ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2019, том 55, № 1, с. 41–53

УДК: 551.511

ВЛИЯНИЕ СЕРНИСТОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ НА НАЗЕМНЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ ЦИКЛ

© 2019 г. А.В. Елисеев[1,2,3,*], М. Чжан[2,4], Р.Д. Гизатуллин[3], А.В. Алтухова[3], Ю.П. Переведенцев[3], А.И. Скороход[2]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*
Россия, 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, с. 2
[2] *Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН*
Россия, 119017 Москва, Пыжевский пер., 3
[3] *Казанский федеральный университет*
Россия, 420008 Казань, ул. Кремлевская, 8
[4] *Институт физики атмосферы КАН*
КНР, 100029 Пекин, район Чаойан, Хуайанли, 40
* *E-mail: eliseev@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 30.05.2018 г
После доработки 29.08.2018 г.

В работе уточнены ранее полученные с климатической моделью ИФА им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) результаты, связанные с влиянием сернистого газа атмосферы на наземный углеродный цикл. Ввиду недоступности глобальных данных о приземной концентрации SO_2 она была восстановлена по соответствующим данным о приземной концентрации сульфатов с использованием статистической модели, коэффициенты которой были подобраны по расчетам с моделью химии атмосферы RAMS-CMAQ. Полученные в работе результаты в целом согласуются с опубликованными ранее. В частности, наиболее значимое влияние SO_2 на характеристики наземного углеродного цикла выявлено на юго-востоке Северной Америки и в Европе. Однако такое влияние на юго-востоке Азии в данной работе существенно слабее, чем было получено ранее, что связано с завышением влагосодержания атмосферы КМ ИФА РАН в этом регионе.

Ключевые слова: сернистый газ, наземные экосистемы, углеродный цикл, КМ ИФА РАН, RAMS-CMAQ, статистическая модель

DOI: https://doi.org/10.31857/S0002-351553141-53

ВВЕДЕНИЕ

Сернистый газ SO_2 является основным антропогенным веществом – химическим предшественником тропосферных сульфатных аэрозолей (при этом следует отметить, что другие химические предшественники этих аэрозолей также окисляются до SO_2 перед превращением в сульфаты) [1–3]. Он способен поглощаться растениями и повреждать их фотосинтезирующие органы [4, 5]. Повреждение фотосинтезирующих органов растений продуктами химических реакций с участием сернистого газа, в свою очередь, способно изменить характеристики обратной связи между климатом и углеродным циклом. Глобальный анализ влияния изменения концентрации SO_2 в атмосфере на глобальный углеродный цикл был ранее проведен с использованием климатической модели Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [6, 7]. При этом было отмечено, что наиболее значимо такое влияние на юго-востоке Азии и Северной Америки и в меньшей степени – на территории Европы.

Однако ввиду недоступности глобальных данных о приземной концентрации сернистого газа как для XX, так и для XXI веков, на основании ряда расчетов с глобальными моделями численные эксперименты в [6, 7] были проведены в предположении равенства друг другу приземных молярных концентраций сернистого газа и сульфат-ионов. Глобальные оценки изменения приземной концентрации сульфатов в последние примерно полтора столетия, а также для XXI века доступны, например, в рамках международного проекта сравнения кли-

матических моделей CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5). Кроме того, в этих расчетах были использованы среднегодовые значения концентрации сульфатов в атмосфере, в то время как характеристики углеродного цикла испытывают значительные межсезонные изменения.

Целью данной работы является уточнение результатов [6, 7]. При этом в представленной работе учитываются как различия между приземными концентрациями сернистого газа и сульфатов, так и годовой ход сульфатных аэрозолей. В частности, для вычисления поля концентрации сернистого газа q_{SO_2} исходя из поля концентрации сульфат-иона q_{SO_4} на больших пространственно-временных масштабах в работе построена статистическая модель, которая затем внедрена в КМ ИФА РАН.

1. ПОСТРОЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, СВЯЗЫВАЮЩЕЙ ПРИЗЕМНЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ SO_2 И SO_4

Статистическая модель, связывающая приземные концентрации сернистого газа и сульфат-иона, основана на уравнении баланса массы SO_4 в эйлеровых координатах. Это уравнение учитывает химические реакции образования сульфат-иона из SO_2 с интенсивностью R, приток SO_4 к данному объему атмосферы (или отток от него) за счет динамических процессов (адвекции, диффузии и конвекции) с интенсивностью D и сток из атмосферы с интенсивностью S:

$$dq_{SO_4}/dt = R + D + S. \quad (1)$$

Для интенсивности химических реакций образования сульфат-иона можно использовать кинетику первого порядка:

$$R = k_R\, q_{SO_2}\, q_{ox}, \quad (2)$$

где q_{ox} – приземная концентрация окислителей SO_2. Эти окислители (гидроксил-радикал и пероксид-радикал [1–3]) образуются при диссоциации водяного пара и перекиси водорода соответственно. Как следствие, q_{ox} можно считать пропорциональным содержанию водяного пара q_v в данном объеме атмосферы с коэффициентом k_{ox}:

$$q_{ox} = k_{ox}\, q_v. \quad (3)$$

Сток сульфат-ионов из атмосферы обусловлен их захватом осадками, сухим осаждением и гравитационным оседанием. Интенсивность этих процессов можно считать пропорциональной q_{SO_4} с коэффициентом $-k_S$, зависящим от интенсивности осадков [1–3]. В данной работе для простоты указанная зависимость не учитывается, и величина k_S считается постоянной. Если дополнительно пренебречь вкладом динамики атмосферы D в изменение q_{SO_4}, то отношение концентраций q_{SO_4} и q_{SO_2} можно выразить в виде

$$K = q_{SO_4} / q_{SO_2} = k_R\, q_{ox} / k_S = \\ = (k_R\, k_{ox} / k_S)\, q_v = k\, q_v. \quad (4)$$

Коэффициент k в (4) был оценен по полям содержания сернистого газа SO_2 и сульфатных аэрозолей SO_4^2 – по данным расчетов с региональной моделью RAMS-CMAQ (Regional Atmospheric Modelling System – Community Multi-scale Air Quality Model) [8–10]. В расчетах с моделью RAMS использовалась ассимиляция атмосферных переменных по данным реанализа NCEP (National Centers for Environmental Prediction) [11] с разрешением по времени 6 ч. и по пространству 1° × 1°. По этим же данным в расчетах было задано поле температуры поверхности океана. Антропогенные эмиссии различных примесей в атмосферу в расчетах с моделью RAMS-CMAQ были заданы по данным [12–16] (в частности, антропогенные эмиссии SO_2 – по данным [16]. Расчеты с моделью проводились для 2012 г. в пространственной области 6654 × 5440 км^2 с центром в точке 35 °N, 116 °E (основную часть этой области занимает Великая Китайская равнина) с пространственным разрешением 64 км. В вертикальном направлении расчетная область простиралась от поверхности земли до высоты 23 км с 15 вычислительными уровнями, 7 из этих которых были расположены в нижнем 2-километровом слое для адекватного учета процессов в планетарном пограничном слое.

