами от транспорта и металлургической промышленности. В северо-западной части Турции, где максимум q_{SO_2} составляет 25 мкг/м^3 , расположены два крупных государственных предприятия по производству чёрных металлов. Свердловская и Челябинская области, в свою очередь, являются одними из важнейших промышленных регионов России, в структуре промышленного комплекса которых доминируют черная

и цветная металлургия, поэтому высокие значения концентрации SO_2 (20-30 мкг/м^3) отмечаются за все рассматриваемые месяцы.

Минимальные значения концентрации отмечены над Скандинавским полуостровом. Исключением являются западное побережье Норвегии, где источниками выбросов сернистого газа являются заводы по производству алюминия и чёрная металлургия, здесь значения q_{SO_2} достигают 5 мкг/м^3 , а также территория вокруг Финского залива с приземными концентрацией в интервале 2-3 мкг/м^3 .

Географическое распределение содержания сульфатных аэрозолей в Европе

В среднем для указанного региона в годовом ходе приземная концентрация SO_4^{2-} достигает максимума, равного 0.81 мкг/м^3 , в январе, а минимум – в апреле (0.55 мкг/м^3) (рис. 2).

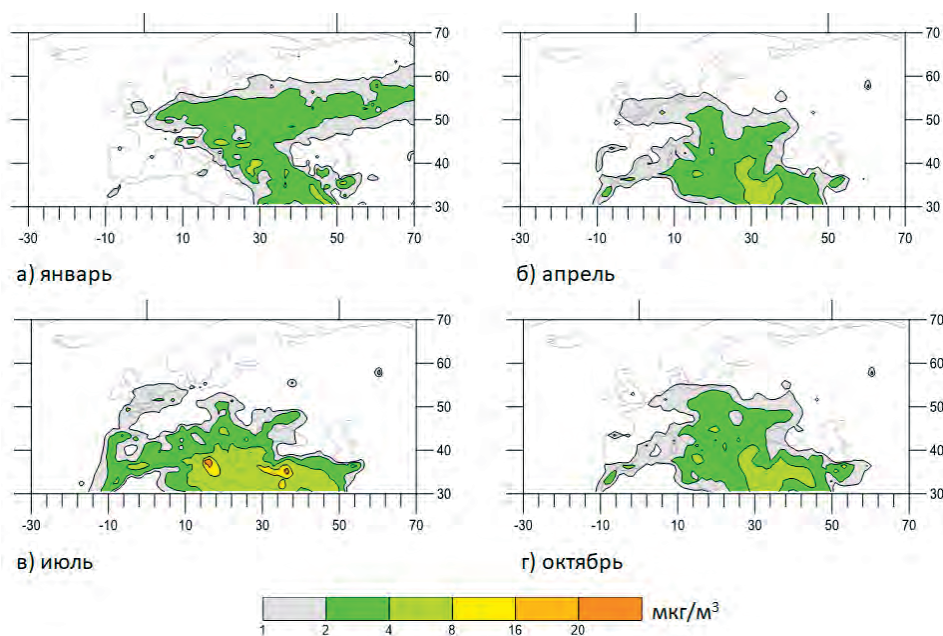


Рисунок 2. Приземная концентрация SO_4^{2-} по данным EMEP, осреднённая за 2000-2015 гг.

Figure 2. Near-surface SO_4^{2-} concentration from the EMEP data averaged over 2000-2015

Максимальные концентрации сульфатов отмечаются в июле в районе юга Италии, прибрежной территории Турции и Сирии, где они достигают 10 мкг/м^3 . Причиной высоких значений q_{SO_4} в районе острова Сицилии, по-видимому, являются вулканическая активность и загрязнения антропогенного характера. Западные регионы Турции и Сирии также имеют промышленные источники выделения серы, можно отметить и небольшую долю вклада источников сульфатов вблизи восточного побережья Средиземного моря естественного происхождения, образующиеся благодаря окислению диметилсульфида, выделяемого морской биотой.

Было отмечено, что в январе концентрация сульфатов в Европе максимальна в центре и на востоке. Это, по-видимому, связано с проявлением атмосферных инверсий зимой, что ведёт к подавлению переноса загрязняющих веществ из приземного в более высокие слои атмосферы и, следовательно, увеличению их концентрации у поверхности Земли.

