



УДК 517.926

Евтушенко Андрей Александрович, доцент, к.ф.-м.н., доцент кафедры математики

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗМУЩЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕЗОСФЕРЫ ВЫЗВАННОГО СПРАЙТОМ

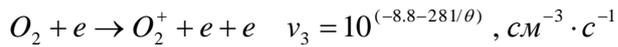
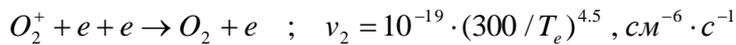
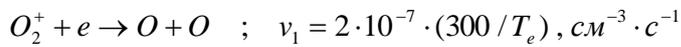
Ключевые слова: система дифференциальных уравнений, спрайт, мезосфера, химический состав.

Аннотация. Вопрос влияния спрайтов на химический состав мезосферы был поставлен практически сразу после открытия высотных разрядов. Развитие спрайта сопровождается резким увеличением электрического поля, а следовательно и скоростей плазмо-химических реакций, что приводит к возмущению концентрации электронов, ионов, нейтральных химических компонент, в том числе в возбужденном состоянии, излучению в различных диапазонах. В статье представлено описание программно-вычислительного комплекса, позволяющего провести численное моделирование разрядов в атмосфере.

Семейство высотных разрядов было открыто 30 лет назад, и до сих пор привлекает большое внимание научного сообщества. В настоящее время установилась общепринятая классификация разрядов, включающая джеты, спрайты, гало и эльфы. Практически сразу после открытия высотных разрядов встал вопрос об их возможном влиянии на химический состав атмосферы. В данной работе подробно описывается разработанный авторами статьи программно-вычислительный комплекс (ПВК), позволяющий моделировать динамику возмущения химического состава атмосферы при развитии разрядов.

На первом этапе разработки всех плазмохимических моделей стоит вопрос о выборе набора химических компонент и химических реакций. С одной стороны возникает желание рассмотреть как можно больше химических процессов, с другой стороны данные о начальных концентрациях многих химических компонент и скоростей химических реакций отсутствуют. Таким образом, необходимо сделать предположение об основных процессах и построить достаточно полную химическую систему для нашей задачи. Для моделирования спрайтов нами предложена система из 267 химических реакций для 61 химической компоненты.

Для понимания работы ПВК рассмотрим лишь 3 химические реакции для 4-х компонент.



Для каждой химической компоненты необходимо написать ОДУ первого порядка, где слева будет изменение данной компоненты, а в правой части стоки и источники.

$$\frac{dN_1}{dt} = v_2 \cdot N_4 \cdot N_3 \cdot N_3 - v_3 \cdot N_1 \cdot N_3, \% O_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 2 \cdot v_1 \cdot N_4 \cdot N_3, \% O$$

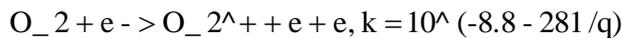
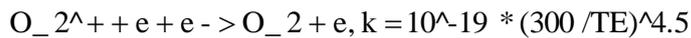
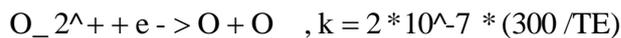
$$\frac{dN_3}{dt} = -v_1 \cdot N_4 \cdot N_3 - v_2 \cdot N_4 \cdot N_3 \cdot N_3 + v_3 \cdot N_1 \cdot N_3, \% e$$

$$\frac{dN_4}{dt} = -v_1 \cdot N_4 \cdot N_3 - v_2 \cdot N_4 \cdot N_3 \cdot N_3 + v_3 \cdot N_1 \cdot N_3, \% O_2^+$$

Построить данную систему легко для малого количества компонент, но при увеличении количества и необходимости внесения изменений, задача становится трудоемкой и вероятность ошибки значительно увеличивается. Поэтому для построения системы уравнений написан препроцессор для генерации файлов, пригодных для дальнейшего использования при решении задачи.

Список реакций задается в хорошо читаемом виде.

Reactions



End Reactions

По данному файлу препроцессор автоматически создает нужную функцию

function dN=diffN(t,N,getVParamsF,z,Ne0)

dN = [+v(2)*N(4)*N(3)*N(3)-v(3)*N(1)*N(3); % O_2

+v(1)*N(4)*N(3)+v(1)*N(4)*N(3); % O

-v(1)*N(4)*N(3)-v(2)*N(4)*N(3)*N(3)-v(3)*N(1)*N(3); % e

-v(1)*N(4)*N(3)-v(2)*N(4)*N(3)*N(3)+v(3)*N(1)*N(3); % O_2^{++}];

end

При работе препроцессора автоматически проверяется закон сохранения массы и заряда, химические реакции анализируются на предмет их двойного учета. При необходимости удаления или изменения реакции достаточно переписать ее лишь в одном месте, изменение программного кода произойдет автоматически.

В ПВК реализована возможность задания данных о динамике основных интересующих нас величинах – электрическом поле (q), проводимости (σ), температуре электронов (T_e) и других. Непосредственно численные расчеты проводятся с использованием Matlab.

ПВК был успешно применен для моделирования спрайтов в ночных условиях, результаты опубликованы в [1].

Список литературы:

[1] Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Самосогласованная модель ночного спрайта // Изв. ВУЗов – Радиофизика. 2016 – Т. 59. – № 12. – С. 1092 – 1102.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 18-01-00556 А).

SOLUTION OF THE DIFFERENTIAL EQUATION SYSTEM DURING MODELING THE PERTURBATION OF THE MESOSPHERE CHEMICAL COMPOSITION CAUSED BY SPRITE

Andrey A. Evtushenko

Key words: differential equation system, sprite, mesosphere, chemical composition.

The question of sprites influence on the mesosphere chemical composition was raised almost immediately after the discovery of high-altitude discharges. The development of the sprite is accompanied by a sharp increase of electric field, and hence the speeds of plasma-chemical reactions, which leads to the perturbation of concentration of electrons, ions, neutral chemical components, including in the excited state, radiation in different ranges. The article presents a description of the software and computing complex, which allows for numerical modeling of discharges in the atmosphere.