По среднемесячным полям q_{SO_2}, q_{SO_4} и метеорологических показателей атмосферы был вычислены коэффициенты K и k. При этом действительно связь K с q_v оказывается близкой к линейной (рис. 1). При построении соответствующей линейной регрессии после горизонтального осреднения полей по всему расчетному домену оценка значения коэффициента k = 0.22 ± 0.05 кг/г. Если предварительное осреднение по пространству не проводить, то соответствующая оценка оказывается близкой: 0.21 ± 0.01 кг/г.

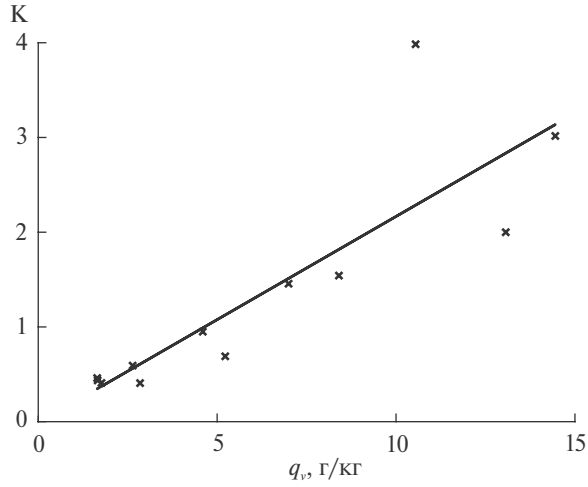

Рис. 1. Зависимость коэффициента K от приземной удельной влажности атмосферы q_v по расчетам с моделью RAMS-CMAQ. Обе переменные осреднены по региону юго-востока Азии. Прямой линией показана линейная регрессия с коэффициентом 0.22 кг/г.

2. РАСЧЕТЫ С КМ ИФА РАН

2.1. Модель и постановка численных экспериментов

КМ ИФА РАН [17] – единственная российская глобальная климатическая модель, относящаяся к классу моделей промежуточной сложности и участвующая в соответствующих международных сравнениях [18]. Особенностью модели является то, что крупномасштабная динамика атмосферы и океана (с масштабом больше синоптического) описывается явно, тогда как синоптические процессы параметризованы. Последнее позволяет существенно уменьшить время, необходимое для расчетов с моделью. Модель содержит блоки углеродного цикла (включая цикл метана) [19–23]. Горизонтальное разрешение КМ ИФА РАН составляет 4.5° широты и 6° долготы.

Схема учета влияния сернистого газа на продуктивность наземной растительности описана в [6, 7]. Отметим, что в этой схеме чувствительность первичной продукции наземных экосистем к такому воздействию зависит от функционального типа растительности и максимальна для лиственных деревьев и кустарников умеренного пояса. В данной работе ввиду учета годового хода q_{SO_4} (а следовательно, и q_{SO_2}) она модифицирована. Если в [6, 7] при расчете связанной с действием SO_2 поправки δf_{GPP} к интенсивности фотосинтеза использовалось среднегодовое значение q_{SO_2}, то в данной работе используется среднее за вегетационный период (рассчитываемый интерактивно с учетом модельного климата за данный календарный год) значение $q_{SO_2,eff}$. Несмотря на нелинейность связи δf_{GPP} с q_{SO_2} [6, 7], это возможно ввиду малой приземной концентрации сернистого газа в атмосфере ($\leqslant 5 \times 10^{-3}$ млн$^{-1}$; см. ниже). При таких q_{SO_2} связь δf_{GPP} с концентрацией сернистого газа почти линейна, так что ошибка оценки годовой интенсивности фотосинтеза наземной растительности невелика.

С КМ ИФА РАН были проведены численные эксперименты для 1700–2100 гг. с учетом сценариев антропогенных воздействий на климат за счет изменения содержания парниковых газов (CO_2, CH_4 и N_2O) в атмосфере, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, изменения солнечной постоянной и изменения площади сельскохозяйственных угодий. Эти воздействия для 1700–2005 гг. были заданы в соответствии с условиями "Historical simulations" проекта CMIP5 (http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb). Для 2006–2100 гг. указанные антропогенные воздействия были заданы в соответствии со сценарием антропогенного воздействия RCP 8.5 проекта CMIP5. В данной работе содержание углекислого газа в атмосфере было задано в соответствии со сценарием RCP 8.5, а углеродный цикл КМ ИФА РАН использовался только для диагностики потоков CO_2 из атмосферы в океан и наземные экосистемы, а также запасов углерода в них. При этом эмиссии CO_2 в атмосферу были также заданы в соответствии с условиями "historical simulations" вплоть до 2005 г. и RCP 8.5 – начиная с 2006 г. Существенным отличием численных экспериментов в данной работе от проведенных ранее с КМ ИФА РАН [6, 7, 17, 19–25] является учет годового хода содержания сульфатов в атмосфере.

Ввиду уже отмеченной недоступности данных для q_{SO_2} в массивах данных воздействия на климат проекта CMIP5, в КМ ИФА РАН была включена статистическая схема вычисления приземной концентрации сернистого газа в виде (4).

Для выделения влияния SO_2 на характеристики наземного углеродного цикла были проведены расчеты с двумя версиями модели: I) полной моделью, II) моделью, в которой $q_{SO_2} \equiv 0$. Для любой переменной Y влияние SO_2 оценивалось с помощью

$$\delta Y = Y_{\mathrm{I}} - Y_{\mathrm{II}} \qquad (5)$$

(здесь нижний индекс указывает на версию КМ ИФА РАН).

2.2. Воспроизведение приземных полей удельной влажности и концентрации SO_2

Принципиальным для задач данной работы является воспроизведение поля приземной удельной влажности q_v, которое затем используется при вычислении поля q_{SO_2}. Версия I КМ ИФА РАН в целом реалистично воспроизводит приземную удельную влажность в сравнении с данными реанализа ERA-Interim [26] с максимумами в тропиках и постепенным уменьшением q_v при увеличении широты, а также с большими значения над океаном, чем над сушей (рис. 2а–г). Однако в модели проявляются два региона значительного завышения удельной влажности летом. Один из них расположен в регионе Аравийского полуострова и Причерноморья и связан с грубым описанием внутренних водоемов в модели. Завышение q_v в этом регионе не играет принципиальной роли для целей данной работы, так как содержание SO_2 и SO_4 здесь мало.

