



УДК 53.02:087.4

ОПИСАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ CHARM-DE ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А. А. Криволицкий¹, М. В. Банин¹, Л. А. Черепанова¹, А. В. Николаев^{2,3},
А. А. Куколева⁴, Т. Ю. Вьюшкова¹

¹Центральная аэрологическая обсерватория (ФГБУ «ЦАО»), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

²Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»), г. Москва, Россия

³Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ФГБУН «ИМАШ РАН»), г. Москва, Россия

⁴Московский государственный технический университет гражданской авиации (ФГБОУ ВО МГТУ ГА), г. Москва, Россия

В статье представлено краткое описание и результаты расчетов, полученные с помощью глобальной численной фотохимической модели атмосферы CHARM-DE (Chemical Atmospheric Research Model with D and E regions, далее – численная модель CHARM-DE), до высоты 130 км для разных географических долгот и невозмущенной ионосферы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОЗОНОСФЕРА, ИОНОСФЕРА, ГЛОБАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

DOI 10.5425/2304-7380_2023_37_1

<https://elibrary.ru/exdbmd>

1. ВВЕДЕНИЕ

Численная модель CHARM-DE разработана лабораторией химии и динамики атмосферы ФГБУ «ЦАО» в рамках выполняемой ФГБУ «ИПГ» научно-исследовательской и технологической работы по созданию системы глобального мониторинга и прогноза состояния областей D и E ионосферы, усваивающей космическую информацию о потоках солнечной радиации.

Усвоение космической информации может осуществляться при решении прикладных задач электродинамики, например, при оценке формы и элементов конструкции спутника в магнитоактивной плазме на эффективность его излучающих систем или исследовании влияния состояния ионосферы на качество спутниковой радиолинии [1]. Исходными данными для электродинамических задач являются профили электронной концентрации на радиотрассе, соединяющей земную станцию и спутник.

Как показано далее, для расчета профилей электронной концентрации в ОКП используется фотохимический ионно-нейтральный блок численной модели CHARM-DE создаваемой системы, в

Электронная почта автора для переписки:

Криволицкий Алексей Александрович, krivolutsky@mail.ru

Банин Максим Викторович, baninmax@yandex.ru

Черепанова Лидия Александровна, krivolutsky@mail.ru

Николаев Алексей Владимирович, alarmoren@yandex.ru

Куколева Анна Александровна, kuanfao@rambler.ru

Вьюшкова Татьяна Юрьевна, Tayanavyshkova@rambler.ru



<https://elibrary.ru/exdbmd>

Адрес редакции журнала

«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»

129128; Россия, Москва

ул. Ростокинская, 9.

e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

котором учтены 194 химические реакции и 36 реакций фотодиссоциации и ионизации. Численная модель является логическим развитием модели CHARM-I [2].

2. ПРЕДПОСЫЛКИ И ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ CHARM-DE

Как известно, поглощение ультрафиолетовой радиации Солнца приводит к образованию озоносферы и ионосферы Земли. Фотохимическое численное моделирование нейтральных составляющих прошло долгий путь от простого кислородного цикла (являющегося до сих пор стержнем всех фотохимических схем), предложенного С. Чепменом в 1930 г. [3], до современных глобальных трехмерных численных моделей. Ключевую роль в образовании озоносферы Земли, как известно, играет солнечная ультрафиолетовая (УФ) радиация, которая приводит к диссоциации многих газовых составляющих (таких как O_2 , H_2O , N_2O , NO_2 и др.), продукты которых, в свою очередь, участвуют в химических реакциях, определяющих в конечном итоге глобальное содержание озона в земной атмосфере. Сравнение результатов моделирования с наблюдениями показало, что для воспроизведения широтной структуры полей озона, кроме фотохимических реакций, необходимо учитывать глобальный перенос химически активных атмосферных примесей, включая озон.

Интенсивное развитие фотохимического моделирования в значительной степени обусловлено вызовами природы: глобальное уменьшение озона, «озоновая дыра» в Антарктике, возможное влияние высотной авиации (например, аварий при запусках ракет-носителей) на содержание озона и т.д. При этом следует также учитывать влияние солнечной активности на состояние озоносферы (космические лучи, релятивистские электроны, протоны и др.). Подробное современное изложение этих вопросов можно найти как в зарубежной, так и в отечественной литературе [4-9]. Следует отметить, что в настоящее время в мире существует порядка десяти трехмерных моделей, включая численную модель CHARM-DE. Некоторый перечень и краткое описание моделей, а также их применения можно найти в [10, 11].

В тоже время моделей, в которых учитываются реакции ионной химии в D и E областях ионосферы, совместно с реакциями нейтральной химии мало, хотя элементарные процессы были проработаны достаточно детально [10-12], что позволило решить многие задачи в этой сложной области.

