

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.028

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ Е СЛОЯ АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ИОНИЗАЦИИ

В.Д. Николаева¹, Е.И. Гордеев²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38,
Санкт-Петербург, Россия, 199397

²Санкт-Петербургский Государственный университет, Университетская наб. 7/9,
Санкт-Петербург, Россия, 199034

Аннотация. Модель Е слоя авроральной ионосферы AIM-E позволяет рассчитывать концентрацию нейтралов NO , $N(4S)$, $N(2D)$, ионов O_2^+ , NO^+ , N_2^+ , $O^+(4S)$, $O^+(2D)$, $O^+(2P)$ и электронов Ne по всей авроральной зоне в диапазоне высот 90 - 150 км. Концентрации ионосферных составляющих рассчитываются в ходе решения системы уравнений неразрывности для 10 ионосферных компонент и 39 химических реакций, с учетом солнечного коротковолнового излучения и потоков электронов магнитосферного происхождения. AIM-E предусматривает два способа задания потока энергии электронов с использованием: (1) прямых измерений спектра высыпающихся электронов на низкоорбитальных спутниках; (2) восстановленных спектров энергии электронов по расчетам модели высыпаний OVATION-Prime. Проведено сопоставление вертикальных профилей электронной концентрации AIM-E с данными радара некогерентного рассеяния EISCAT.

Ключевые слова: авроральный овал, Е-слой ионосферы, численное моделирование, суббури, ионный состав, электронная концентрация.

Структура модели AIM-E. Разработана модель химического состава аврорального Е-слоя ионосферы (Auroral Ionosphere Model, AIM-E), основанная на численном решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений неразрывности для 10 ионосферных компонент и 39 химических реакций, с учетом солнечного коротковолнового излучения и потоков корпускулярных электронов. Начальным решением системы является квазистационарное состояние Е-слоя в заданных условиях солнечной и геомагнитной активности. Затем решение эволюционирует в соответствии с изменением входных параметров. Скорости химических реакций отличаются более чем на десять порядков, что приводит к высокой жесткости системы дифференциальных уравнений. Численное решение реализовано с использованием высокопроизводительного метода Гира [Gear, 1971], что позволяет в реальном времени рассчитывать временное и пространственное распределения концентраций ионосферных нейтралов NO , $N(4S)$, $N(2D)$, ионов O_2^+ , NO^+ , N_2^+ , $O^+(4S)$, $O^+(2D)$, $O^+(2P)$ и электронов Ne во всей авроральной ионосфере в диапазоне высот 90 - 150 км и для любого уровня геомагнитной активности.

Параметры нейтральной атмосферы задаются по модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002].

Плотность потока энергии солнечного рентгеновского излучения на верхней границе атмосферы от 0.05 до 0.8 нм определяется согласно [ГОСТ 25645.130-86], от 0.8 до 10 нм - по [ГОСТ 25645.145-88]. Модель потока крайнего ультрафиолетового излучения для аэрономических расчетов EUVAC [Richards et al., 1994] используется для задания потока фотонов УФ излучения от 10 до 105 нм.

Также в модели AIM-E учитывается ионизация электронами магнитосферного происхождения с энергией 10 эВ - 30 кэВ. Спорадическая ионизация играет доминирующую роль ночью и в периоды геомагнитных возмущений. В качестве источника корпускулярной ионизации используются измерения дифференциального потока электронов на низкоорбитальных спутниках либо восстановленных спектров энергии электронов по расчетным значениям средней энергии и величины потока электронов из модели высыпаний OVATION-Prime [Newell et al., 2010].

Поглощение энергии в толще атмосферы учтено с помощью расширенной функции Чепмена для коротковолнового солнечного излучения [Hart, 1968] и функции диссипации энергии для высыпающихся электронов [Sergienko and Ivanov, 1993].

В работе показаны первые результаты численной модели Е-слоя авроральной ионосферы с различными источниками корпускулярной ионизации в условиях интенсивных высыпаний электронов и проведена ее апробация с использованием данных радара некогерентного рассеяния EISCAT.

Тестирование модели AIM-E. Проведено сопоставление модельного вертикального профиля электронной концентрации с профилем, измеренным радаром некогерентного рассеяния EISCAT. Расчеты AIM-E проводились с использованием различных методов задания источника высыпаний электронов: (1) - с использованием данных измерений потока электронов на низкоорбитальном спутнике REIMEI и (2) - по дифференциальному спектру энергии электронов, восстановленному по расчетным значениям модели высыпаний OVATION-Prime.