В июле зона с наибольшим содержанием сульфатов располагается над Средиземным морем (10 мкг/м^3). Это объясняется сильным испарением при сопутствующем увеличении влагоёмкости атмосферы в тёплый период, и, как следствие, повышенной влажностью, приводящими к формированию большого количества гидроксил-радикала – основного окислителя диоксида серы.

Коэффициент связи для содержания SO_2 и SO_4^{2-} в приземном слое над Европой

Подобно (Елисеев и др., 2019), в данной работе был вычислен коэффициент k , связывающий концентрации диоксида серы и сульфатов в зависимости от содержания водяного пара. При этом была проанализирована чувствительность этого коэффициента к выбору изобарического уровня внутри приземного пограничного слоя. Это связано с общим увеличением скорости ветра с высотой и с соответствующим уменьшением содержания соединений серы и водяного пара (Jaenicke, 1993; Warneck, 2000; Wuryuch, Bochenek, 2018; Елисеев и др., 2022). Для исключения численных проблем из расчётов были исключены области с приземными концентрациями сульфатов менее 1.5 мкг/м^3 . Коэффициент k был вычислен для каждого узла сетки с последующим его осреднением по пространству.

Анализ данных EMEP MSC-W для концентраций указанных соединений серы и данных ERA-Interim для содержания водяного пара над Европой привёл к следующим результатам для k в зависимости от изобарического уровня, использованного для данных об удельной влажности:

- 1000 гПа: $0.19 \text{ кг(air)/г(H}_2\text{O)}$,
- 900 гПа: $0.18 \text{ кг(air)/г(H}_2\text{O)}$,
- 850 гПа: $0.20 \text{ кг(air)/г(H}_2\text{O)}$.

Таким образом, значения k мало чувствительны к выбору, указанного выше, изобарического уровня. Как следствие, для Европы $k=0.19 \pm 0.01 \text{ кг(air)/г(H}_2\text{O)}$.

Это значение близко к полученному в (Елисеев и др., 2019) для территории Китая. Следовательно, можно говорить о достаточно широкой применимости статистической модели (Елисеев и др., 2019), по крайней мере, на грубом (от сотен километров и более) пространственном масштабе в регионах сильного загрязнения атмосферы соединениями серы.

Дополнительно отметим, что вычисления были проведены и для предварительного осреднения полей концентраций по пространству (также при исключении узлов сетки с приземными концентрациями сульфатов менее 1.5 мкг/м^3). Полученные при этом результаты мало отличаются от приведённых выше.

Заключение

В данной работе проведён анализ полей приземных концентраций сернистого газа и сульфатов (q_{SO_2} и q_{SO_4} соответственно) по данным расчётов с моделью EMEP MSC-W (European Program for Evaluation and Monitoring, Meteorological Synthesizing Center-West) в регионе 30-82°с.ш. 30°з.д.-90°в.д для 2000-2015 гг. Этот анализ позволил выявить регионы с максимальным загрязнением приземного слоя атмосферы соединениями серы и связать их с естественными и антропогенными источниками серы и особенностями метеорологической ситуации в атмосфере.

Кроме того, построенная ранее для региона Китая статистическая модель связи между q_{SO_2} и q_{SO_4} обобщена и на другой регион значительного загрязнения соединениями атмосферы – Европу. Это связано с принципиальным различием метеорологических условий между Европой (с доминированием западного переноса и связанной с волнами Россби синоптической изменчивостью) и юго-восточной Азией (где основную роль играет муссонная циркуляция). При этом дополнительно была проанализирована чувствительность результатов к неопределённости задания поля удельной влажности атмосферы. В результате этого было получено, что коэффициенты этой модели на больших (см. ниже) пространственных масштабах мало различаются между указанными регионами, так что $q_{SO_4} / q_{SO_2} = k \cdot q_v$ с $k \approx 0,2$ кг(air)/г(H₂O), где q_v – удельная влажность. Как следствие, можно говорить о том, что она в целом адекватно учитывает физико-химические процессы цикла серы в атмосфере на указанных масштабах.