Численное трехмерное моделирование является наиболее сложной задачей. В работе [2] эта задача была решена с помощью численной модели CHARM-I (Chemical Atmospheric Research Model with Ions). При этом верхняя граница модели была соответствовала 90 км над поверхностью Земли.

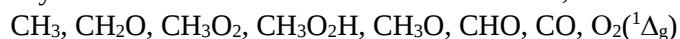
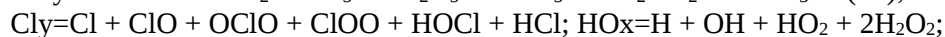
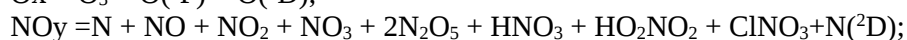
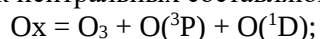
В данной работе представлены результаты расчетов, полученные с помощью новой численной модели CHARM-DE, которая воспроизводит характеристики слоев атмосферы, включая ионосферу, до высоты 130 км.

Авторы статьи, надеются на широкое применение численной модели CHARM-DE в решении практических задач, связанных с расчетом особенностей распространения радиоволн в ОКП, а также в исследовании химического состава атмосферы, например, при оценке причин аварийных запусков ракет-носителей, а также выявлении трендов климатического характера и циклических периодов, связанных с годовым, сезонным и суточным ходом солнечной активности.

3. ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ CHARM-DE

Нейтральные составляющие

Модель является логическим развитием трехмерной глобальной фотохимической модели нейтральных составляющих CHARM-I [2], расширенную за счет ионизированных составляющих. В список нейтральных составляющих добавлена компонента $O_2(^1\Delta_g)$, важная для расчета ионизированных составляющих. Основным методом расчета являлся метод «химических семейств». Список нейтральных составляющих, рассчитываемых в модели, имеет вид:



– газы-источники

CH_4 , CO_2 , N_2O , CF_2Cl_2 , CFCl_3 , H_2 , Cl_4 , Cl_2 , CH_3Cl , CH_2Cl , O_2 (профиль фиксирован), N_2 (профиль фиксирован), $\text{M} = \text{O}_2 + \text{N}_2$ (концентрация молекул воздуха), H_2O (глобальное распределение фиксировано).

Вертикальный профиль молекулярного кислорода в расчетах был зафиксирован. Также не менялось глобальное (двумерное) распределение водяного пара, основанное на наблюдениях со спутника UARS (прибор HALOE). Список реакций, их константы, квантовые выходы приводятся в описании к модели CHARM-I [1].

Заряженные компоненты

В модели рассчитываются следующие ионизированные составляющие:

Положительные ионы

O_2^+ $\text{O}_2^+(\text{H}_2\text{O})$ H_3^+O $\text{H}_3^+\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ $\text{H}_3^+\text{O}(\text{H}_2\text{O})_3$ $\text{H}_3^+\text{O}(\text{H}_2\text{O})_4$ $\text{H}_3^+\text{O}(\text{H}_2\text{O})_2$ NO^+N_2
 NO^+CO_2 $\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})$ $\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_2$ $\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_3$

Электроны и отрицательные ионы

$[\text{e}]$ O_2^- O_3^- O_4^- CO_4^- O^- OH^- HCO_3^-

В существующем варианте фотохимического ионно-нейтрального блока численной модели CHARM-DE учтены 194 химических реакций и 36 реакций фотодиссоциации и ионизации. Шаг по времени при интегрировании модели составлял 100 сек.

В комплекс данных, использованных в модели ионосферы, входят сведения, необходимые для расчета ионизации атмосферы и сведения о происходящих в ионизированной среде процессах. При расчете ионизации учитываются: интенсивность ионизирующих излучений, сечения их поглощения и ионизации в атмосфере, распределения поглощающих и ионизируемых нейтральных компонент.

Образовавшиеся в результате ионизации первичные ионы претерпевают многообразные превращения, вступая в ионно-молекулярные реакции, в том числе с участием молекул водяного пара, и в реакции рекомбинации с электронами. В результате фотоприлипания электронов к нейтральным молекулам образуются отрицательные ионы, что вызывает реакцию взаимной рекомбинации положительных и отрицательных ионов. Отрицательные ионы могут терять заряд в результате соударений и в процессах фотоотлипания. Детально ионная химическая реакция описана в [10].

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ

Ниже представлены в графической форме некоторые данные о химических компонентах и электронной концентрации, полученные с использованием численной модели CHARM-DE. Из нейтральных компонент выбран озон (см. рис. 1), а из заряженных – электронная концентрация (см. рис. 2), которые могут быть использованы для мониторинга озона и в расчетах коэффициентов поглощения и преломления электромагнитной волны на радиотрассе.

