

На правах рукописи



НИКОЛАЕВА Вера Дмитриевна

**ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ Е-СЛОЯ
АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ**

01.03.03 – Физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «ААНИИ»).

Научный руководитель:

КОТИКОВ Андрей Львович,

кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий магнитной обсерваторией «Красное озеро», старший научный сотрудник лаборатории наземных геомагнитных исследований Санкт-Петербургского филиала Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук (СПбФ ИЗМИРАН).

Научный консультант:

ГОРДЕЕВ Евгений Иванович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры физики Земли физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГУ»).

Официальные оппоненты:

КОЗЕЛОВ Борис Владимирович,

доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории магнитосферно-ионосферных связей Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический институт» (ФГБНУ «ПГИ»).

НАМГАЛАДЗЕ Александр Андреевич,

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное моделирование физических процессов в околоземной среде» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мурманский арктический государственный университет» (ФГБОУ ВО «МАГУ»).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ФГБУ «ГГО»).

Защита состоится «27» мая 2022 г. в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 на базе Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (<http://www.gaoran.ru/>).

Автореферат разослан «27» апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.120.01
кандидат физ.-мат. наук

Осипова А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертация посвящена созданию и тестированию диагностической модели E-слоя авроральной ионосферы Земли ($\varphi > 60^\circ$), применимой для расчета концентрации малых нейтральных компонент NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$, ионов N^+ , N_2^+ , NO^+ , O_2^+ , $O(^4S)$, $O(^2D)$, $O(^2P)$ и электронов N_e в режиме реального времени, позволяющей производить диагностику ее состояния в освещенных и неосвещенных условиях, при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности (в т.ч. в периоды геомагнитных бурь и суббурь).

В настоящее время большое количество научных исследований сфокусировано на космической погоде – влиянии космических факторов на техническую, промышленную, экономическую деятельность человека. Исследование, прогнозирование и диагностика космической погоды в режиме реального времени являются наиболее актуальными прикладными задачами современной физики ближнего космоса [1, 2, 3, 4, 5, 6]. При изучении солнечно-земных связей рассматривается совокупность всех возможных взаимодействий гелио- и геофизических явлений, оказывающих воздействие на магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли. Для описания состояния ионосферы широко применяются как регулярные наземные и спутниковые измерения, так и модельные расчеты ионосферных параметров.

Ионосфера условно разделяется на несколько областей, отличающихся по характеру взаимодействия с магнитосферой и околоземным пространством, составу и механизму формирования.

Первичными индикаторами космического воздействия на нашу планету являются полярные сияния, регистрируемые в авроральной зоне на высотах области E ионосферы (90–140 км). Помимо ионизации экстремальным ультрафиолетовым излучением Солнца, в высоких широтах большую роль играет эффект высыпаний энергичных электронов (1–10 кэВ) из магнитосферы, отдающих свою энергию в E-слой [7]. Корпускулярные процессы занимают особое место в ионосферно-магнитосферном взаимодействии, поскольку именно на высотах E-области

образуются ионосферные токи, связанные продольными токами с магнитосферой и ответственные за разнообразные геомагнитные вариации. Кроме того, в этом высотном интервале проводимости Холла и Педерсена достигают своего максимума. Совместная количественная оценка проводимости и величины электрического поля, позволяет проследить динамику продольных токов, что является важной задачей ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Знание системы продольных токов, их изменения во время магнитосферных возмущений и способа генерации, необходимо для понимания процессов, происходящих в магнитосфере [8, 9, А5, 10, 11].

Также, нестационарная динамика спорадических высыпаний заряженных частиц магнитосферного происхождения в Е-слое может приводить к быстрому изменению условий распространения радиоволн [12]. Диагностика и прогнозирование коротковолновых (КВ) радиотрасс в высоких широтах является сложной задачей современной геофизики, требующей модельных расчетов.

Нижняя ионосфера (области D и E) самым тесным образом связана с атмосферой Земли [13] и наряду с грозовой активностью является составной частью глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Исследования ГЭЦ позволяют устанавливать взаимосвязь космической погоды и климата [14, 15, 16]. Во время геомагнитных возмущений Е-слой авроральной ионосферы занимает важное место в структуре ГЭЦ и вносит существенный вклад в величину атмосферного электрического поля в высоких широтах [17, 18, 19]. Потенциал электрического поля в Е-слое ионосферы является верхним граничным условием при построении моделей атмосферного электричества [20].

Динамическая система электрических токов, возникающая в Е-слое во время сильных магнитосферных возмущений способна формировать паразитные индуцированные токи в протяженных технологических сооружениях на поверхности Земли: линиях связи, электрических энергосистемах и трубопроводах [21, 22, А6, 23, 24].

Для всех перечисленных выше теоретических и практических проблем, необходимо знать количественные характеристики ионосферы (такие как: величины концентраций малых нейтральных компонент, ионов и электронов), с

временным и пространственным разрешением, сопоставимыми с процессами, происходящими во время магнитосферных возмущений. Несмотря на широкое развитие математического моделирования ионосферы, на данный момент не существует модели E-слоя авроральной зоны, применимой для оценки основных ионосферных параметров в режиме реального времени [A4], и поэтому модели E-слоя авроральной ионосферы являются крайне востребованным инструментом.

Цели и задачи диссертационной работы:

Целью данной работы является создание и тестирование модели E-слоя авроральной ионосферы, применимой для расчетов основных ионосферных параметров в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *задачи*:

1. Разработка модели солнечного экстремального ультрафиолетового излучения, применимой для использования в режиме реального времени и прогностических целей.
2. Построение модели фотоионизации коротковолновым излучением Солнца.
3. Построение модели ионизации высыпаяющимися электронами.
4. Реализация численного метода для решения системы уравнений неразрывности для нейтралов NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$ и ионов N^+ , N_2^+ , NO^+ , O_2^+ , $O(^4S)$, $O(^2D)$, $O(^2P)$.
5. Апробация модели в различных геофизических условиях и сопоставление расчетов с данными наземных наблюдений.