Более существенным является завышение влагосодержания атмосферы на юго-востоке Азии летом (рис. 2б, г). Атмосфера в этом регионе сильно загрязнена сульфатами [27]. Как следствие, завышение q_v в данном регионе приводит к чрезмерно быстрому химическому превраще-

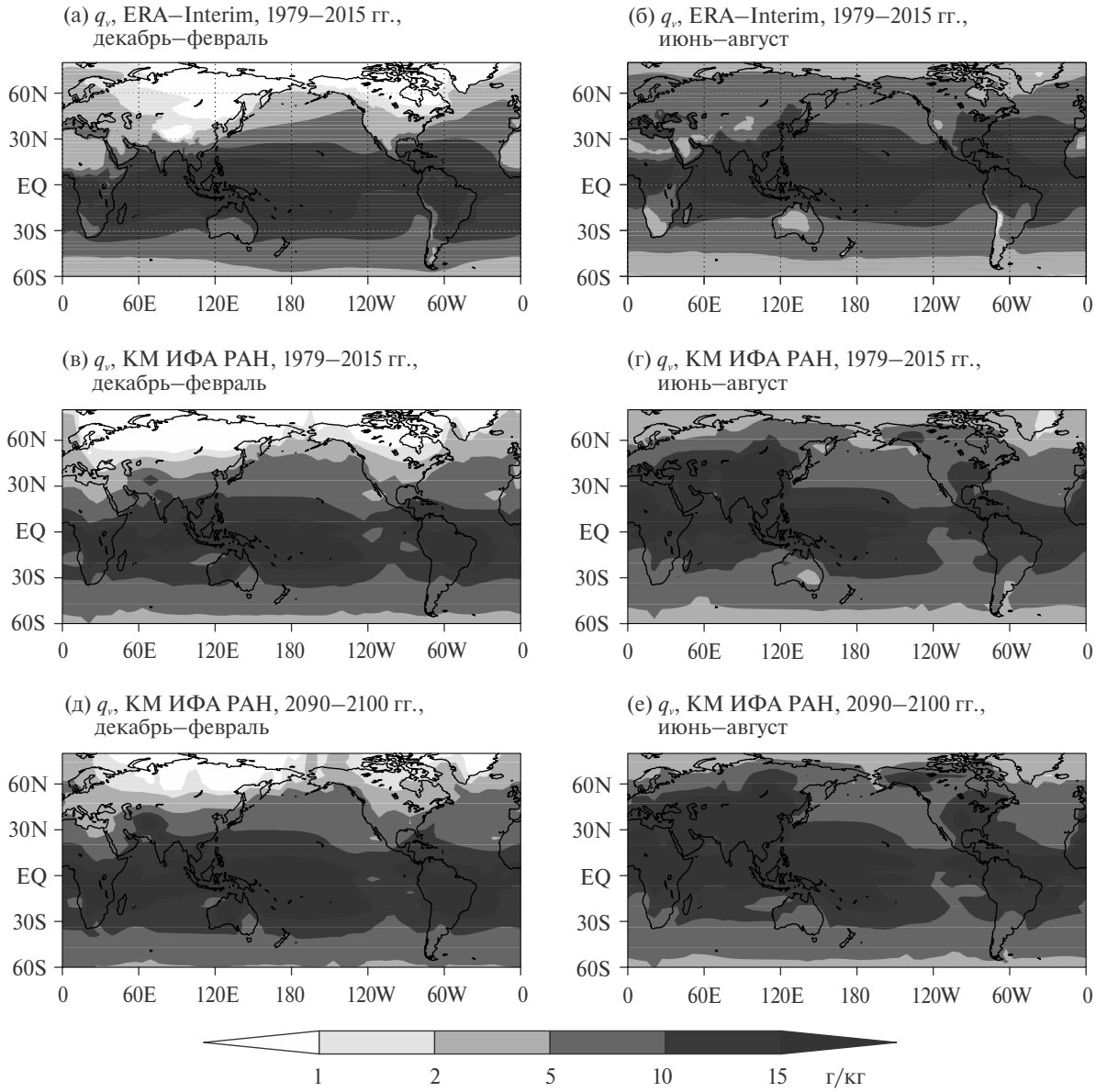

Рис. 2. Приземное отношение смеси для водяного пара q_v по данным ERA-Interim зимой и летом 1979–2015 гг. (а, б) и соответствующие значения для численного эксперимента с КМ ИФА РАН (в, г), а также поля q_v по расчетам с КМ ИФА РАН зимой и летом 2090–2100 гг. (д, е).

