

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.027

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Вера Николаева¹ и Евгений Гордеев²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург,
Россия; e-mail: nikolaeva.vera@gmail.com

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: evgeny.i.gordeev@spbu.ru

Аннотация

Модель авроральной ионосферы (AIM-E) предназначена для расчета химического состава в E-слое высокоширотной ионосферы и учитывает влияние крайнего УФ излучения Солнца и высыпания электронов магнитосферного происхождения, что чрезвычайно важно для авроральной ионосферы, особенно в возмущенных геомагнитных условиях. Чтобы увеличить точность таймирования модели AIM-E при моделировании динамики состояния ионосферы в ходе геомагнитных бурь и суббурь, мы предлагаем параметризовать эмпирическую модель высыпаний электронов OVATION-Prime с помощью наземного геомагнитного индекса PC. Это дает следующие преимущества: (1) поскольку индекс PC отражает геоэффективные условия солнечного ветра, появляется возможность проводить ионосферные расчеты с входными данными, максимально приближенными к актуальным геомагнитным условиям; (2) оперативно оценивать текущую геомагнитную обстановку, поскольку индекс PC доступен в режиме реального времени с минутным временным разрешением.

Введение

Многие теоретические и практические задачи, связанные с высокоширотной ионосферой, требуют комплексного анализа регулярных наземных и космических измерений в сочетании с численным моделированием геофизических процессов. Модель авроральной ионосферы (AIM-E) (Nikolaeva et al., 2021) разработана для оценки параметров высокоширотной E-области ионосферы и учитывает поток крайнего солнечного УФ-излучения и высыпания электронов магнитосферного происхождения. Оба источника ионизации могут задаваться с использованием спутниковых измерений или эмпирических моделей.

Эмпирическая модель высыпаний электронов OVATION-Prime (Newell et al., 2010) интегрирована в модель AIM-E для оценки глобального распределения высыпающихся частиц и может применяться для описания крупномасштабной динамики ионосферы в авроральной зоне. PC-индекс был применен в качестве входного параметра для оценки энергетических характеристик потоков высыпаний электронов в модели OVATION-Prime и соответственно стал управляющим параметром, регулирующим высыпания электронов в модели ионосферы AIM-E (PC) (Nikolaeva et al., 2022). PC-индекс был впервые предложен (Troshichev et al., 1988) в качестве меры геомагнитной активности в полярной шапке. Данный индекс нормирован на электрическое поле солнечного ветра (Kann and Lee, 1979) и рассчитывается по горизонтальной составляющей геомагнитных возмущений в северной и южной полярных шапках на станциях Туле (Дания) и Восток (Антарктида). (Liou et al., 2003) показали тесную связь вариаций геомагнитного индекса PC с высыпаниями авроральных электронов: от 48% (лето) до 59% (зима) изменений 1-минутного PC-индекса соотносится с изменением мощности аврорального сияния в полушарии, вызванного продольными токами, связанными с высыпанием частиц.

Результаты моделирования AIM-E с использованием OVATION-Prime (PC) демонстрируют хорошее согласие с данными радара некогерентного рассеяния (EISCAT UHF, Tromsø) и данными вертикального зондирования в арктической зоне (Nikolaeva et al., 2022). Модель хорошо воспроизводит электронное содержание в вертикальном столбе (90—140 км) и критическую частоту спорадического слоя E, сформировавшегося за счет высыпающихся электронов. AIM-E (PC) может применяться для мониторинга спорадического слоя E в режиме реального времени и во всей высокоширотной ионосфере, включая авроральную и субавроральную зоны.

Модель AIM-E (PC)

Auroral Ionosphere Model (AIM-E) рассчитывает концентрацию малых нейтральных компонент, ионов и электронов в диапазоне высот от 90 до 140 км в высоких широтах. Модель способна воспроизводить ионосферный отклик на геомагнитные бури и суббури с достаточной точностью и может быть использована

для описания динамики химического состава в овале полярных сияний в возмущенные периоды (Nikolaeva et al., 2021).