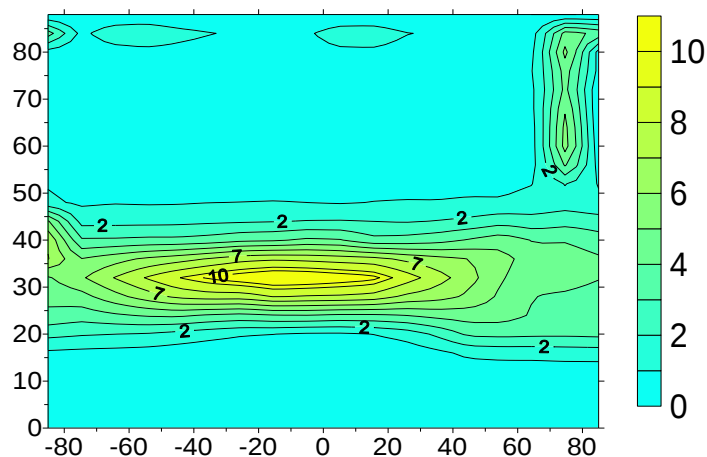


Рис. 1. Среднемесячное отношение смеси озона (ppmv), полученное при учете зенитного угла Солнца для января 1991 года

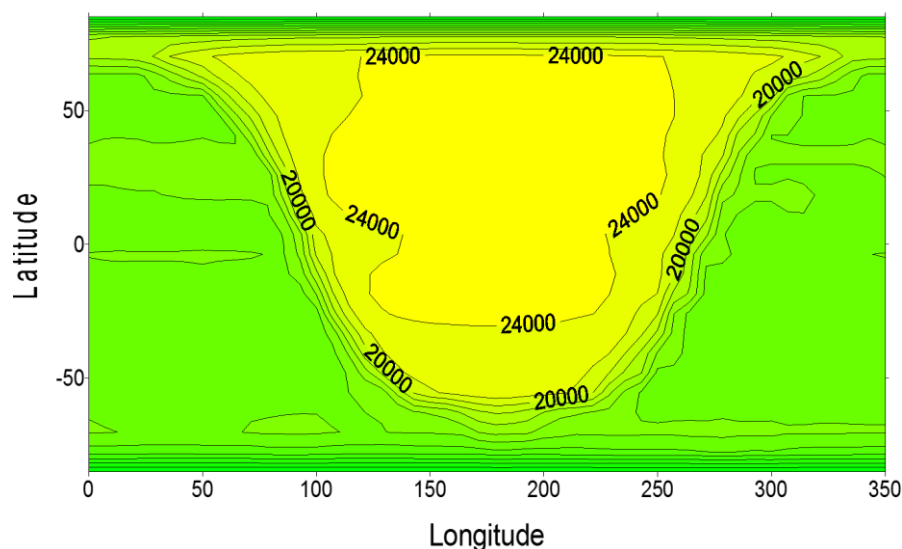


Рис. 2. Глобальное распределение содержания электронов (в cm^3) на высоте 120 км для 21 июня 1991 года (00:00 UTC), полученное с использованием численной модели CHARM-DE

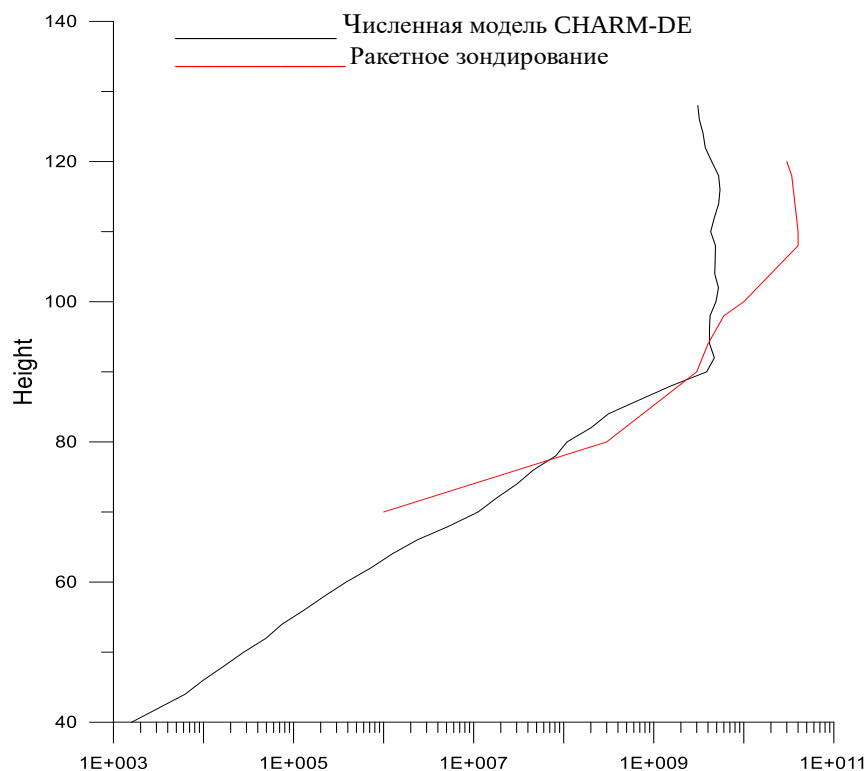


Рис.3. Вертикальный профиль электронной концентрации, полученный экспериментально при ракетном зондировании и с использованием численной модели CHARM-DE