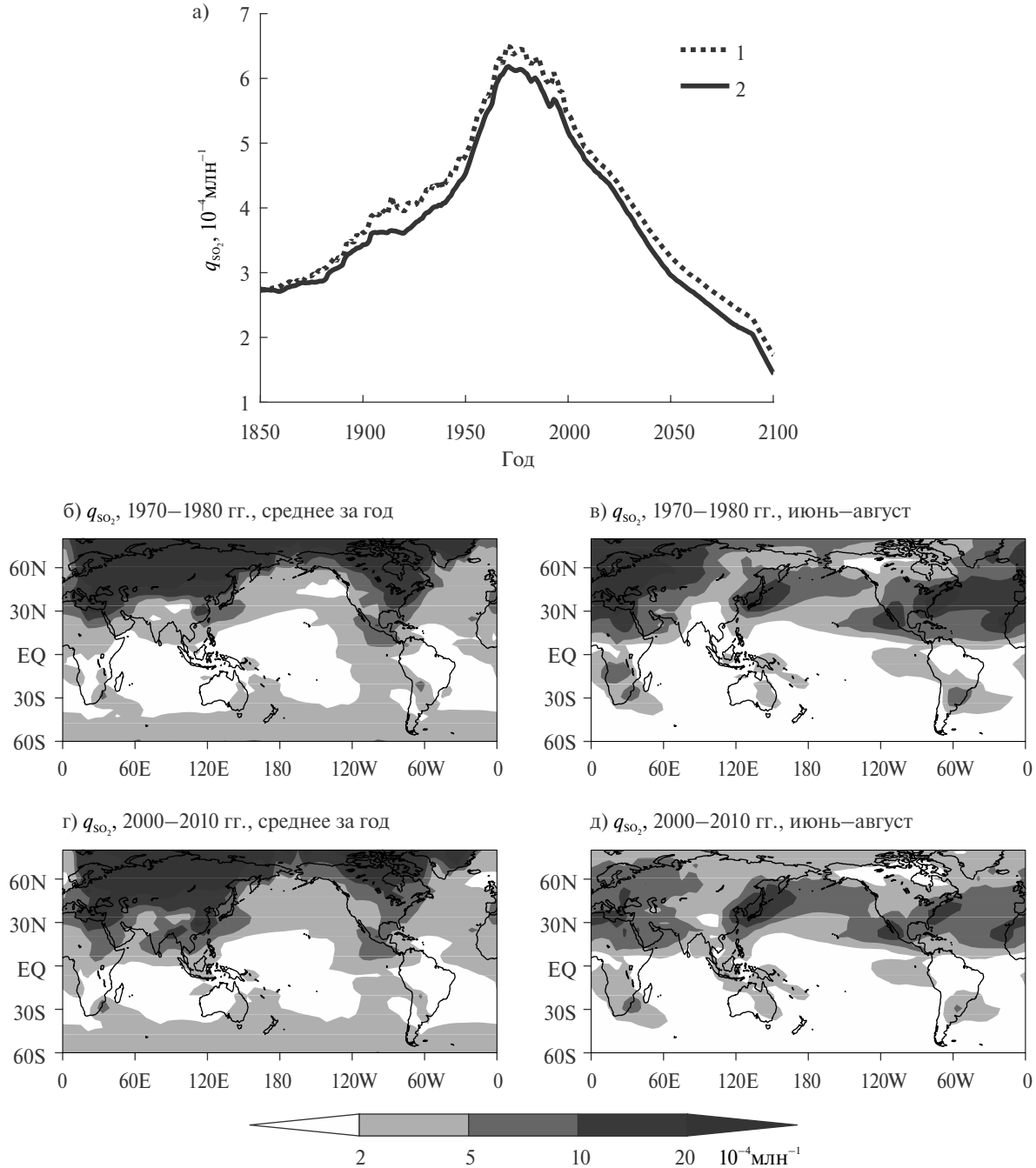

Рис. 3. Приземная глобально осредненная концентрация SO_2 в численном эксперименте с КМ ИФА РАН в среднем за год и в период июнь–август (пунктирная и сплошная линии соответственно; а), а также соответствующая концентрация в среднем за год и в период июнь–август разных десятилетий этого численного эксперимента (б–ж).

нию сернистого газа в сульфаты и, при использовании (4) – к недооценке q_{SO_2}.

При продолжении потепления климата в XXI веке при сценарии RCP 8.5 q_v увеличивается (рис. 2д, е), что дополнительно интенсифицирует окисление сернистого газа в сульфаты.

Следует отметить, что воспроизведенные КМ ИФА РАН среднегодовые значения q_v действительно приводят к значениям коэффициента K, отличающимся от единицы не более чем на 20% от начала расчета и вплоть до первых десятилетий XXI века в таких регионах загрязнения атмосферы сернистым газом, как Европа и юго-восток Северной Америки. Это согласуется с предположением о равенстве q_{SO_2} и q_{SO_4} друг другу в [6, 7]. С другой стороны, они приводят к большим в 2-3 раза значениям K на юго-вос-

токе Азии. Кроме того, значения K значительно превышают единицу во всех регионах, начиная со второй трети XXI века (последнее не играет большой роли для целей данной работы, т. к. в этот период q_{SO_2} и q_{SO_4} уже малы на всем земном шаре).

Глобальное среднее значение приземной концентрации SO_2 в расчетах с версией I максимально в конце 1970-х и начале 1980-х гг. (рис. 3а). В этот период среднегодовые значения q_{SO_2} превышают $1 \times 10{-}3$ млн$^{-1}$ практически во всех внетропических регионах суши Северного полушария (рис. 3б). Пространственная структура приземной концентрации SO_2 в целом сохраняется и в первой четверти XXI века, но с меньшим загрязнением атмосферы сернистым газом в Европе и в Северной Америке и несколько большим на юго-востоке Азии (рис. 3г). Приведенные на рис. 3г значения q_{SO_2} для Европы в целом (с учетом различия пространственного разрешения между моделями) согласуются с результатами расчетов по модели EMEP MSC-W (European Monitoring and Evaluation Programme Meteorological Synthesizing Centre – West), доступных на сайте http://emep.int/mscw/index_mscw.html.

В целом большая влажность атмосферы в теплый период года и годовой ход q_{SO_4} приводят к меньшим приземным концентрациям SO_2 летом в Европе и Северной Америке по сравнению с соответствующими среднегодовыми значениями (рис. 3в, д). Однако по сравнению с среднегодовыми значениями, летнее увеличение q_{SO_2} наблюдается на юго-востоке Азии. С учетом уже отмеченного завышения летней q_v в этом регионе, по всей видимости, летний максимум q_{SO_2} моделью занижается. Подобно среднегодовым значениям, загрязнение атмосферы сернистым газом летом в начале XXI века, по сравнению с последней четвертью XX века, уменьшается в Европе и в Северной Америке и увеличивается на юго-востоке Азии.

2.3. Влияние загрязнения атмосферы сернистым газом на наземный углеродный цикл

Влияние сернистого газа атмосферы на характеристики наземного углеродного цикла в целом согласуется с полученными ранее в численных экспериментах со среднегодовыми полями q_{SO_4} и в приближении равенства приземных концентраций q_{SO_2} и q_{SO_4} (см. [6, 7]).

В XX веке в КМ ИФА РАН (как и в других моделях Земной системы) отмечаются [19, 21].

1) общее увеличение интенсивности фотосинтеза, связанное с фертилизацией наземной растительности углекислым газом атмосферы;

2) общее уменьшение запаса углерода в наземной растительности, происходящее несмотря на только что отмеченную интенсификацию фотосинтеза и связанное с уменьшением пребывания углерода в растительности при сельскохозяйственной дефорестации, которая приводит к замене древесной растительности на травяную;

3) общее увеличение запаса углерода в почве, также связанное с уменьшением пребывания углерода в растительности при сельскохозяйственной дефорестации; на региональном уровне при этом отмечается как увеличение, так и уменьшение запаса углерода в почве;

4) поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы (для величин на единицу площади определяемый согласно

$$f_l = f_{GPP} - r_v - r_s, \tag{6}$$

где f_{GPP} – интенсивность фотосинтеза наземной растительности, r_v – интенсивность дыхания растений, r_s – интенсивность потока разложившегося в почве углерода в атмосферу) увеличивается; дополнительно отметим, что это увеличение продолжается вплоть до середины XXI века, после чего f_l (и соответствующий ему глобальный поток $F_l = F_{GPP} - R_v - R_s$, где F_{GPP}, R_v, R_s – интегралы f_{GPP}, r_v и r_s соответственно по всему земному шару) начинает уменьшаться.

В свою очередь, увеличение q_{SO_4} в вплоть до 1980-х гг. привело к замедлению роста интенсивности фотосинтеза (рис. 4). Оно максимально около 1980 г. Влияние SO_2 в атмосфере на глобальную интенсивность фотосинтеза $\delta F_{GPP} = -0.3$ ПгС/год (т. е. 0.2 % относительно F_{GPP} в этот год для версии I модели, рис. 4а). Подобно [6, 7], наиболее значимое относительное (как и абсолютное) влияние SO_2 атмосферы на f_{GPP} отмечается в 1970-е и 1980-е гг. в Европе и на юго-востоке Северной Америки (где модуль δf_{GPP} может достигать 2% от значения f_{GPP} в версии I модели; рис. 4б), а в начале XXI века – в Европе, на юго-востоке Северной Америке и на юго-востоке Азии (рис. 4в). В соответствии с результатами раздела 2.2, региональные особенности влияния сернистого газа на интенсивность фотосинтеза в первых двух регионах