Научная и практическая значимость

Модель AIM-E является полезным инструментом, как для научных, так и для практических целей в арктических и антарктических регионах. Модель может быть применена для решения широкого круга научных проблем, включая, различные аспекты химии ионосферы, распределения проводимости, электрических полей и токов, расчет электронной концентрации в условиях различной солнечной

и магнитосферной активности. Модель может быть использована для оценки условий распространения радиоволн, что имеет большое значение для качества связи в условиях нестабильной авроральной зоны. Также, модель AIM-E может быть включена в состав более сложных моделей космической погоды в качестве эффективного ионосферного модуля.

Научная новизна диссертационной работы определяется новыми методами исследования и оригинальными результатами, полученными впервые:

1. Создана оригинальная модель E-слоя высокоширотной ионосферы Земли учитывающая высокую изменчивость авроральной области, позволяющая рассчитывать концентрации малых нейтральных компонент NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$, ионов N^+ , N_2^+ , NO^+ , O_2^+ , $O(^4S)$, $O(^2D)$, $O(^2P)$ и электронов N_e в освещенной и неосвещенной ионосфере при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности. Модель применима в диапазоне высот от 90 до 140 км на широтах выше 60-ти градусов и позволяет проводить вычисления во всей расчетной области в режиме реального времени.

2. Создана новая эмпирическая модель спектра крайнего УФ излучения AIM-UV на основе данных спутниковых наблюдений за полный цикл солнечной активности. AIM-UV успешно интегрирована в модель высокоширотной ионосферы AIM-E, что обеспечило возможность мониторинга параметров регулярного E-слоя с хорошей точностью.

3. Геомагнитный индекс PC впервые применен в качестве входного параметра для модельных ионосферных расчетов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель E-слоя высокоширотной ионосферы Земли (AIM-E) ($\varphi > 60^\circ$), применимая для мониторинга ионосферных параметров в освещенной и неосвещенной ионосфере при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности в режиме реального времени.

2. Новая эмпирическая модель спектра крайнего УФ излучения AIM-UV. Интеграция AIM-UV в блок фотоионизации модели AIM-E позволяет рассчитывать критическую частоту регулярного слоя E с высокой точностью ($CC=0.98$).

3. Модификация модели ионосферы AIM-E с использованием геомагнитного индекса PC в качестве входного параметра, позволяющая учитывать геоэффективность солнечного ветра, и обеспечивающая более точный расчет ионосферных параметров во время геомагнитных бурь и суббурь. Модель AIM-E хорошо воспроизводит параметры спорадических слоев, обусловленных высыпаниями электронов.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на: 33-ем, 34-ом, 35-ом, 36-ом, 42-ом и 43-ем ежегодных семинарах «Физика авроральных явлений» (Апатиты, Россия, 2010, 2011, 2012, 2013, 2020, Online, 2021), General assembly of EGU (Vienna, Austria, 2014), 40th COSPAR Scientific Assembly (Москва, Россия, 2014), General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Prague, the Czech Republic, 2015), 11-ой, 12-ой и 17-ой ежегодной конференциях «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, Россия, 2016, 2017, 2022, Online), Международной конференции «Atmosphere, ionosphere, safety (AIS2020)» (Калининград, Россия, Online, 2020), «Геокосмос-2020» (Санкт-Петербург, Россия, Online, 2021).

Личный вклад автора

Все материалы, представленные в данной диссертации, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автор принимал активное участие в обработке наземных и спутниковых измерений, разработке и тестировании модели, описанной в настоящей диссертации.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 работ [A1–A6] в рецензируемых журналах, включенных в перечень научных изданий ВАК. Автор диссертации имеет еще одну публикацию в журнале, входящем в Перечень ВАК, косвенно относящуюся к теме диссертации [A7].

Список публикаций автора по теме диссертации

A1. **Nikolaeva V.**, Gordeev E., Sergienko T., Makarova L., Kotikov A. AIM-E: E-Region Auroral Ionosphere Model //Atmosphere. – 2021. – Т. 12. – №. 6. – С. 748.

A2. **Nikolaeva V. D.**, Gordeev, E. I., Rogov, D. D., Nikolaev, A. V. Auroral ionosphere model (AIM-E) adjustment for the regular E layer //Solar-Terrestrial Physics. – 2021. – Т. 7. – №. 1. – С. 41-46.

A3. Makarova L. N., Shirochkov A. V., **Nikolaeva V. D.** Dynamics of the auroral Es layer during weak and strong disturbances in the magnetosphere //Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Т. 54. – №. 6. – С. 746-749.

A4. **Nikolaeva V. D.**, Ribakov M. V., Kotikov A. L., Koshelevskiy V. K. IRI-2012 model adaptability estimation for automated processing of vertical sounding ionograms //Journal Scientific and Technical Of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2014. – Т. 89. – №. 1. – С. 82-86.

A5. **Nikolaeva V. D.**, Kotikov A. L., Sergienko T. I. Dynamics of field-aligned currents reconstructed by the ground-based and satellite data //Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Т. 54. – №. 5. – С. 549-557.

A6. Shirochkov A. V., Makarova L. N., **Nikolaeva V. D.**, Kotikov A. L., The storm of March 1989 revisited: A fresh look at the event //Advances in Space Research. – 2015. – Т. 55. – №. 1. – С. 211-219.

A7. Франк-Каменецкий А.В., **Николаева В.Д.**, Степанов Н.А., Калишин А.С. Корректировка шкал локальных К-индексов для высокоширотных магнитных станций //Проблемы Арктики и Антарктики. – 2021. – Т. 67. – №. 1. – С. 89-99.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 2 глав, и заключения. Полный объем диссертации составляет 100 страниц с 24-мя рисунками и 11-ю таблицами. Список литературы содержит 161 наименование, включая 6 [А1–А6] публикаций автора по теме диссертации в реферируемых журналах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1 описывает основную структуру и краткое содержание основных блоков модели AIM-E. В ней представлена общая схема модели и приведены входные параметры модели AIM-E, а также величины, которые по ней можно рассчитать (Табл.1).