Можно отметить, что данные ракетного зондирования (для конкретного пуска) и модельные расчеты качественно близки. В отдельных высотных интервалах видны существенные количественные различия в данных, что может быть обусловлено случайно выбранным временем в численной модели CHARM-DE и ошибками ракетных измерений. В дальнейшем следует увеличить верхнюю границу численной модели CHARM-DE для сравнения модельных расчетов с имеющимися измерениями ионного состава верхней атмосферы на высотах 808-835 км [13, 14] и данными, полученными с

использованием международной стандартной эмпирической модели земной ионосферы IRI (International Reference Ionosphere).

5. ВЫВОДЫ

Полученные данные с помощью фотохимического ионно-нейтрального блока численной модели CHARM-DE позволяют его использовать при создании программы для электронной вычислительной машины в создаваемой системе глобального мониторинга и прогноза состояния областей D и E ионосферы, усваивающей космическую информацию о потоках солнечной радиации.

В качестве прикладных задач, решаемых с помощью численной модели CHARM-DE следует рассматривать расчет распространения радиоволн в ОКП при проектировании радиосистем, исследование химического состава атмосферы при аварийных запусках ракет-носителей, выявлении трендов климатического характера и циклических периодов, связанных с годовым, сезонным и суточным ходом солнечной активности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котельников М. В., Крылов С. С., Филиппов Г. С. Математическое моделирование электродинамики спутника в ионосфере: под редакцией В. А. Котельникова; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - Москва: [б. и.]; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2022. – 182 с.
2. Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю. Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 4, с. 483-503, 2015.
3. Chapman S. The absorption and dissociation of ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth. Proc. Phys. Soc. V. 43. P. 26-45. 1931.
4. Ларин И.К. История озона. М.: РАН, 2022. - с.478, 206 ил.
5. Криволицкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, с.386, 2010.
6. Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В., Толстых М.А. Опытные глобальные прогнозы параметров атмосферы на основе экспериментальной технологии, учитывающей фотохимию озона (модель FOROZ). Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 2. С. 250-260. 2020.
7. Ларин И.К. Химическая физика озонового слоя. М.: ГЕОС, 159 с. 2013.
8. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1987
9. Brasseur G., De Baets P. Ions in the mesosphere and lower thermosphere: a two dimensional model. J. Geophys. Res. 1986, 91 ND3 4025-4046.
10. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
11. Данилов А.Д., Власов М.Н. Фотохимия ионизированных и возбужденных частиц в нижней ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1973.
12. Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В. Глобальная трехмерная численная фотохимическая модель CHARM. М.: ГЕОС, с.123, 2021.
13. Саморуков В. В., Иванов М. С., Кирюшов Б. М. и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620207 Российская Федерация. Пополняемая база спутниковых данных ионного состава верхней атмосферы на высотах 811-835 км от поверхности Земли за 2015-2021 года (часть 1): № 2022620049: заявл. 12.01.2022; опубл. 24.01.2022; заявитель федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова".
14. Саморуков В. В., Иванов М. С., Кирюшов Б. М. и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621368 Российская Федерация. Пополняемая база спутниковых данных ионного состава верхней атмосферы на высотах 808-835 км от поверхности Земли за 2010-2014 года (часть 2): № 2022621251: заявл. 01.06.2022; опубл. 10.06.2022; заявитель федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова».

DESCRIPTION OF THE GLOBAL NUMERICAL CHARM-DE MODEL IN THE CALCULATION OF ELECTRON DENSITY PROFILES IN NEAR-EARTH SPACE

Krivolutsky A.A., Banin M.V., Cherepanova L.A., Nikolaev A.V., Kukoleva A.A., Vyushkova T.Yu.

The article presents a brief description and calculation results obtained using the global numerical photochemical model of the atmosphere CHARM-DE (Chemical Atmospheric Research Model with D and E regions, hereinafter referred to as the CHARM-DE numerical model), up to a height of 130 km for different geographic longitudes and undisturbed ionosphere.

KEYWORDS: OZONOSPHERE, IONOSPHERE, GLOBAL DISTRIBUTIONS, ELECTRON DENSITY, RADIO WAVE PROPAGATION, NEAR-EARTH SPACE