

СХЕМА РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛА СЕРЫ В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СЛОЖНОСТИ

Елисеев А.В.^{1,2,3,4}, Гизатуллин Р.Д.³, Тимажев А.В.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

⁴Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

e-mail: eliseev.alexey.v@gmail.com, w8sogz@gmail.com, timazhev@ifaran.ru

Разработана стационарная вычислительно эффективная схема ChAP-1.0 (Chemical and Aerosol Processes, version 1.0) для воспроизведения цикла серы в тропосфере, предназначенная для моделей Земной системы промежуточной сложности. Она достаточно хорошо воспроизводит характеристики тропосферного цикла серы, известные из различных источников информации. В схеме около половины выделяемого диоксида серы осаждается на поверхность, а остальная часть окисляется в сульфаты. В свою очередь, сульфаты в основном удаляются из атмосферы влажным осаждением. Время жизни диоксида серы и сульфатов в атмосфере близко к 1 сут. и 5 сут. соответственно. ChAP может быть использована для моделирования антропогенного загрязнения атмосферы серой на больших пространственных и временных масштабах.

Соединения серы в тропосфере оказывают значительное влияние на химические процессы в ней и на климат [1, 2]. Прямое радиационное воздействие с доиндустриального периода до 2010-х гг оценивается величиной от -0,2 до -0,8 Вт м⁻², а косвенное - величиной от -0,2 до -1,2 Вт м⁻² [3]. Помимо влияния на климатические изменения, соединения серы влияют на наземную растительность и, таким образом, на глобальный углеродный цикл как за счёт подавления полной первичной продукции наземной растительности [4, 5], так и за закисления почвы и влаги почвы [6].

В данной работе разработана схема ChAP (Chemistry and Aerosol Processes), позволяющая вычислять характеристики цикла серы в тропосфере в моделях Земной системы промежуточной сложности (МЗСПС). Современная версия ChAP-1.0 учитывает только антропогенную часть атмосферного цикла серы, но мы в будущем планируется учёт и естественных источников серы.

С учётом соотношения характерных времён жизни соединений серы в тропосфере и временных масштабов, разрешаемых МЗСПС, схема основана на стационарных уравнениях баланса массы соединений серы в тропосфере. В схеме учитываются выбросы диоксида серы SO₂ в атмосферу, его осаждение на поверхность, окисление до сульфатов SO₄, а также сухое и влажное осаждение сульфатов на поверхности. Горизонтальный перенос соединений серы в

атмосфере вычисляется путем представления ячеек модельной сетки как невзаимодействующих источников соединений серы.

Расчеты со схемой были выполнены при задании антропогенных эмиссий диоксида серы в атмосферу за 1850-2000 гг. по данным CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5) [3], а полей метеорологических переменных - по данным реанализа ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>). Результаты расчётов со схемой ChAP были сравнены с данными для концентраций сульфатов CMIP5, с ансамблем Третьего оценочного отчёта Межправительственной группы экспертов по изменению климата [7] и с результатами фазы II проекта ACCMIP (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project) [8]. Кроме того, в регионах сильного антропогенного загрязнения серой результаты расчётов со схемой ChAP сравниваются с другими данными, такими как реанализ CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service; <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/cams-reanalysis>), EMEP MSC-W (Meteorological Synthesizing Centre–West of the European Monitoring and Evaluation Programme; <https://emep.int/mscw/>), а также с расчётами по отдельным моделям.

Разработанная схема достаточно точно воспроизводит характеристики тропосферного цикла серы, известные из этих источников информации (рис. 1). В частности, в 1980 и 1990 гг., когда глобальные антропогенные выбросы серы были максимальны, полное содержание антропогенных SO₂ и SO₄ в тропосфере составляет соответственно 0,2 TgS и 0,4 TgS. При этом около половины выделяемого диоксида серы осаждается на поверхность, а остальная часть окисляется в сульфаты. В свою очередь, сульфаты в основном удаляются из атмосферы влажным осаждением.

Время жизни диоксида серы и сульфатов в тропосфере близко, соответственно, к 1 сут. и 5 сут. Различия между нашими моделями, с одной стороны, и данными CAMS и EMEP MSC-W - с другой частично (но, очевидно, далеко не полностью) объясняются различиями во временных интервалах, охватываемых нашими моделями и этими наборами данных.

Следует отметить следующие особенности данной версии схемы ChAP:

- неучёт естественных и, частично, некоторых антропогенных источников эмиссий серы в тропосферу;
- неучёт влажного осаждения SO₂ и (частично) окисления этого газа за счёт газофазных реакций;
- сильно упрощённая зависимость скорости окисления диоксида серы от содержания основных окислителей в тропосфере;
- сильно упрощённая схема переноса соединений серы в тропосфере.

Эти недостатки схемы планируется исправить (или хотя бы ослабить) при её дальнейшем развитии.