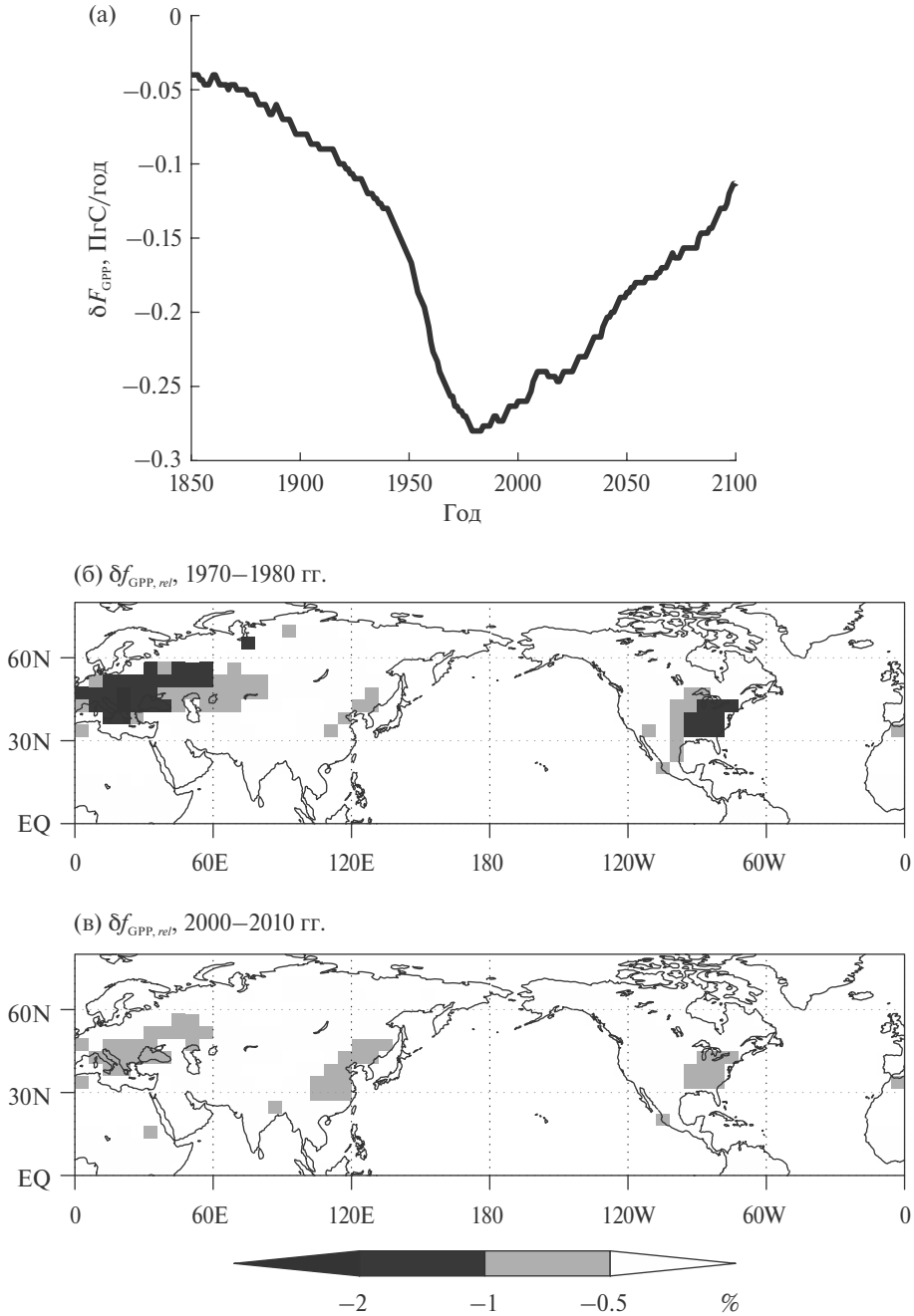

Рис. 4. Влияние сернистого газа на глобальную годовую интенсивность фотосинтеза F_{GPP} наземной растительности в численном эксперименте с КМ ИФА РАН (а), а также соответствующее относительное влияние на годовую интенсивность фотосинтеза на единицу площади f_{gpp} в разные десятилетия (б, в).

в КМ ИФА РАН можно считать реалистичными, тогда как на юго-востоке Азии они моделью занижаются.

Инерционность изменения запаса углерода в растительности приводит к тому, что влияние SO_2 атмосферы на запас углерода в наземной растительности δC_v запаздывает на 6 лет относительно δF_{GPP}. В середине 1980-х гг. абсолютная величина δC_v максимальна и равна 0.8 ПгС (рис. 5а), т. е. 0.2 % от значения C_v в версии I модели. Региональные особенности влияния сернистого газа на запас углерода в растительности в разные десятилетия в целом подобны соответствующим особенностям δf_{GPP} (рис. 5б, в). В 1970-е и 1980-е гг. соответствующий отклик запаса углерода в растительности на единицу