Эмпирическая модель высыпаний OVATION-Prime, интегрированная в AIM-E, позволяет получить пространственное распределение параметров электронных высыпаний в высоких широтах ($MLAT = 50^\circ - 90^\circ$) на дискретной сетке ($MLT \times MLAT = 0.25 \times 0.25^\circ$). Модель основана на данных о частицах спутников DMSP за два солнечных цикла. Спутниковые данные были нормированы на параметры солнечного ветра (СВ) из открытой базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). Однако, точность параметризации на основе данных OMNI страдает по двум основным причинам: (1) параметры СВ, измеренные в точке Лагранжа L1, не всегда являются геоэффективными (не одинаковы в L1 и на околоземной орбите), а в 20% случаев вообще не взаимодействуют с магнитосферой Земли (Vokhmyanin et al., 2019); (2) пространственное распределение и энергетический спектр высыпающихся частиц существенно зависят от внутримангитосферных процессов, другими словами, при схожих условиях СВ состояние магнитосферы и, следовательно, ее взаимодействие с ионосферой может резко различаться от случая к случаю (Troshichev, 2017). Для оценки параметров высокоширотной ионосферы мы использовали геомагнитный индекс PC, который является показателем поступления энергии СВ в магнитосферу Земли (Резолюция XXII Ассамблеи МАГА, 2013), в качестве входного параметра в модель высыпаний OVATION-Prime, как это показано в (Nikolaeva et al., 2022).

Для расчета вертикального распределения ионосферных параметров недостаточно средних характеристик частиц, получаемых по модели OVATION-Prime. Дифференциальные потоки электронов были реконструированы по величине потока и средней энергии для: (1) диффузных электронов, предполагая максвелловское распределение спектра и (2) моноэнергетических электронных пучков, используя нормальное распределение с дисперсией равной половине разности центральных энергий между каналами, соседними с каналом средней энергии пучка (в соответствии с критериями определения моноэнергетического пучка в работе Newell et al., 2009). Примеры реконструкции дифференциальных потоков электронов по различным средним величинам для диффузных (красные линии) и моноэнергетических (синие линии) электронов показаны на рисунке 1. Черными линиями показан суммарный дифференциальный поток электронов, являющийся входным параметром для ионосферных расчетов по модели AIM-E (PC).