Таблица 1

Входные, выходные и автоматически рассчитываемые
параметры модели AIM-E

Входные параметры модели AIM-E:	Автоматически рассчитываемые параметры:	Выходные параметры модели AIM-E:
Дата и время	Параметры нейтральной атмосферы: модель NRLMSISE-00	Концентрация ионов: N^+ , N_2^+ , NO^+ , O_2^+ , $O^+(^4S)$, $O^+(^2D)$, $O^+(^2P)$
Географические Координаты	Спектр высыпающих электронов: спутниковые данные или модель OVATION-Prime	Концентрация электронов N_e , Критическая частота E-слоя f_oE
Высота	Солнечное КУФ излучение: спутниковые данные или модель AIM-UV	Концентрация малых нейтральных компонент: NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$
		Высота максимума E-слоя

Раздел 1.1 посвящен описанию блока расчета скорости фотоионизации в E-слое ионосферы крайним ультрафиолетовым излучением Солнца (5–121.6 нм), которое является основным источником ионообразования в дневное время в интервале высот от 90 до 140 км.

В разделе рассматривается расчет концентрации нейтральных компонент. Также приводятся сечения поглощения (σ^a) и ионизации (σ^i) нейтралов O , N , O_2 , N_2 , NO и вероятности ионизации в электронные состояния ионов атомарного кислорода $O^+(^4S)$, $O^+(^2D)$, $O^+(^2P)$. Описывается расчет функции Чепмена, характеризующей высотную зависимость ослабления потока фотонов за счет поглощения при прохождении атмосферы Земли [25, 26]. В модели AIM-E реализован расчет функции Чепмена для зенитных углов вплоть до 103° , что существенно для авральной ионосферы.

Модель AIM-E предназначена для круглосуточного и круглогодичного мониторинга ионосферных параметров. В связи с этим расчет солнечного

излучения требует детальной проработки. В модели ионосферы AIM-E реализованы два различных способа получения потока фотонов на верхней границе атмосферы: (1) расчет потока фотонов с использованием индексов солнечной активности по эмпирической модели и (2) с использованием прямых спутниковых измерений в различных каналах крайнего ультрафиолетового излучения.

Показана возможность применения данных спутника TIMED SEE level 3A [27] в качестве источника фотоионизации. Прямые измерения энергетического спектра фотонов, обеспечиваемые космическими аппаратами TIMED каждые 97 минут, могут использоваться для исследования ионосферных эффектов от экстремальных явлений космической погоды, например, во время солнечных вспышек.

Произведена оценка применимости модели EUVAC для расчета спектра солнечного крайнего УФ излучения в ходе которой было выполнено сопоставление модельных значений потока фотонов с измерениями спутника TIMED (I_T). Показано, что по модели EUVAC происходит систематическая недооценка потока фотонов примерно на 40% [A2] и модель EUVAC не может быть использована для аэрономических расчетов в существующем виде и требует дополнительной корректировки. Существенным минусом модели EUVAC также является невозможность производить расчеты в режиме реального времени или прогноза из-за особенностей входных параметров.

Создана новая эмпирическая модель крайнего ультрафиолетового излучения Солнца AIM-UV. Был использован большой объем данных спутника TIMED SEE, с 2002 по 2019 гг. с временным разрешением 1.5 часа и разрешением по длине волны 1 нм. Распределение величины потока фотонов I_T от величины радиоизлучения на длине волны 10.7 см могут быть описаны регрессионными уравнениями второго порядка $I_T = P_1 \cdot F_{10.7}^2 + P_2 \cdot F_{10.7} + P_3$. В Разделе 1.1.7 приведены регрессионные коэффициенты P_1 , P_2 и P_3 , а также значение коэффициента корреляции (CC) между I_T и индексом $F_{10.7}$ и величина среднеквадратического отклонения (σ) данных TIMED для каждого интервала спектра.

Приведенные в Разделе 1.1.7 коэффициенты использованы для создания эмпирической модели AIM-UV. Ее применение при расчете фотоионизации в

модели АИМ-Е позволяет обеспечить высокую точность расчетов для оперативной оценки параметров регулярного слоя Е с использованием суточного индекса $F_{10.7}$ в качестве входного параметра. Также ввиду того, что временной ряд измерений суточного радиопотока $F_{10.7}$ доступен непрерывно с 1947 года (в течение семи солнечных циклов), данный режим модели АИМ-Е может быть использован при проведении климатических исследований ионосферы.

Раздел 1.2 посвящен расчету скорости корпускулярной ионизации в модели АИМ-Е. В авроральной зоне структуру ионосферы и динамику протекающих в ней процессов определяет не только коротковолновое излучение Солнца, но и потоки высыпающихся частиц магнитосферного происхождения. В ночное время корпускулярные потоки являются основным источником ионизации в Е-слое. В возмущенные периоды, такие как магнитосферные бури и суббури, величина электронной концентрации, связанная с высыпающимися электронами, может на несколько порядков превышать количество электронов образовавшихся за счет процессов фотоионизации. Скорости образования ионов при ионизации атмосферных нейтралов авроральными электронами рассчитываются с использованием подхода, описанного в работе [28].

Показана возможность задания источника корпускулярной ионизации в модели АИМ-Е по измерениям потока электронов на низкоорбитальных спутниках и по расчетам эмпирической модели OVATION-Prime.

Обосновано использование геомагнитного индекса PC [29] в качестве входного параметра в эмпирическую модель высыпаний OVATION-Prime [30] при проведении ионосферных расчетов. Показано, что во время сильных магнитных возмущений и усиления электрического поля в межпланетной среде ($PC > 2$ мВ/м), интенсивность высыпания частиц из магнитосферы в Е область высокоширотной ионосферы может быть характеризована величиной геомагнитного индекса PC. Также, во время слабых магнитных возмущений ($PC < 2$ мВ/м), кратковременные импульсы увеличения значения PC-индекса, вызванные изменчивостью электрического поля в магнитосфере являются основным индикатором появления спорадических слоев E_s [A3].