(1) Низкоорбитальный спутник INDEX (Innovative Technology Demonstration Experiment)/REIMEI [Saito *et al.*, 2011] проводит измерения спектра потока электронов от 11 эВ до 11 кэВ. Частицы этих энергий проникают на ионосферные высоты до 80 км и служат основным источником ионизации ночью, а также вносят значительный вклад в ионизацию авроральной ионосферы в дневное время. REIMEI имеет почти солнечно-синхронную орбиту на околополуденном меридиане (12:50 - 0:50 LT). Высота полета спутника составляет 610 - 670 км. Для расчета высотного профиля ионизации, измеряемые потоки электронов проецируются на высоту 110 км вдоль силовых линий магнитного поля по модели IGRF-12 [Thébault *et al.*, 2015].

(2) Эмпирическая модель высыпаний OVATION-Prime основана на данных низкоорбитальных спутников DMSP в высоких широтах и позволяет проводить расчеты и интервале геомагнитных широт от 60° до 90° на дискретной сетке $MLT \times MLAT = 0.25h \times 0.25^\circ$. Используя результаты расчетов OVATION-Prime в качестве входных параметров для модели AIM-E, мы можем получать распределение концентраций ионов и электронов для любой точки в высокоширотной ионосфере. В отличие от дифференциального спектра энергий, измеряемого непосредственно на борту спутников, модель предоставляет только три средних параметра высыпаний электронов в каждом узле заданной координатной сетки — общий поток энергии, общий поток электронов и среднюю энергию электронов. Последние две величины используются для восстановления энергетического спектра высыпавшихся электронов в предположении максвелловского распределения.

Для оценки результатов моделирования выбрано событие 5 декабря 2007 с интенсивным высыпанием электронов в авроральной зоне, при одновременном пролете спутника REIMEI и сеансе зондирования радара некогерентного рассеяния EISCAT в Тромсё, Норвегия (69° 35' с.ш., 19° 13' в.д.) (<https://portal.eiscat.se/schedule/schedule.cgi>). Во время пролета спутника радар EISCAT работал в режиме Common Program 1 (CP1) по программе зондирования Arg1 (диапазон высот: 96 - 422 км; пространственное разрешение: 0.9 км; временное разрешение: 0.44 с).

На рисунке 1а показаны результаты расчета электронной концентрации модели AIM-E вдоль траектории спутника REIMEI во время пересечения аврорального овала (00:35:45 - 00:37:17 UT) с использованием измеренного на спутнике спектра энергии электронов. Спутник пересекает авроральную зону по направлению к экватору. После прохождения спутником 69.5° магнитной широты расчеты модели AIM-E показывают увеличение электронной концентрации в слое E более чем на 2 порядка величины и образование спорадического слоя Es. Это связано с усилением потока электронов в диапазоне энергии между 1 и 11 кэВ. Электроны с различными энергиями вносят вклад в ионизацию на разных высотах, и существует прямая связь между интенсификацией потока электронов, увеличением модельной электронной концентрации и высотой максимума E слоя, демонстрируя качественное соответствие результатов моделирования.

Для момента пролета спутника над радаром (0:36:36 UT, $\Delta MLT \sim 4$ мин), дополнительно рассчитан профиль электронной концентрации с использованием восстановленного спектра энергии электронов по данным модели высыпаний OVATION-Prime. Результаты расчетов AIM-E с двумя способами задания потока высыпавшихся электронов были сопоставлены с прямыми измерениями электронной концентрации радара некогерентного рассеяния EISCAT. Из рисунка 1b видно хорошее совпадение величины электронной концентрации в максимумах обеих модельных кривых с данными радара EISCAT (ошибка в пределах 10%). Однако вертикальный профиль, рассчитанный с использованием спутниковых измерений потока электронов, и данные радара некогерентного рассеяния также совпадают и по высоте максимума профиля N_e , в отличие от расчетов с OVATION-Prime. Расхождение высоты максимума электронной концентрации AIM-E+OVATION-Prime с результатами измерений EISCAT составляет 13 км. Подобное несоответствие в высотном распределении электронной концентрации обусловлено различием формы спектра высыпавшихся электронов.