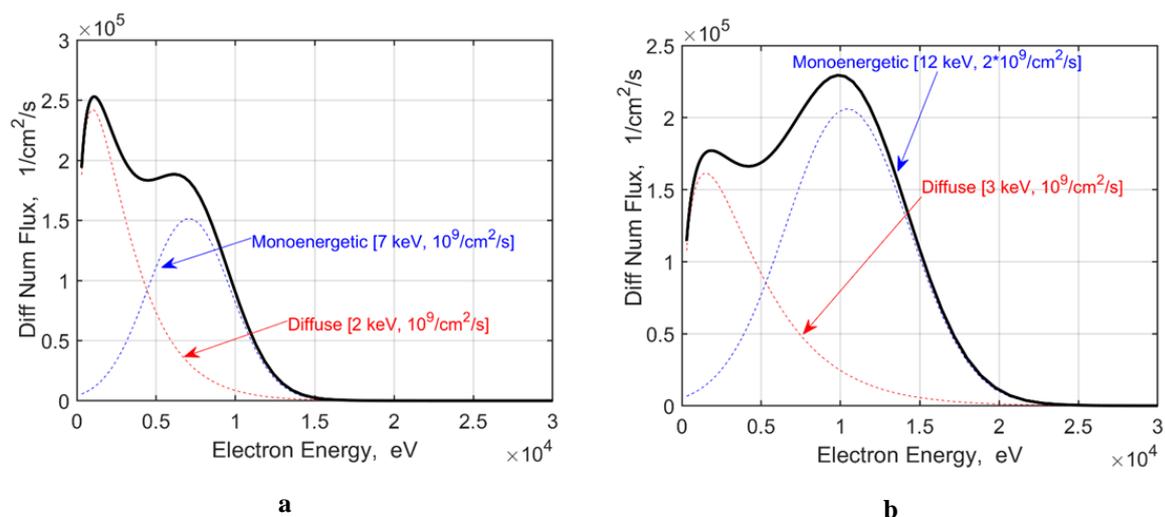


Рисунок 1. Примеры восстановления дифференциальных спектров электронов: черные линии — суммарный спектр диффузных и моноэнергетических высыпаний; красные и синие линии — дифференциальный поток энергий диффузных и моноэнергетических электронов в предположении максвелловского и нормального распределения соответственно. **а** — средняя энергия диффузных электронов 2 кэВ, суммарный поток электронов $10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$; средняя энергия моноэнергетических электронов 7 кэВ, суммарный поток электронов $10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. **б** — средняя энергия диффузных электронов 3 кэВ, суммарный поток электронов $10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$; средняя энергия моноэнергетических электронов 12 кэВ, суммарный поток электронов $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Сравнение расчетов моделей AIM-E (PC), CTIPe и IRI-2016 с данными радара EISCAT

Результаты расчетов вертикального распределения электронной концентрации по модели AIM-E (PC) были сопоставлены с данными радара некогерентного рассеяния EISCAT (<https://portal.eiscat.se/madrigal/>) и расчетами по моделям CTIPe (Codrescu et al., 2008) и IRI-2016 (Bilitza et al., 2017).

Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics Model (CTIPe) это глобальная модель ионосферы, которая рассчитывает концентрацию электронов, нейтралов и ионов в диапазоне высот от 90 до

2000 км. STIPe состоит из четырех отдельных блоков: (1) модель глобальной термосферы; (2) модель высокоширотной ионосферы; (3) – модель ионосферы/плазмосферы средних и низких широт; (4) электродинамический расчет глобального динамо-электрического поля. Входными параметрами STIPe являются плотность СВ, скорость и компоненты ММП со спутников DSCOVR или ACE (<https://www.swpc.noaa.gov/>) для режима реального времени или данные OMNI для моделирования исторических событий. Версия модели CCMC имеет временное разрешение 15 минут.

Модель *International Reference Ionosphere (IRI)* это эмпирическая модель, представляющая собой синтез большинства имеющихся наземных и космических измерений характеристик ионосферы. IRI представляет собой среднемесячные концентрации и температуры электронов и ионов в диапазоне высот 50–2000 км и является справочной моделью ионосферы. Версия модели IRI-2016, использованная в данной работе, является ее последней модификацией. IRI-2016 позволяет активировать “режим бури” (*Mertens et al., 2013*), разработанный специально для более корректных расчетов параметров E-области ионосферы в высоких широтах во время геомагнитных возмущений.

Сопоставление модельных расчетов с измерениями радара было выполнено для суббури 18 января 2007 г. наблюдаемой с 18:00–21:00 UT с увеличением индекса AE до 450 нТл. На Рис. 2а показано распределение электронной концентрации в максимуме E-слоя, полученное по модели AIM-E, во всей авроральной зоне для 20:22 UT. Величина электронной концентрации в области наиболее интенсивных высыпаний электронов достигает $4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Красной точкой обозначено месторасположение радара некогерентного рассеяния EISCAT. Видно, что радар располагается на границе авроральной зоны и электронная концентрация в максимуме слоя составляет $2.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Во время рассматриваемого события радар *EISCAT, Tromso* ($69^\circ 350 \text{ N}$, $19^\circ 130 \text{ E}$) работал по программе зондирования ARC1: диапазон высот: 96–422 км; шаг по высоте: 0.9 км; разрешение по времени: 0.44 с; антенна направлена в магнитный зенит.