Раздел 1.3 посвящен разработке модуля аэрономических расчетов, системе уравнений неразрывности и математическому методу ее решения [A1]. Были составлены уравнения неразрывности для 7-ми видов ионов и 3-х малых нейтральных компонент с учетом 39 ионно-химических реакций, также приведенных в данном разделе. Эти 10 уравнений сводятся в одну систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Скорости химических реакций, которые входят в систему уравнений в качестве коэффициентов, различаются более чем на 10 порядков величины. Такие системы ОДУ называются жесткими и требуют использования специальных математических методов. В данной работе используется метод Гира 4-го порядка точности [31; 32], который представляет собой линейный неявный многошаговый метод типа «предиктор-корректор». Особенностью и достоинством этого метода является возможность подстройки размера шага численного интегрирования с учетом скорости изменения решения системы в данный момент времени. Для определения точности метода, реализованного для решения системы ОДУ, и определения преимуществ, связанных с необходимыми вычислительными ресурсами, проведено два вида сопоставления: а) решение жесткой системы ОДУ химической кинетики и сравнение результатов с известным решением; б) сравнение эволюции решений с решениями, полученными другими методами.

В **Главе 2** проведено тестирование модели AIM-E и рассмотрены четыре примера использования модели для различных геомагнитных условий с использованием различных входных параметров.

В **Разделе 2.1** проведен анализ возможности использования модели для расчетов и мониторинга параметров регулярного слоя E. Было проведено сопоставление результатов моделирования с данными вертикального зондирования всех действующих российских арктических станций ААНИИ. В обработку вошло 1932 ионограммы вертикального зондирования, из которых было получено 1364 значения критической частоты регулярного E-слоя. Для каждой станции и момента наблюдений по AIM-E были рассчитаны высотные профили электронной концентрации в диапазоне высот 90–140 км с шагом 1 км с использованием модели крайнего УФ AIM-UV.

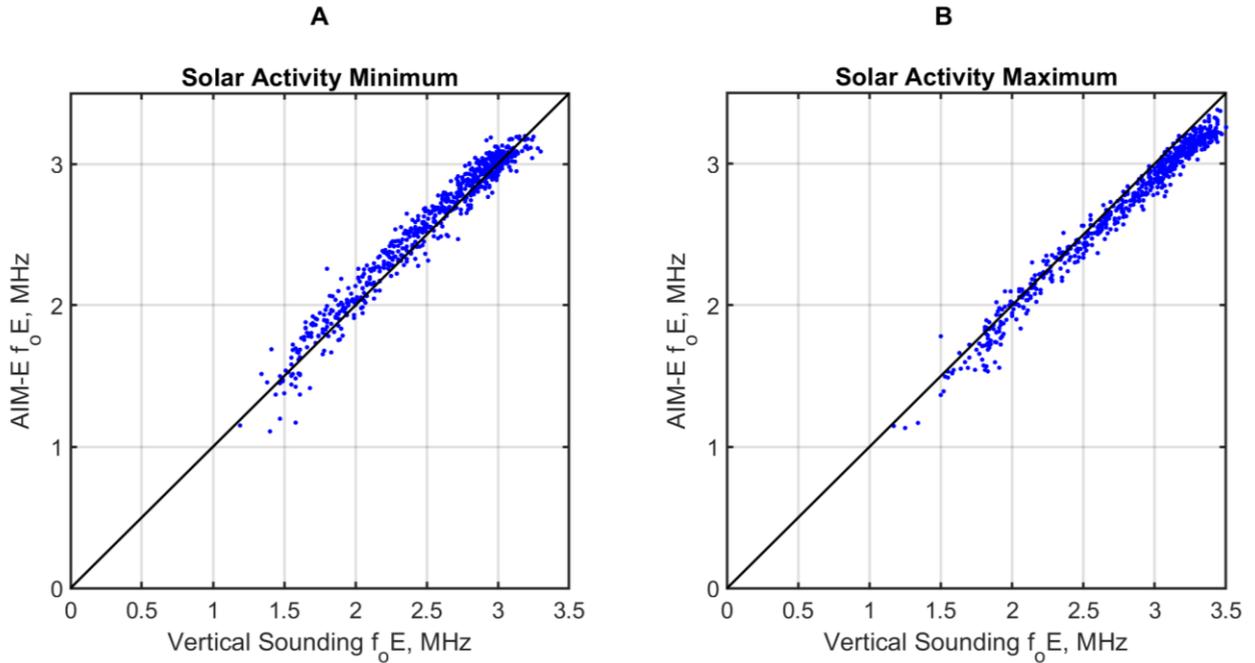


Рис. 1. Сравнение данных вертикального зондирования и результатов модели AIM-E с использованием эмпирических закономерностей, полученных по данным спутника TIMED (AIM-UV). А – минимум солнечной активности, В – максимум солнечной активности. Черная линия соответствует прямой $y=x$.

Сопоставление критических частот, измеренных на арктических станциях вертикального зондирования и результатов модели AIM-E с использованием эмпирических закономерностей по данным спутника TIMED (AIM-UV) для минимума (Рис. 1 А) и максимума (Рис. 1 В) солнечной активности показало, что модель позволяет производить расчеты параметров регулярного слоя с высокой точностью: коэффициент корреляции между данными вертикального зондирования и модельными значениями для минимума солнечной активности составляет $CC_{min}=0,98$, а для максимума $CC_{max}=0,99$.

В Разделе 2.2 представлен расчет высотных профилей электронной концентрации вдоль траектории спутника REIMEI [33] в период интенсивных высыпания электронов 5 декабря 2007 г. [A1]. При пересечении овала полярных сияний REIMEI пролетал над радаром EISCAT [34] в 0:36:36 UT, что позволило количественно оценить точность расчетов модели AIM-E (отклонение расчетной электронной концентрации от измеренной радаром не превышает 10%).