На рисунке 2 приведены спектр энергии высыпавшихся электронов со спутника REIMEI и восстановленный спектр по расчетам модели высыпаний OVATION-Prime. Видно, что спектр, восстановленный из модельных величин общего потока и средней энергии электронов с использованием максвелловского распределения, дает существенно завышенную величину потока для больших энергий. Электроны из хвоста распределения проникают на более низкие высоты, смещая максимум профиля концентрации вниз.

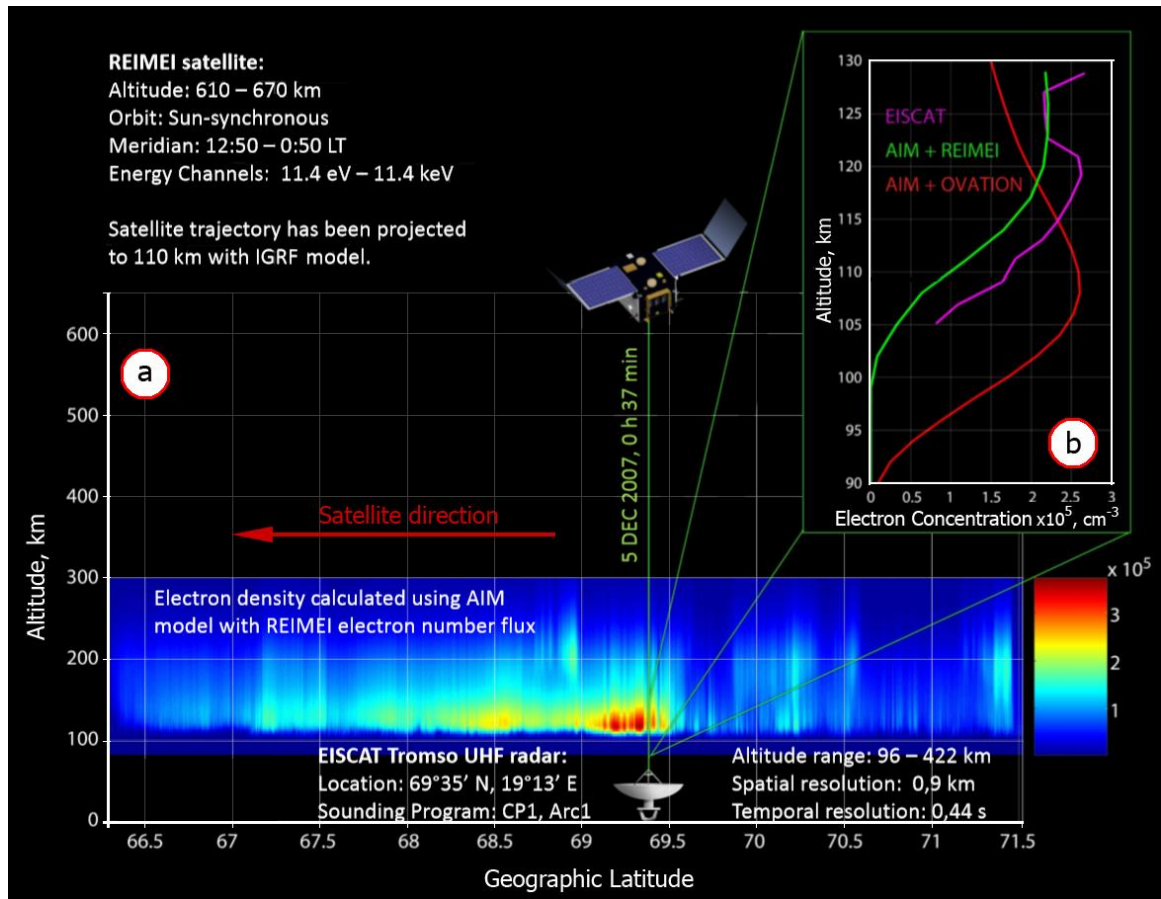


Рисунок 1. а - результаты расчетов электронной концентрации модели AIM-E вдоль траектории спутника REIMEI для 5 декабря 2007 года (00:35:45 - 00:37:17 UT); б - вертикальные профили электронной концентрации для момента сопряженных спутниковых и радарных измерений (0:36:36 UT). Зеленая линия - профиль N_e , рассчитанный по модели AIM-E с использованием спутниковых измерений потока электронов; красная линия - профиль N_e , рассчитанный по модели AIM-E с использованием расчетов с OVATION-Prime; розовая линия - данные радара некогерентного рассеяния EISCAT.