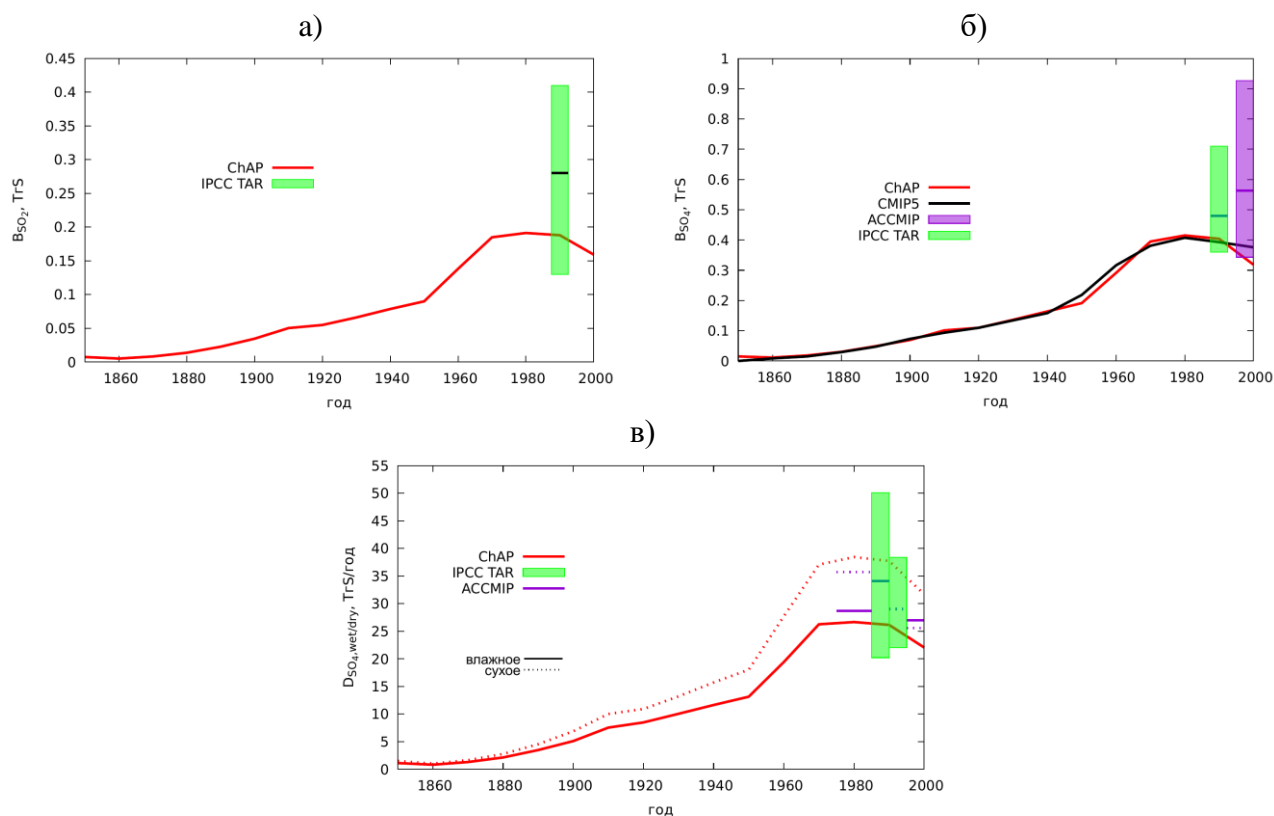


Рисунок 1 – Глобальные характеристики цикла серы в тропосфере по расчётам со схемой ChAP в сравнении с другими данными: полное содержания диоксида серы (а), полное содержание сульфатов (б), осаждение серы на поверхность Земли (в)

Несмотря на указанные приближения, разработанная схема ChAP-1.0 способна воспроизводить основные характеристики тропосферного цикла серы в XX веке. Таким образом, она может быть успешно использована при моделировании антропогенного загрязнения атмосферы серой на достаточно больших пространственных и временных масштабах. В дальнейшем мы планируем внедрить схему в МЗСПС и провести численные эксперименты с построенной совместной моделью.

1. Суркова Г.В. Химия атмосферы. М.: Изд-во МГУ, 2002. 210 с.
2. Charlson, R., Schwartz, S., Hales, J., et al.: Climate forcing by anthropogenic aerosols, Science. 1992. V. 255. P. 423–430.
3. Climate Change 2013: The Physical Science Basis / T. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, et al. Eds. Cambridge; N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2007. 1535 p.
4. 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.
5. Елисеев А.В., Чжан М., Гизатуллин Р.Д. и др. Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углеродный цикл // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 41–53.

6. Kuylenstierna J., Rodhe H., Cinderby S., et al. Acidification in developing countries: Ecosystem sensitivity and the critical load approach on a global scale, *Ambio*. 2001. V. 30. P. 20–28.

7. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. Cambridge/New York: Cambridge University Press, 2001. 881 p.

8. Myhre G., Samset B., Schulz M., et al. Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations, *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 1853–1877.