Раздел 2.3 демонстрирует возможность проведения расчетов электронной концентрации во всей авроральной зоне с использованием разработанной модели AIM-UV и модели высыпаний OVATION-Prime с данными солнечного ветра в качестве входного параметра. Представлены карты распределения величины электронной концентрации в максимуме E-слоя для двух моментов времени. Первый момент (5:00 UT, 17 марта 2013 г.) соответствует спокойным геомагнитным условиям, а второй (17:00 UT, 17 марта 2013 г.) – главной фазе геомагнитной бури с понижением индекса SYM-H до -130 нТл и возрастанием AE-индекса до ≈ 2700 нТл. Показано, что модель AIM-E позволяет получить пространственное распределение ионосферных параметров во всей авроральной зоне в различных геомагнитных условиях. Использование эмпирической модели OVATION-Prime, основанной на среднечасовых значениях параметров солнечного ветра, позволят оценить динамику распределения ионосферных параметров E-слоя авроральной ионосферы на временных масштабах геомагнитной бури (часы и дни) [A1].

В **Разделе 2.4** представлено сопоставление расчетов по AIM-E+OVATION-Prime (PC) с данными радара некогерентного рассеяния EISCAT и моделью STIRe [35].

Для оценки применимости расчетов модели AIM-E с OVATION-Prime (PC) в возмущенных геомагнитных условиях, проведено сопоставление расчетов электронной концентрации с данными радара некогерентного рассеяния EISCAT во время возмущенных геомагнитных условий 18 января 2007 г., 18:30–23:00 UT. Данный временной интервал включает две суббури (Рис. 2 А).

Дифференциальные потоки электронов были восстановлены с использованием величин потока и средней энергии, полученных по модели OVATION-Prime (PC) с учетом диффузных и моноэнергетических высыпаний. Временной ход восстановленного дифференциального потока электронов в диапазоне энергий от 300 эВ до 10 кэВ, который был использован при дальнейшем моделировании AIM-E, показан на рисунке 2 В.

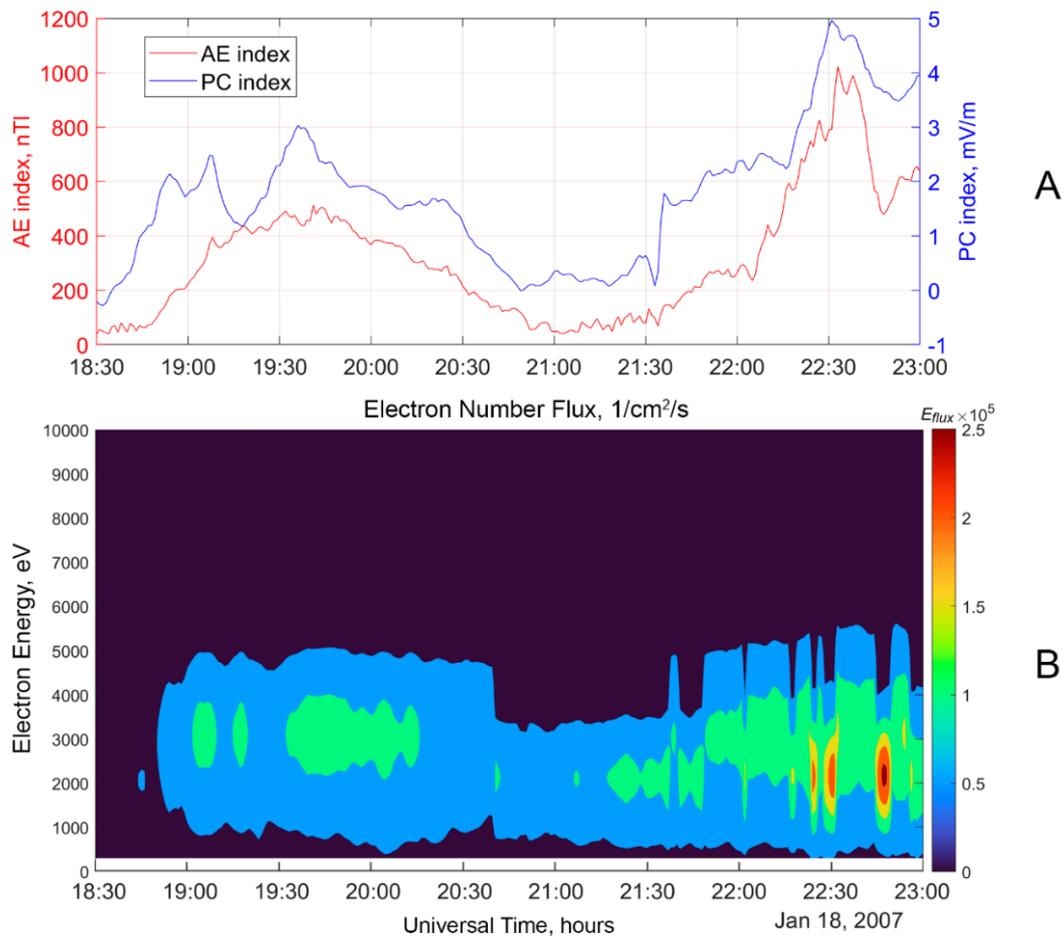


Рис. 2. А — изменение геомагнитных индексов PC (синий цвет) и AE (красный цвет); Б — Дифференциальный поток частиц для диффузных и моноэнергетических высыпаний электронов (300 эВ—10 кэВ), восстановленный по данным OVATION-Prime (PC) за 18 января 2007 г., 18:30—23:00 UT для координат радара EISCAT, Тромсе.