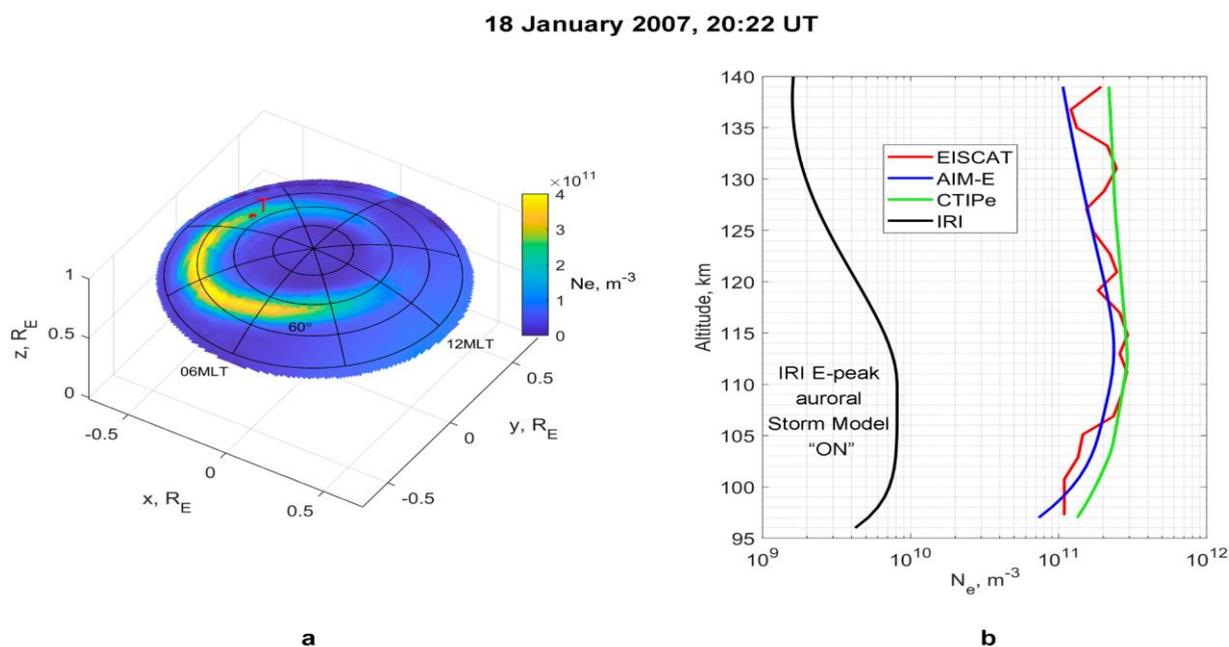


Рисунок 2. а — карта пространственного распределения электронной концентрации в максимуме слоя E для 18 января 2007 г., 20:22 UT. Красной точкой обозначено месторасположение радара некогерентного рассеяния EISCAT (Тромсе, Норвегия). Система координат — солнечно-магнитная (SM); **б** — вертикальное распределение электронной концентрации, рассчитанной по трем моделям и измеренной радаром некогерентного рассеяния, в диапазоне высот от 96 до 140 км для 18 января 2007 г., 20:22 UT. Синяя, зеленая и черная линии — расчеты по моделям AIM-E (PC), STIPe и IRI-2016 соответственно; красная линия — данные радара некогерентного рассеяния EISCAT, Tromso.

На Рис. 2б приведены вертикальные профили электронной концентрации, рассчитанные по трем моделям и измеренные радаром некогерентного рассеяния в диапазоне высот от 96 до 140 км. Модель STIPe (зеленая линия) с 15-минутными входными данными СВ, а также модель AIM-E (синяя линия) достаточно хорошо описывают вертикальное распределение электронной концентрации в E-слое высокоширотной ионосферы и показывают незначительное расхождение с данными радара некогерентного рассеяния (красная линия). Однако модель IRI-2016 (с включенным “режимом бури”) во всем исследуемом диапазоне высот недооценивает электронную концентрацию более чем на порядок и расходится с наблюдениями в среднем в 35 раз.