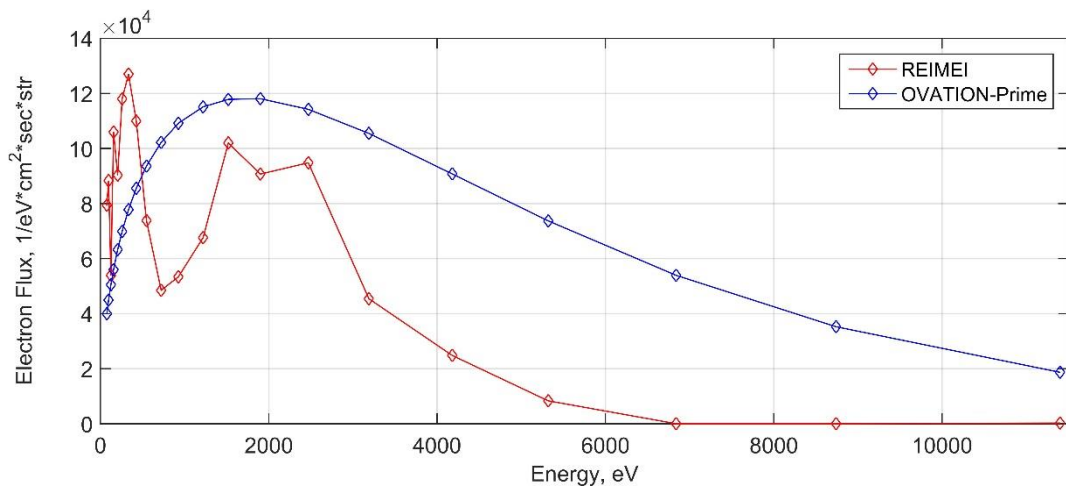


Рисунок 2. Спектр потока энергий со спутника REIMEI (красная линия) и спектр, восстановленный из расчетов модели высыпаний OVATION-Prime (синяя линия).

Заключение. Разработана и успешно опробована численная модель химического состава E-слоя авроральной области ионосферы AIM-E, которая может быть задействована как для оперативной диагностики состояния высокоширотной ионосферы, так и для решения широкого круга научных задач. AIM-E позволяет рассчитывать распределения концентрации ионов и электронов, ионосферной проводимости, электрических полей и токов. Модель также может быть внедрена как часть более сложных моделей космической погоды в качестве эффективного быстродействующего ионосферного модуля.

Благодарности. Работа проводится при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-80004).

Список литературы

- ГОСТ 25645.130-86 «Излучение рентгеновское солнечное. Амплитудные характеристики» - М.: Изд-во стандартов, 1986.
- ГОСТ 25645.145-88 «Излучение солнечное рентгеновское мягкое. Модель плотности потоков при отсутствии вспышек» - М.: Изд-во стандартов, 1990.
- EISCAT data page. <https://portal.eiscat.se/schedule/schedule.cgi>
- Gear C.W. (1971), Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations. Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- Hart J. F. (1968), Computer Approximations, p. 136, John Wiley, New York.
- Newell P.T., Sotirelis T., and Wing S. (2010), Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora // J. Geophys. Res., 115, A03216, doi:10.1029/2009JA014805
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., and Aikin A.C. (2003), NRL-MSISE-00 Empirical Model of the Atmosphere: Statistical Comparisons and Scientific Issues // J. Geophys. Res., doi:10.1029/2002JA009430
- Richards P.G., Fennelly J.A., and Torr D.G. (1994), EUVAC: a solar EUV flux model for aeronomic calculations // J. Geophys. Res., 99, 8981.
- Saito H., Hirahara M., Mizuno T., Fukuda S., Fukushima Y., Asamura K., Masumoto Y. (2011), Small satellite REIMEI for auroral observations // Acta Astronautica, 69(7–8), 499–513. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.05.007>
- Sergienko T.I., Ivanov V.E. (1993), A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact // Ann. Geophys. V. 11. P. 717-727.
- Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al. (2015), International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets and Space, 67, 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>