Расчеты AIM-E (PC) проводились для координат радара некогерентного рассеяния EISCAT, г. Тромсё ($69^{\circ} 35'$ с.ш., $19^{\circ} 13'$ в.д.) в диапазоне высот 96—140 км с шагом по высоте 1 км и временным разрешением 1 мин (Рис. 3 В). На Рис. 3 А показана эволюция электронной концентрации в диапазоне высот 96–140 км, измеренная радаром некогерентного рассеяния UHF EISCAT. Временные интервалы повышенной концентрации электронов, наблюдаемые радаром и полученные с помощью AIM-E (PC), хорошо совпадают. Также в обоих случаях (реальные измерения и модель) наблюдается увеличение электронной концентрации от фоновых значений ($1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$) до примерно $3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в периоды суббурь.

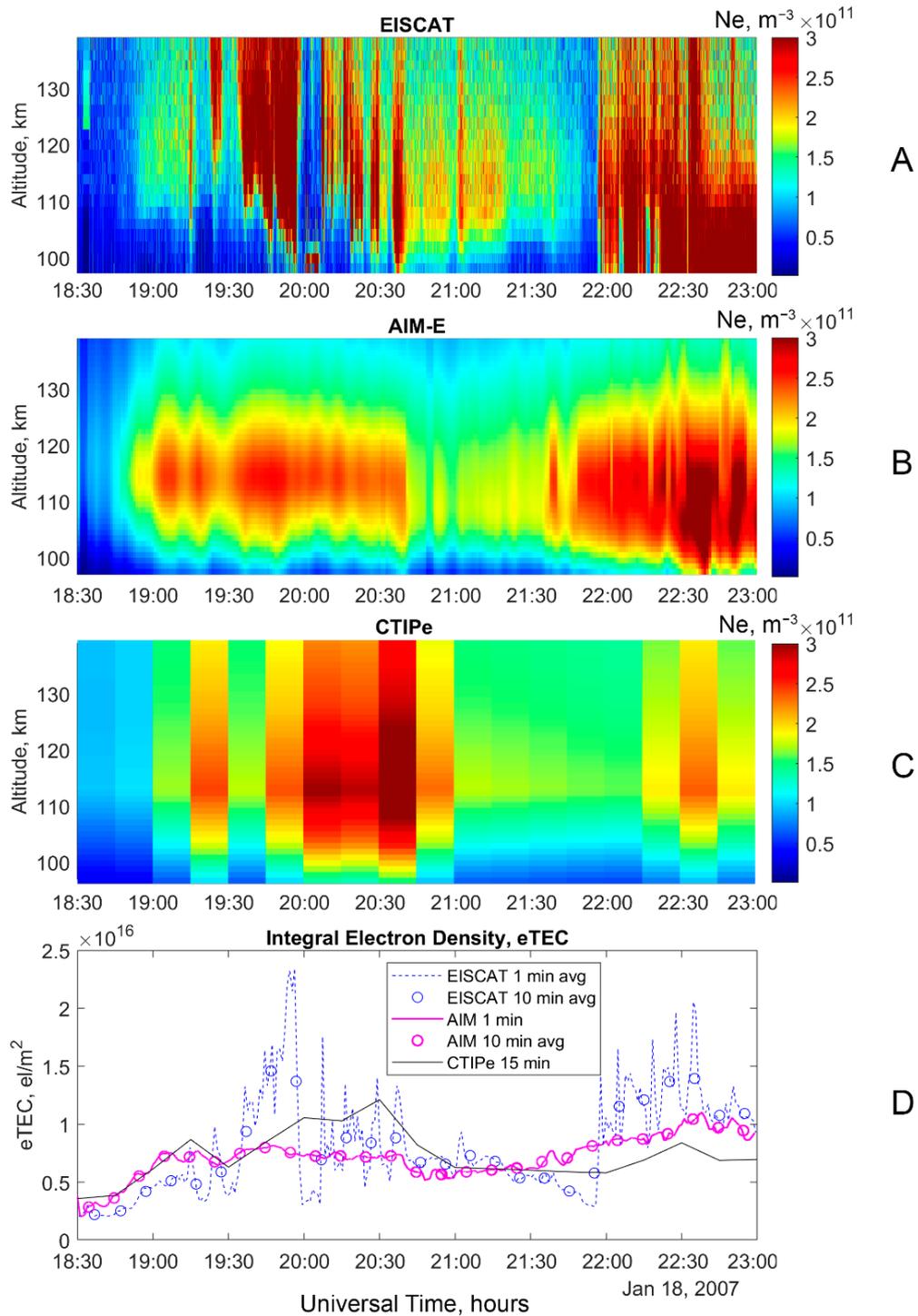


Рис. 3. Изменение вертикального распределения концентрации электронов в диапазоне высот 96–140 км для события 18 января 2007 г., 18:30–23:00 UT, измеренное радаром некогерентного рассеяния EISCAT (A) и рассчитанное по моделям AIM-E (B) и CTIPe (C). На панели D показано интегральное значение электронного содержания слоя E (eTEC), рассчитанное в вертикальном столбе в диапазоне высот 96–140 км для радара некогерентного рассеяния EISCAT (синяя линия — средние значения за 1 мин наблюдений; синие кружки — средние значения за 10 мин наблюдений), модели AIM-E (розовая линия — минутные значения; розовые кружки — 10-минутные средние значения) и для модели CTIPe 15-минутные результаты (черная линия).

Чтобы сравнить модель и данные радара некогерентного рассеяния было рассчитано интегральное содержание электронов в интервале высот 96–140 км (далее eTEC) (Рис. 3 D). Коэффициент корреляции между минутными значениями eTEC по модели AIM-E (PC) и EISCAT составляет $CC_{1min}=0.63$. При 10-минутном осреднении коэффициент корреляции увеличивается до $CC_{10min}=0.78$, что является хорошим результатом для локальных расчетов в авроральной зоне в период суббури. Показано, что моделирование электронной концентрации ионосферы по модели AIM-E (PC) позволяет оценить «фоновое» электронное содержание слоя E, в то время как тонкая структура возмущенного овала, измеренная радаром EISCAT (Рис. 3 A), не может быть воспроизведена в подобном «климатическом» режиме проведения расчетов.