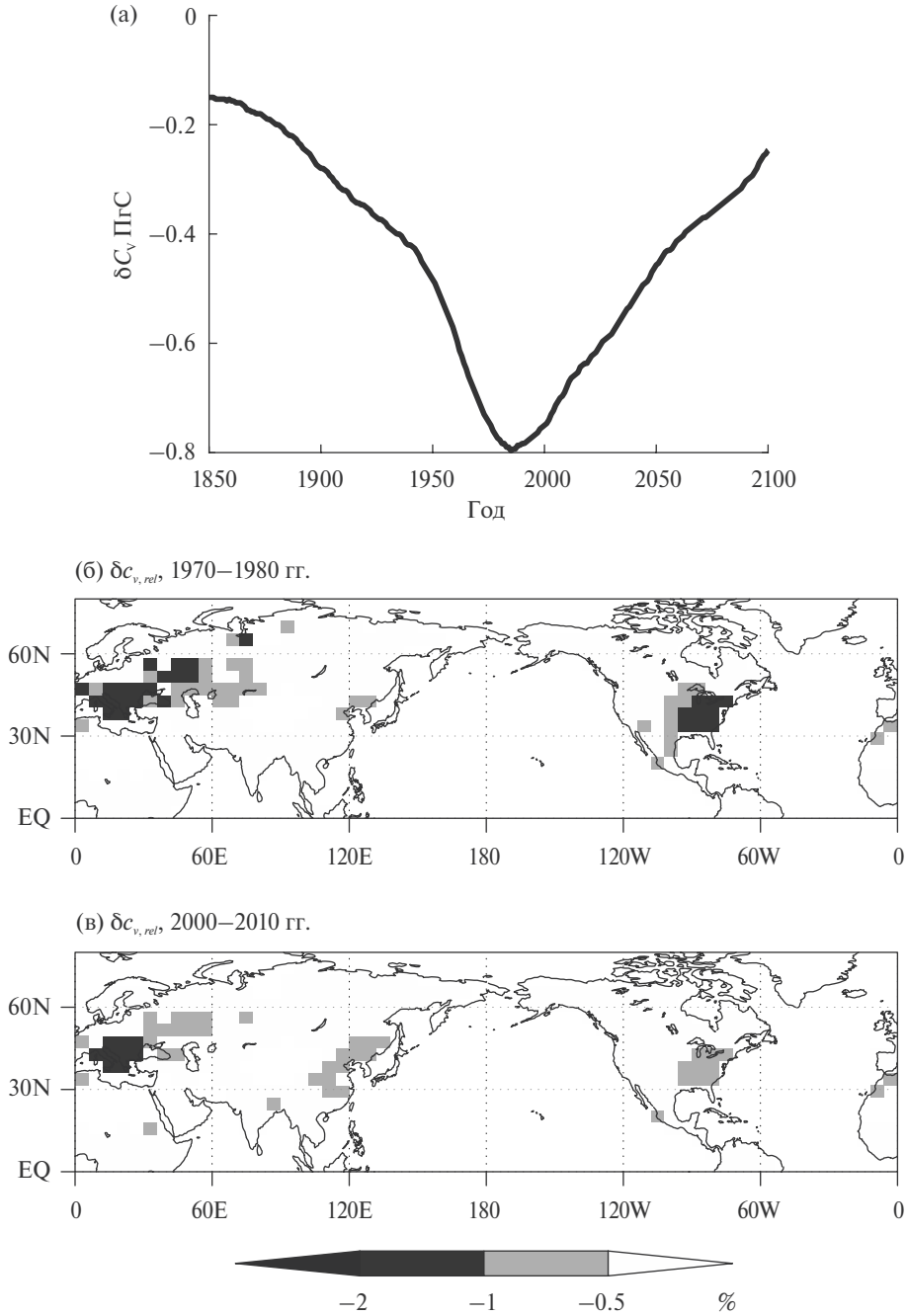

Рис. 5. Подобно рис. 4, но для полного запаса углерода в наземной растительности C_v и соответствующего запаса на единицу площади c_v.

площади δc_v может достигать 2% в Европе и на юго-востоке Северной Америки. Для первого региона полученные значения согласуются с опубликованными в [5].

Подобное также справедливо и для запаса углерода в почве. Однако инерционность разложения органики почвы приводит к дополнительному запаздыванию отклика влияния SO_2 на этот запас относительно соответствующего влияния на запас углерода в растительности. На глобальном уровне δC_s запаздывает на 15 лет относительно δC_v (и на 21 год относительно δF_{GPP}), так что максимум абсолютного значения δC_s (4.4 ПгС, т. е. также 0.2% значения C_s в версии I модели) достигается около 2000 г. (рис. 6а). Пространственная структура отклика запаса углерода почвы δc_s к изменению концентрации SO_2 в атмосфере подобна пространственной струк-

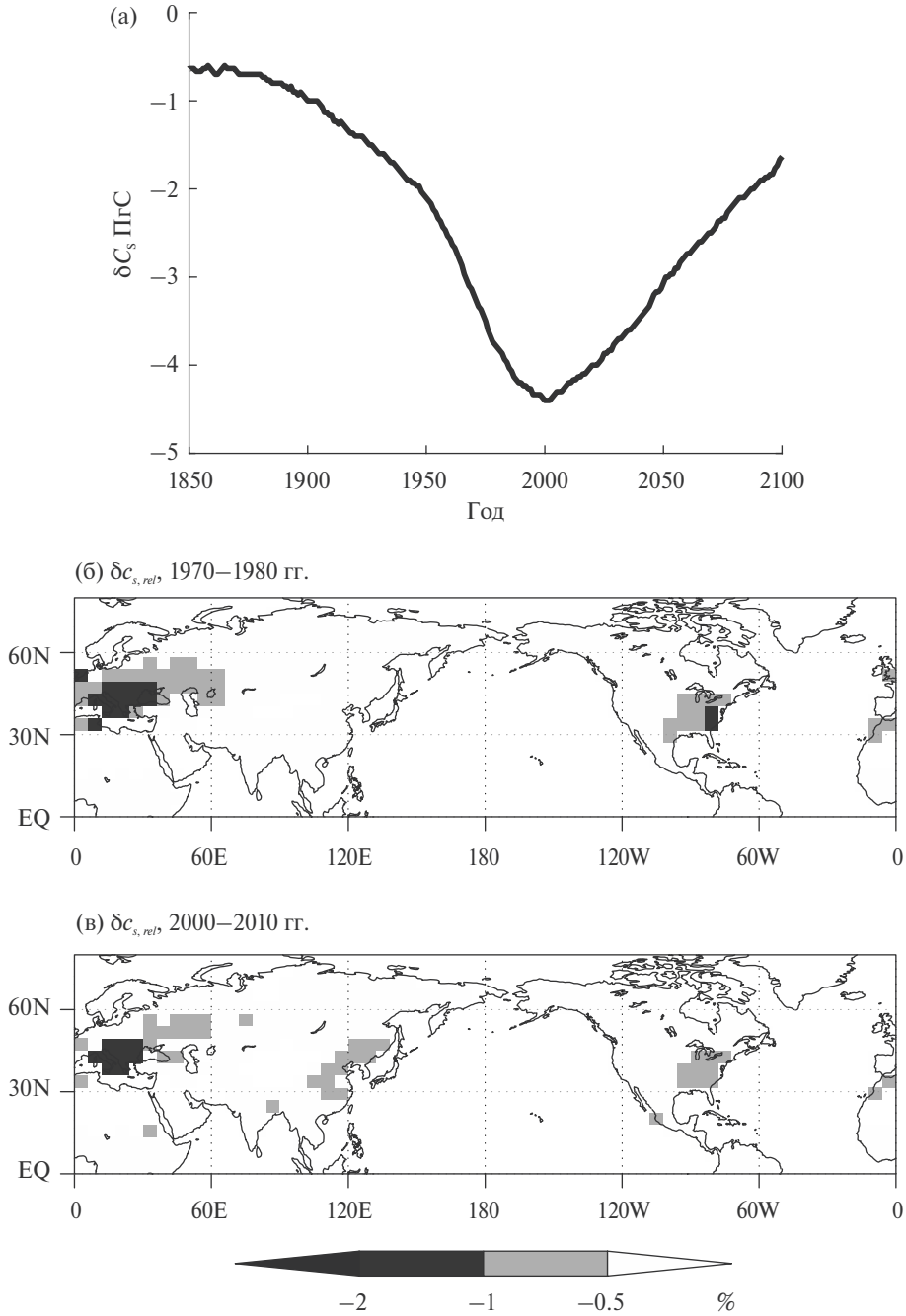

Рис. 6. Подобно рис. 4, но для полного запаса углерода в почве C_s и соответствующего запаса на единицу площади c_s.

туре δf_{GPP} и δc_v (рис. 6б, в). Однако максимальные значения δc_s (по модулю достигающие 2%) ввиду отмеченной инерционности разложения органики почвы отмечаются вплоть до 2010-х гг.