В свою очередь, достаточность пространственного масштаба для применимости модели может быть оценена, с учётом характерных времён жизни сернистого газа и сульфатов в нижней тропосфере - как произведение скорости ветра на наибольшее значение из таких времён жизни. Для сернистого газа и сульфатов эти показатели составляют 1-2 сут. и 4-5 сут. соответственно (Суркова, 2002; Koch et al., 1999; Seinfeld, Pandis, 2012; Eliseev et al., 2021). Как следствие порядок величины минимального горизонтального масштаба применимости построенной модели может быть оценен величиной 1000 км, что составляет примерно 2 градуса по широте и 4 градуса по долготе. Именно поэтому в данной работе мы ограничились рассмотрением регионов указанного размера.

От авторов. Авторы выражают признательность анонимному рецензенту за замечания к предыдущей версии работы. Работа была проведена с использованием УНУ "Самолет-лаборатория ТУ-134 "Оптик" при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2021-934).

Список литературы

Елисеев, А.В. (2015) Влияние соединений серы в тропосфере на наземный углеродный цикл, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 51, № 6, с. 673-683.

Елисеев, А.В., Мохов, И.И., Карпенко, А.А. (2007) Влияние учета прямого радиационного воздействия сульфатных аэрозолей на результаты численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 43, № 5, с. 591-601.

Елисеев, А.В., Тимажев, А.В., Хименес, П.Л. (2022) Вертикальный масштаб для профилей водяного пара и соединений серы в нижней тропосфере, *Оптика атмосферы и океана*, т. 35 (в печати).

Елисеев, А.В., Чжан, М., Гизатуллин, Р.Д., Алтухова, А.В., Переведенцев, Ю.П., Скороход, А.И. (2019) Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углеродный цикл, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 55, № 1, с. 41-53.

Зуев, В.Е., Титов, Г.А. (1996) *Оптика атмосферы и климат*, Томск, Спектр, 272 с.

Семенов, С.М., Кунина, И.М., Кухта, Б.А. (1998) Сравнение антропогенных изменений приземных концентраций O_3 , SO_2 , CO_2 в Европе по экологическому критерию, *Доклады РАН*, т. 361, № 2, с. 275-279.

Суркова, Г.В. (2002) *Химия атмосферы*, М., Диалог-МГУ, 210 с.

Переведенцев, Ю.П., Мохов, И.И., Елисеев, А.В. Шанталинский, К.М., Важнова, Н.А. (2013) *Теория общей циркуляции атмосферы*, Казань, Из-во Казанского университета, 224 с.

Хромов, С.П., Петросянц, М.А. (2006) *Метеорология и климатология*, М., Из-во Моск. ун-та, 582 с.

Charlson, R., Schwartz, S., Hales, J., Cess, R., Coackley, J., Hansen, J., Hofmann, D. (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, vol. 255, no. 5043, pp. 423-430, doi: 10.1126/science.255.5043.423.

Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A., Monge-Sanz, B., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F. (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol. 137, no. 656, pp. 553-597, doi: 10.1002/qj.828, 2011.

Eliseev, A.V. (2015) Impact of tropospheric sulphate aerosols on the terrestrial carbon cycle, *Glob. Planet. Change*, vol. 124, pp. 30-40.

Eliseev, A.V., Gizatullin, R.D., Timazhev, A.V. (2021) ChAP 1.0: a stationary tropospheric sulfur cycle for earth system models of intermediate complexity, *Geoscientific Model Development*, vol. 14, no. 12, pp. 7725-7747, doi: 10.5194/gmd-14-7725-2021.

EMEP (2019) *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components*, EMEP Status Report 1/2019, Oslo, The Norwegian Meteorological Institute, 244 p.

EMEP (2020) *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components*, EMEP Status Report 1/2020, Oslo, The Norwegian Meteorological Institute, 270 p.

EMEP (2021) *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components*, EMEP Status Report 1/2021, Oslo, The Norwegian Meteorological Institute, 220 p.

Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., Suttie, M. (2019) The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 19, no. 6, pp. 3515-3556, doi: 10.5194/acp-19-3515-2019.

Jaenicke, R. (1993) *Tropospheric aerosols – Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, in: Hobbs, P. (ed.), San Diego, Academic Press, pp. 1-31.

Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*, San Diego, Academic Press, 927 p.

Wypych, A., Bochenek, B. (2018) Vertical structure of moisture content over Europe, *Adv. Meteorol.*, vol. 2018, 3940503, doi:10.1155/2018/3940503.

Koch, D., Jacob, D., Tegen, I., Rind, D., Chin, M. (1999) Tropospheric sulfur simulation and sulfate direct radiative forcing in the Goddard Institute for Space Studies general circulation model. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 645 p., doi: 10.1029/1999JD900248.