Для понимания возможностей AIM-E (PC) по сравнению с другими моделями высокоширотной ионосферы было проведено моделирование события, описанного выше (18 января 2007 г., 18:30–23:00 UT), с использованием модели ионосферы STIRe (Рис. 3 C), доступной для расчетов по заказу на сайте Community Coordinated Modeling Center (CCMC) [36].

Модель STIRe с 15-минутными входными параметрами солнечного ветра, а также модель AIM-E (PC) достаточно хорошо качественно и количественно описывают динамику ионосферы в месте расположения EISCAT. Модель STIRe лучше воспроизводит вертикальную структуру электронной концентрации области E для первой суббури. Однако для второго возмущенного интервала (после 22:00 UT) расчеты модели AIM-E (PC) лучше согласуются с данными EISCAT. Это также подтверждается вариацией интегральной электронной концентрации, показанной на Рис. 3 D. Однако для первой суббури максимум электронной концентрации по модели STIRe наблюдается с 20:00 до 20:45, а по данным EISCAT и модели AIM-E наблюдается рост N_e во временном интервале с 19:30 до 20:00. Лучшее таймирование в модели AIM-E обеспечивается за счет использования наземного индекса PC (вместо функции Ньюэлла, основанной на измерениях солнечного ветра), который немедленно реагирует на проникновение энергии солнечного ветра в ионосферу.

В **Разделе 2.5** показана применимость модели AIM-E при наличии различных типов спорадических слоев в авроральной зоне. Была рассмотрена изолированная суббуря, произошедшая между 23:00 UT 19 мая и 04:00 UT 20 мая 2019 года. В ходе этой суббури, по данным вертикального зондирования было зафиксировано наличие плоского слоя типа f и толстого спорадического слоя типа g на ст. Горьковская (GRK), Ловозеро (LOZ) и в центральной точке радиотрассы Горьковская–Ловозеро (GRK–LOZ).

В модели AIM-E не учитываются эффекты дрейфа частиц, поскольку предполагается, что эффекты переноса пренебрежимо малы для ионосферы в E-области высоких широт [37]. Модель хорошо воспроизводит только появление спорадических слоев обусловленных высыпаниями электронов. Однако проведенный анализ показывает, что для подробного описания формирования спорадических слоев различных типов необходимо учитывать такие процессы как перенос нейтральным ветром и дрейф за счет электрического поля, а также наличие металлических ионов в высокоширотном E-слое. Данные работы планируется провести при дальнейшей разработке модели AIM-E.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создана численная модель E-слоя высокоширотной ионосферы Земли (включая сильно изменчивую авроральную область) AIM-E, применимая для расчета концентрации малых нейтральных компонент NO , $N(^4S)$, $N(^2D)$, ионов N^+ , N_2^+ , NO^+ , O_2^+ , $O(^4S)$, $O(^2D)$, $O(^2P)$ и электронов N_e с учетом их взаимодействий в 39 химических реакциях. Реализовано численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) для малых нейтральных компонент и ионов с использованием высокопроизводительного метода Гира. Модель применима в диапазоне высот от 90 до 140 км на широтах выше 60° .

2. В модель включены блоки фото- и корпускулярной ионизации, что позволяет производить диагностику состояния E-слоя освещенной и неосвещенной высокоширотной ионосферы при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности. В операционном режиме входные параметры модели – спектры экстремального УФ и высыпающихся электронов – могут быть альтернативно заданы как эмпирическими зависимостями, так и прямыми спутниковыми измерениями. Все блоки модели высокоширотной ионосферы AIM-E объединены общим интерфейсом, что обеспечивает простое и быстрое управление моделью.

3. Используя данные спутниковых наблюдений за полный солнечный цикл, разработана новая эмпирическая модель спектра экстремального УФ излучения AIM-UV, и успешно интегрирована в модель ионосферы AIM-E.

4. Режим расчетов AIM-E с интеграцией эмпирической модели высыпаний электронов OVATION-Prime позволяет осуществлять постоянный мониторинг E-слоя всей авроральной ионосферы в реальном времени.

5. Протестировано использование PC-индекса в качестве входного параметра в эмпирическую модель высыпаний электронов OVATION-Prime для ионосферных расчетов. Использование PC-индекса позволяет учитывать геоэффективность солнечного ветра, и обеспечивает более точный тайминг изменения электронной концентрации, что особенно важно в периоды геомагнитных бурь и суббурь. Показано, что модель AIM-E (PC) может быть успешно использована для определения электронной концентрации в авроральных широтах.

6. Сопоставление критических частот регулярного E-слоя в российском секторе Арктики, полученных на станциях вертикального зондирования и рассчитанных по AIM-E, показало высокую точность модельных расчетов ($CC=0.98$). Используя прогноз индекса солнечного излучения $F_{10.7}$, модель AIM-E может быть использована для осуществления прогноза параметров регулярного слоя E в высоких широтах.

7. Произведена апробация модели AIM-E в условиях интенсивных высыпаний электронов с использованием спектров энергии электронов, измеренных низкоорбитальным спутником REIMEI. Сопоставление расчетного вертикального профиля электронной концентрации с измеренным радаром некогерентного рассеяния EISCAT, показывает хорошую точность модельных расчетов (отклонение в пределах 10%).