Заключение

Использование PC-индекса в качестве входного параметра в модели AIM-E (PC) позволяет учитывать актуальный поток энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли. Этот фактор обеспечивает более точное таймирование динамических процессов в авроральной ионосфере, что особенно важно во время геомагнитных бурь и суббурь. AIM-E (PC) не зависит от космических наблюдений, поэтому модель может работать даже при отсутствии данных о солнечном ветре, основываясь только на данных наземных магнитных наблюдений в полярных шапках.

Модель AIM-E с PC-индексом в качестве входного параметра наряду с моделью CTIPe может быть использована в авроральной зоне для количественной оценки распределения электронной концентрации во время геомагнитных возмущений, в отличие от модели IRI-2016, показывающей сильно заниженные величины относительно измерений радара некогерентного рассеяния.

Благодарности

Авторы благодарны за предоставленные данные, использованные в работе. Индекс PC для северного и южного полушарий доступен на <http://pcindex.org/archive>. Данные радара некогерентного рассеяния EISCAT доступны в базе данных Madrigal (<https://portal.eiscat.se/madrigal/>). Моделирование CTIPe и IRI-2016 выполнялось с использованием ресурсов Community Coordinated Modeling Center (CCMC) (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/>).

Финансирование

Работа Николаевой В.Д. выполнена в рамках плана научно-исследовательских и технологических работ НИУ Росгидромета, п. 6.1. «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики». Работа Гордеева Е.И. выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-583.

Литература

- Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. (2017). International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*, 15(2), 418-429.
- Codrescu M.V., Fuller-Rowell T.J., Munteanu V., Minter C.F., Millward G.H. (2008). Validation of the coupled thermosphere ionosphere plasmasphere electrodynamics model: CTIPe-mass spectrometer incoherent scatter temperature comparison. *Space Weather*, 6(9), S09005.
- Kan J.R., Lee L.C. (1979). Energy coupling function and solar wind-magnetosphere dynamo. *Geophysical Research Letters*, 6(7), 577-580.
- Liou K., Carbary J.F., Newell P.T., Meng C.-I., Rasmussen O. (2003). Correlation of auroral power with the polar cap index. *J. Geophys. Res.*, 108(A3), 1108, doi:10.1029/2002JA009556
- Mertens C.J., Xu X., Bilitza D., Mlynczak M.G., Russell III, J.M. (2013). Empirical STORM-E model: I. Theoretical and observational basis. *Advances in Space Research*, 51(4), 554-574.
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. (2009). Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A9), A09207.
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. (2010). Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A3), A03216. <https://doi.org/10.1029/2009JA014805>
- Nikolaeva V., Gordeev E., Sergienko T., Makarova L., Kotikov A. (2021). AIM-E: E-Region Auroral Ionosphere Model. *Atmosphere*, 12(6), 748. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01752-7>
- Nikolaeva V., Gordeev E., Nikolaev A., Rogov D., Troshichev O. (2022). Auroral Ionosphere Model with PC Index as an Input. *Atmosphere*, 13(3), 402.
- OMNI/OMNIWEB Data and Service. Available online: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (accessed on 12 July 2022).
- Space Weather Prediction Center of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Available online: <https://www.swpc.noaa.gov/> (accessed on 12 July 2022).
- The EISCAT incoherent scattering radar data (Madrigal Database) (<https://portal.eiscat.se/madrigal/>) (accessed on 12 July 2022).
- Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrøm S., Friis-Christensen E. (1988). Magnetic activity in the polar cap—A new index. *Planetary and space science*, 36(11), 1095-1102. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(88\)90063-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90063-3)
- Troshichev O.A. *Polar Cap Magnetic Activity (PC Index) and Space Weather Monitoring*; Editions Universitaires Europeennes: Saarbrücken, Germany, 2017; p. 140, ISBN 978-3-8381-8012-0.
- Vokhmyanin M.V., Stepanov N.A., Sergeev V.A. (2019). On the evaluation of data quality in the OMNI interplanetary magnetic field database. *Space Weather*, 17(3), 476-486.