Влияние SO_2 атмосферы на глобальный поток углерода между атмосферой и наземными экосистемами δF_l отмечается раньше, чем соответствующее влияние на фотосинтез – в конце 1960-х гг. (рис. 7а). Это связано с тем, что при дальнейшем нарастании q_{SO_2}, изменениях климата и изменениях запаса углерода в растительности и почве слагаемое δF_{GPP} частично компенсируется слагаемыми δR_v и δR_s. Начиная с 1990-х гг., уменьшение q_{SO_2} и дальнейшие изменения климата и запасов углерода в резервуарах Земной системы сначала приводят к полной компенсации между δF_{GPP}, с одной стороны, и δR_v и δR_s – с другой.

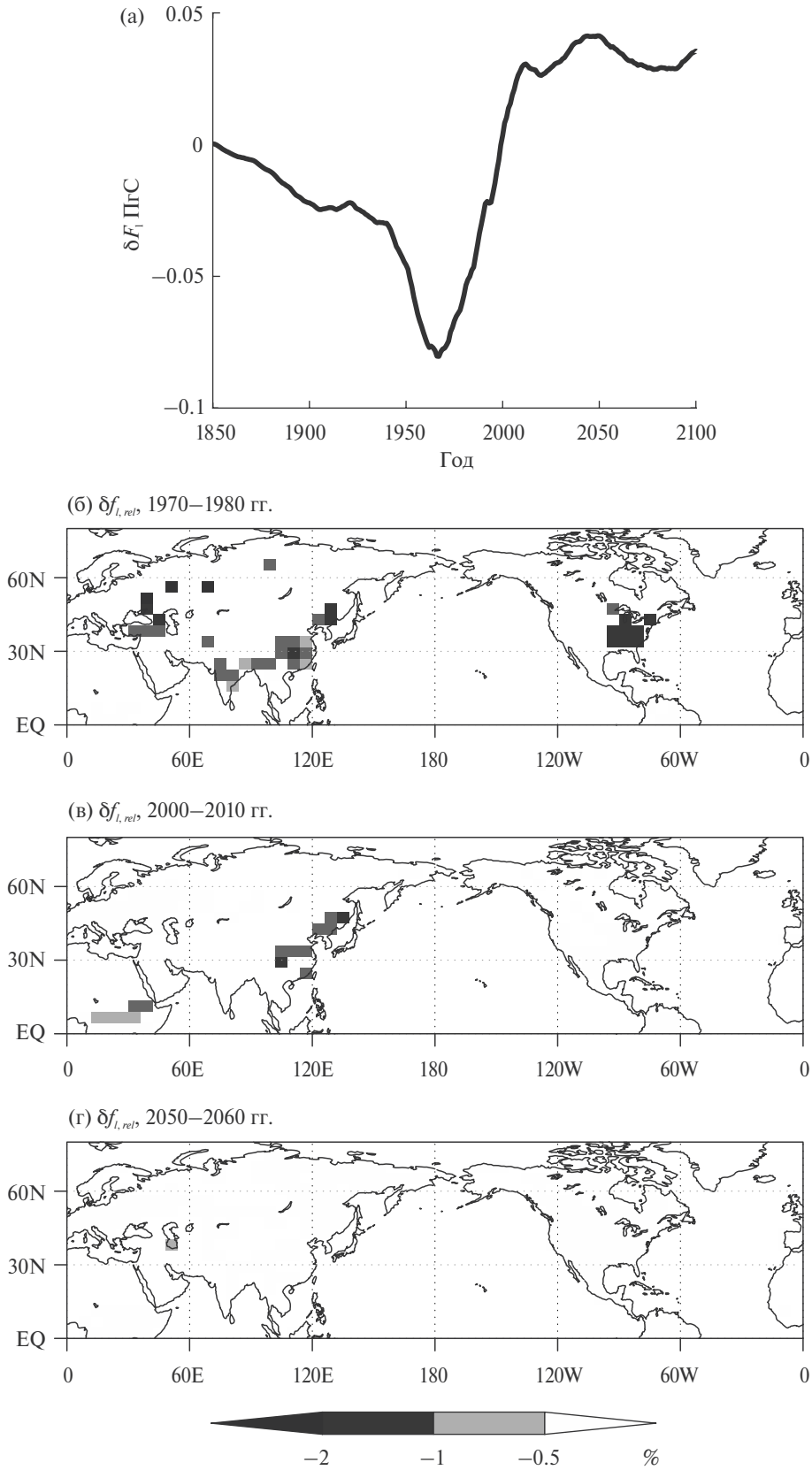

Рис. 7. Подобно рис. 4, но для потока углерода из атмосферы в наземные экосистемы (без учета эмиссий CO_2 при землепользовании) F_l и соответствующего потока на единицу площади f_l.

Взаимная компенсация между отдельными слагаемыми, характеризующими влияние изменения q_{SO_2} на поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы, также видна и на региональном уровне, проявляясь в δf_l. В частности, если вплоть до 1980-х гг. во всех регионах $\delta f_l < 0$ (рис. 7б), то смещение в 1980-х и 1990-х гг. основных антропогенных источников этого газа из Европы и Северной Америки на юго-восток Азии привело к тому, что в первых двух регионах $\delta f_l < 0$, тогда как в последнем все еще $\delta f_l < 0$ (рис. 7в). Однако при дальнейшем уменьшении загрязнения атмосферы диоксидом серы δf_l становится положительным уже во всех регионах (рис. 7г). Отметим, что $\delta f_l < 0$ в ряде регионов при уменьшающемся, но все еще положительном q_{SO_2}, связано с собственной динамикой наземных экосистем, в том числе с инерционностью их отклика на внешнее воздействие.

Отметим, что полученные оценки влияния сернистого газа атмосферы на характеристики наземного углеродного цикла статистически достоверны ввиду малой межгодовой изменчивости этих характеристик в КМ ИФА РАН.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе уточнены результаты [6, 7], связанные с влиянием сернистого газа атмосферы на характеристики наземного углеродного цикла. В отличие от [6, 7], при этом учитывались как возможные различия между приземными концентрациями сернистого газа и сульфатов, так и годовой ход сульфатных аэрозолей. Ввиду недоступности глобальных данных о приземной концентрации сернистого газа она была восстановлена по соответствующим данным о приземной концентрации сульфатов. Это восстановление было произведено с использованием статистической модели, коэффициенты которой были подобраны по расчетам с моделью химии атмосферы RAMS-CMAQ, в которых были заданы эмиссии примесей в атмосферу и метеорологические характеристики.

Полученные результаты в целом согласуются с опубликованными ранее. В частности, наиболее значимое влияние SO_2 на характеристики наземного углеродного цикла выявлено на юго-востоке Северной Америки и в Европе. В этих регионах в последние десятилетия XX века и в начале XXI века высокое содержание сернистого газа в атмосфере уменьшает интенсивность фотосинтеза наземной растительности, запас углерода в ней и запас углерода в почве на 2%. При этом полный поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы изменяется на 5–10%.