Lamarque, J.-F., Kyle, G.P., Meinshausen, M., Riahi, K., Smith, S.J., van Vuuren, D.P., Conley, A.J., Vitt, F. (2013) Global and regional evolution of short-lived radiatively-active gases and aerosols in the Representative Concentration Pathways, *Climatic Change*, vol. 109, no. 1-2, pp. 191-212, doi: 10.1007/s10584-011-0155-0.

Matus, A., L'Ecuyer, T., Henderson, D. (2019) New estimates of aerosol direct radiative effects and forcing from A-Train satellite observations, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 46, no. 14, pp. 8338-8346, doi: 10.1029/2019GL083656.

McCoy, D., Bender, F.-M., Mohrmann, J., Hartmann, D., Wood, R., Grosvenor, D. (2017) The global aerosol-cloud first indirect effect estimated using MODIS, MERRA, and AeroCom, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, vol. 122, no. 3, pp. 1779-1796, doi: 10.1002/2016JD026141.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2012) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Hoboken, Wiley, 1232 p.

Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L., Fagerli, H., Flechard, C., Hayman, G., Gauss, M., Jonson, J., Jenkin, M., Nyíri, A., Richter, C., Semeena, V., Tsyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, Á., Wind, P. (2012) The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, no. 16, pp. 7825-7865, doi: 10.5194/acp-12-7825-2012.

Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*, San Diego, Academic Press, 927 p.

Naik, V., Szopa, S., Adhikary, B., Artaxo, P., Berntsen, T., Collins, W.D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., Zanis, P. (2021) *Short-Lived Climate Forcers – Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in: Masson- Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.), Cambridge, Cambridge University Press, (in press).

Zelinka, M., Andrews, T., Forster, P., Taylor, K. (2014) Quantifying components of aerosol-cloud-radiation interactions in climate models, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, vol. 119, no. 12, pp. 7599-7615, doi: 10.1002/2014JD021710.

References

Eliseev, A.V (2015). Influence of sulfur compounds on the terrestrial carbon cycle. *Izvestiya, Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 51, no. 6, pp. 599-608.

Eliseev, A.V., Mokhov, I.I., Karpenko, A.A. (2007). Influence of direct sulfate-aerosol radiative forcing on the results of numerical experiments with a climate model of intermediate complexity. *Izvestiya, Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 544-554.

Eliseev, A.V., Timazhev, A.V., Jimenez, P.L. (2022) Vertikal'nyy masshtab dlya profiley vodyanogo para i soyedineniy sery v nizhney troposfere [Vertical scale for profiles of water vapor and sulfur species in the lower troposphere], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 35 (in press).

Eliseev, A.V., Zhang, M., Gizatullin, R.D., Altukhova, A.V., Perevedentsev, Yu.P., Skorokhod, A.I. (2019). Impact of sulfur dioxide on the terrestrial carbon cycle. *Izvestiya, Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 55, no. 1, pp. 38-49.

Semenov, S.M., Kounina, I.M., Koukhta, B.A. (1998). An ecological analysis of anthropogenic changes in ground-level concentrations of O₃, SO₂, and CO₂ in Europe. *Doklady Biol. Sci.*, vol. 361, pp. 344-347.

Surkova, G.V. (2002) *Khimiya atmosfery* [Atmospheric Chemistry], Dialog-MGU, Moscow, Russia, 210 p.

Perevedentsev, Yu.P., Mokhov, I.I., Eliseev, A.V. Shantalinsky, K.M., Important, N.A. (2013) *Teoriya obshchey tsirkulyatsii atmosfery* [Theory of General Atmospheric Circulation], Kazan University Press, Kazan, Russia, 224 p.

Khromov, S.P., Petrosyants, M.A. (2006) *Meteorologiya i klimatologiya* [Meteorology and climatology], Moscow State University, Moscow, Russia, 582 p.

Charlson, R., Schwartz, S., Hales, J., Cess, R., Coackley, J., Hansen, J., Hofmann, D. (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, vol. 255, no. 5043, pp. 423-430, doi: 10.1126/science.255.5043.423.

Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A., Monge-Sanz, B., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F. (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol. 137, no. 656, pp. 553-597, doi: 10.1002/qj.828, 2011.