Влияние SO_2 атмосферы на характеристики наземного углеродного цикла на юго-востоке Азии в данной работе существенно менее значимо, чем [6, 7]. Это связано, по всей видимости, с завышением влагосодержания атмосферы в этом регионе КМ ИФА РАН. При исправлении этого недостатка модели влияние сернистого газа на наземный углеродный цикл окажется значимым и в этом регионе.

Следует отметить, что наряду с отличиями характеристик климата в расчетах с КМ ИФА РАН от наблюдений, неопределенность результатов данной работы связана и с другими процессами. К их числу относятся, например, неопределенность данных об эмиссиях SO_2 в атмосферу в XX веке [27], а также неточности оценок концентраций сульфатов в тропосфере, которые проводились по этим сценариям без учета изменения метеорологических условий [28] как для XX, так и для XXI века. Отметим, что изменение метеорологических условий может влиять как на горизонтальный и вертикальный перенос сернистого газа в атмосфере, так и на скорость его окисления в сульфаты.

Наконец, отметим грубость построенной в данной работе статистической модели, связывающей q_{SO_2} и q_{SO_4}. Эта модель справедлива лишь в стационарном приближении и лишь для достаточно больших (~10^3 км) пространственных масштабов. В дальнейшем планируется существенная модификация этой модели, в том числе с учетом влияния циркуляции атмосферы на содержание SO_2 в ее приземном слое.

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за замечания к предыдущей версии работы.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 18-55-53062 и № 18-05-00721).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов М.В., Скрябин Г.К., Френей Дж.Р.* Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. М.: Наука, 1983. 422 с.
2. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Hoboken: Wiley, 2012. 1232 c.
3. *Суркова Г.В.* Химия атмосферы. М.: Изд-во МГУ, 2002. 210 с.

4. *Николаевский В.С.* Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 276 с.
5. *Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А.* Сравнение антропогенных изменений приземных концентраций O_3, SO_2, CO_2 в Европе по экологическому критерию // ДАН. 1998. Т. 361. № 2. С. 275–279.
6. *Eliseev A.V.* Impact of tropospheric sulphate aerosols on the terrestrial carbon cycle // Glob. Planet. Change. 2015. V. 124. P. 30–40.
7. *Елисеев А.В.* Влияние соединений серы в тропосфере на наземный углеродный цикл // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 673–683.
8. *Zhang M., Uno I., Carmichael G.R., et al.* Large-scale structure of trace gas and aerosol distributions over the western Pacific Ocean during TRACE-P // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2003. V. 108. № D21. 8820.
9. *Zhang M., Uno I., Yoshida Y., et al.* Transport and transformation of sulfur compounds over East Asia during the TRACE-P and ACE-Asia Campaigns // Atmos. Environ. 2004. V. 38. № 40. P. 6947–6959.
10. *Zhang M., Uno I., Zhang R., et al.* Evaluation of the Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system with observations obtained during the TRACE-P experiment: Comparison of ozone and its related species // Atmos. Environ. 2006. V. 40. № 26. P. 4874–4882.
11. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., et al.* NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2002. V. 83. № 11. P. 1631–1643.
12. *Benkovitz C.M., Scholtz M.T., Pacyna J., et al.* Global gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen // J. Geophys. Res.-Atmospheres. 1996. V. 101. № D22. P. 29 239–29 253.
13. *Emmons L.K., Walters S., Hess P.G., et al.* Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4) // Geosci. Model Dev. 2012. V. 3. № 1. P. 43–67.
14. *Guenther A.B., Jiang X., Heald C.L., et al.* The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions // Geosci. Model Dev. 2012. V. 5. № 6. P. 1471–1492.
15. *Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R.* Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. 2013. V. 118. № 1. P. 317–328.
16. *Li M., Zhang Q., Kurokawa J.-I., et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. № 2. P. 935–963.
17. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
18. *Petoukhov V., Claussen M., Berger A., et al.* EMIC intercomparison project (EMIP-CO2): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient reponses to atmospheric CO_2 doubling // Clim. Dyn. 2005. V. 25. № 4. P. 363–385.
19. *Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // Adv. Atmos. Sci. 2011. V. 28. № 5. P. 1215–1232.
20. *Елисеев А.В.* Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 147–170.
21. *Елисеев А.В., Сергеев Д.Е.* Влияние подсеточной неоднородности растительности на расчеты характеристик углеродного цикла // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 259–270.
22. *Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V.* An ensemble approach to simulate CO_2 emissions from natural fires // Biogeosciences. 2014. V. 11. № 12. С. 3205–3223.
23. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В.* Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO_2 в атмосферу // ДАН. 2014. Т. 459. № 4. С. 496–500.
24. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А.* Влияние учета прямого радиационного воздействия сульфатных аэрозолей на результаты численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 5. С. 591–601.
25. *Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В. и др.* Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Казанский университет. 2013. 224 с.
26. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. № 656. P. 553–597.
27. *Smith S.J., van Aardenne J., Klimont Z., et al.* Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005 // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. № 3. P. 1101–1116.
28. *Lamarque J.-F., Kyle G.P., Meinshausen M., et al.* Global and regional evolution of short-lived radiatively-active gases and aerosols in the Representative Concentration Pathways // Clim. Change. 2013. V. 109. № 1–2. P. 191–212.

Impact of sulphur dioxide on the terrestrial carbon cycle

A.V. Eliseev[1,2,3,*], M. Zhang[2,4], R.D. Gizatullin[3], A.V. Altukhova[3], Yu.P. Perevedentsev[3], A.I. Skorokhod[2]

[1] *Lomonosov Moscow State University*
Leninskie gory, 1, Moscow, 119991, Russia
[2] *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS*
Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017, Russia
[3] *Kazan Federal University*
Kremlyovskaya, 8, Kazan, 420008, Russia
[4] *Institute of Atmospheric Physic, Chinese Academy of Sciences*
40 Building, Huayanli, Chaoyang District, Beijing, 100029, China
* *E-mail: eliseev@ifaran.ru*

Received: 30.05.2018
Revised version received: 29.08.2018

In this paper, the earlier results, which were obtained with the climate model developed at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences (IAP RAS CM) and related to the impact of the atmospheric sulphur dioxide on terrestrial carbon cycle, are elucidated. Because of the unavailability of the global data for near surface SO_2 concentration, it was reconstructed by using statistical model which was fitted employing the output of the atmospheric chemistry-transport model RAMS-CMAQ. The obtained results are in general agreement with those reported earlier. In particular, the most significant SO_2 impact on terrestrial carbon cycle is simulated for south-east North America and for Europe. However, such impact for south-east Asia is markedly weaker in comparison to that reported earlier, which is related to excessive moisture content in the atmosphere of this region.

Keywords: sulfur dioxide, terrestrial ecosystems, carbon cycle, IAP RAS CM, RAMS-CMAQ, statistical model