Eliseev, A.V. (2015) Impact of tropospheric sulphate aerosols on the terrestrial carbon cycle, *Glob. Planet. Change*, vol. 124, pp. 30-40.

Eliseev, A.V., Gizatullin, R.D., Timazhev, A.V. (2021) ChAP 1.0: a stationary tropospheric sulfur cycle for earth system models of intermediate complexity, *Geoscientific Model Development*, vol. 14, no. 12, pp. 7725-7747, doi: 10.5194/gmd-14-7725-2021.

EMEP (2019) *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components*, EMEP Status Report 1/2019, Oslo, The Norwegian Meteorological Institute, 244 p.

EMEP (2020) *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components*, EMEP Status Report 1/2020, Oslo, The Norwegian Meteorological Institute, 270 p.

EMEP (2021) *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components*, EMEP Status Report 1/2021, Oslo, The Norwegian Meteorological Institute, 220 p.

Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., Suttie, M. (2019) The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 19, no. 6, pp. 3515-3556, doi: 10.5194/acp-19-3515-2019.

Jaenicke, R. (1993) *Tropospheric aerosols – Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, in: Hobbs, P. (ed.), San Diego, Academic Press, pp. 1-31.

Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*, San Diego, Academic Press, 927 p.

Wyruch, A., Bochenek, B. (2018) Vertical structure of moisture content over Europe, *Adv. Meteorol.*, vol. 2018, 3940503, doi:10.1155/2018/3940503.

Koch, D., Jacob, D., Tegen, I., Rind, D., Chin, M. (1999) Tropospheric sulfur simulation and sulfate direct radiative forcing in the Goddard Institute for Space Studies general circulation model. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 645 p., doi: 10.1029/1999JD900248.

Lamarque, J.-F., Kyle, G.P., Meinshausen, M., Riahi, K., Smith, S.J., van Vuuren, D.P., Conley, A.J., Vitt, F. (2013) Global and regional evolution of short-lived radiatively-active gases and aerosols in the Representative Concentration Pathways, *Climatic Change*, vol. 109, no. 1-2, pp. 191-212, doi: 10.1007/s10584-011-0155-0.

Matus, A., L'Ecuyer, T., Henderson, D. (2019) New estimates of aerosol direct radiative effects and forcing from A-Train satellite observations, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 46, no. 14, pp. 8338-8346, doi: 10.1029/2019GL083656.

McCoy, D., Bender, F.-M., Mohrmann, J., Hartmann, D., Wood, R., Grosvenor, D. (2017) The global aerosol-cloud first indirect effect estimated using MODIS, MERRA, and AeroCom, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, vol. 122, no. 3, pp. 1779-1796, doi: 10.1002/2016JD026141.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2012) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Hoboken, Wiley, 1232 p.

Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L., Fagerli, H., Flechard, C., Hayman, G., Gauss, M., Jonson, J., Jenkin, M., Nyíri, A., Richter, C., Semeena, V., Tsyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, Á., Wind, P. (2012) The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, no. 16, pp. 7825-7865, doi: 10.5194/acp-12-7825-2012.

Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*, San Diego, Academic Press, 927 p.

Naik, V., Szopa, S., Adhikary, B., Artaxo, P., Berntsen, T., Collins, W.D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., Zanis, P. (2021) *Short-Lived Climate Forcers – Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in: Masson- Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud ,N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.), Cambridge, Cambridge University Press, (in press).

Zelinka, M., Andrews, T., Forster, P., Taylor, K. (2014) Quantifying components of aerosol-cloud-radiation interactions in climate models, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, vol. 119, no. 12, pp. 7599-7615, doi: 10.1002/2014JD021710.

Статья поступила в редакцию (Received): 30.01.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 30.03.2022.

Принята к публикации (Accepted): 22.05.2022.

Для цитирования / For citation:

Гизатуллин, Р.Д., Елисеев, А.В., Переведенцев, Ю.П. (2022) Особенности географического распределения соединений серы в Европе в начале XXI века, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 175-189, doi:10.21513/2410-8758-2022-2-175-189.

Gizatullin, R.D., Eliseev, A.V., Perevedentsev, Yu.P. (2022) Peculiarities of the geographical distribution of sulfur compounds over Europe in the early 21st century, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 2, pp. 175-189, doi:10.21513/2410-8758-2022-2-175-189.