8. Сопоставление расчетов модели AIM-E с данными вертикального зондирования ионосферы показало, что модель хорошо воспроизводит появление спорадических слоев обусловленных высыпаниями электронов. Как и предполагалось, модель не может воспроизводить другие типы спорадических слоев. Для более полного описания процессов, происходящих в авроральной ионосфере Земли, необходимо включить в модель физику, учитывающую процессы переноса частиц.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwenn R. Space weather: The solar perspective //Living Reviews in Solar Physics. – 2006. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-72.
2. Pulkkinen A. et al. Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness //Space Weather. – 2017. – Т. 15. – №. 7. – С. 828-856.
3. Pulkkinen T. Space weather: terrestrial perspective //Living Reviews in Solar Physics. – 2007. – Т. 4. – №. 1. – С. 1-60.
4. Vorobev A. V. et al. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the " virtual globe" technology //Russian Journal of Earth Sciences. – 2020. – Т. 20. – №. 6.
5. Machol J. L. et al. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae //Space Weather. – 2012. – Т. 10. – №. 3.
6. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/> (дата обращения 14 февраля 2022 г.).
7. Иванов В. Е., Козелов Б. В. Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли //Кольский научный центр. Апатиты. – 2001.
8. Amm O. Ionospheric elementary current systems in spherical coordinates and their application //Journal of geomagnetism and geoelectricity. – 1997. – Т. 49. – №. 7. – С. 947-955.
9. Kotikov A. L., Latov Y. A., Troshichev O. A. Structure of auroral electrojets by the data from a meridional chain of magnetic stations //Geophysica. – 1987. – Т. 23. – №. 2. – С. 143-154.
10. Weygand J. M. et al. Application and validation of the spherical elementary currents systems technique for deriving ionospheric equivalent currents with the North American and Greenland ground magnetometer arrays //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2011. – Т. 116. – №. A3.
11. Evdokimova M. A., Petrukovich A. A. Estimation of the westward auroral electrojet current using sparse magnetometer chain data //Annales Geophysicae. – Copernicus GmbH, 2020. – Т. 38. – №. 1. – С. 109-121.
12. Blagoveshchensky D. V., Sergeeva M. A., Vystavnoi V. M. Effects of substorms during HF propagation in the auroral oval //Geomagnetism and Aeronomy. – 2006. – Т. 46. – №. 2. – С. 166-172.
13. Palmroth M. et al. Lower-thermosphere–ionosphere (LTI) quantities: current status of measuring techniques and models //Annales Geophysicae. – Copernicus GmbH, 2021. – Т. 39. – №. 1. – С. 189-237.
14. Mareev E. A., Volodin E. M. Variation of the global electric circuit and ionospheric potential in a general circulation model //Geophysical Research Letters. – 2014. – Т. 41. – №. 24. – С. 9009-9016.
15. Denisenko V. V., Rycroft M. J., Harrison R. G. Mathematical simulation of the ionospheric electric field as a part of the global electric circuit //Surveys in Geophysics. – 2019. – Т. 40. – №. 1. – С. 1-35.

16. Rycroft M. J. et al. Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere //Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2012. – Т. 90. – С. 198-211.
17. Франк-Каменецкий А. В. и др. Вариации приземного электрического поля в высоких широтах и потенциал ионосферы во время магнитных возмущений //Геомагнетизм и аэронавигация. – 2012. – Т. 52. – №. 5. – С. 666-675.
18. Frank-Kamenetsky A. V. et al. Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to the interplanetary magnetic field //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2001. – Т. 106. – №. A1. – С. 179-190.
19. Corney R. C. et al. The influence of polar-cap convection on the geoelectric field at Vostok, Antarctica //Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2003. – Т. 65. – №. 3. – С. 345-354.
20. Морозов В. Н., Трошичев О. А. Моделирование вариаций полярного атмосферного электрического поля в полярной атмосфере, связанного с магнитосферными продольными токами //Геомагнетизм и аэронавигация. – 2008. – Т. 48. – №. 6. – С. 759-769.
21. Pilipenko V. Space weather impact on ground-based technological systems //Solar-Terrestrial Physics. – 2021. – Т. 7. – №. 3. – С. 68-104.
22. Belakhovsky V. et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines //Journal of Space Weather and Space Climate. – 2019. – Т. 9. – С. A18.
23. Lakhina G. S., Tsurutani B. T. Geomagnetic storms: historical perspective to modern view //Geoscience Letters. – 2016. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-11.
24. Pirjola R. et al. Prediction of geomagnetically induced currents in power transmission systems //Advances in Space Research. – 2000. – Т. 26. – №. 1. – С. 5-14.
25. Chapman S. The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth //Proceedings of the Physical Society (1926-1948). – 1931. – Т. 43. – №. 1. – С. 26
26. Hart, J. F., Computer Approximations, p. 136, John Wiley, New York, 1968
27. Woodraska D. L., Woods T. N., Eparvier F. G. In-flight calibration and performance of the Solar Extreme ultraviolet Experiment (SEE) aboard the TIMED Satellite //Instruments, Science, and Methods for Geospace and Planetary Remote Sensing. – International Society for Optics and Photonics, 2004. – Т. 5660. – С. 36-47.
28. Sergienko T. I., Ivanov V. E. A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact //Annales Geophysicae. – 1993. – Т. 11. – №. 8. – С. 717-727.
29. Troshichev O. A. et al. Magnetic activity in the polar cap—A new index //Planetary and space science. – 1988. – Т. 36. – №. 11. – С. 1095-1102.

30. Newell P. T., Sotirelis T., Wing S. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2010. – Т. 115. – №. A3.
31. Gear C. W. Numerical initial value problems in ordinary differential equations //Prentice-Hall series in automatic computation. – 1971.
32. Radhakrishnan K., Hindmarsh A. C. Description and Use of LSODE //National Aeronautics and Space Administration, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-ID-113855 Lewis Research Center, Cleveland, OH. – 1993.
33. Saito H. et al. Small satellite REIMEI for auroral observations //Acta Astronautica. – 2011. – Т. 69. – №. 7-8. – С. 499-513.
34. URL: <http://portal.eiscat.se/madrigal/> (дата обращения 14 февраля 2022 г.).
35. Codrescu M. V. et al. Validation of the coupled thermosphere ionosphere plasmasphere electrodynamics model: CTIPE-mass spectrometer incoherent scatter temperature comparison //Space Weather. – 2008. – Т. 6. – №. 9.
36. URL: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/requests/requests.php> (дата обращения 14 февраля 2022 г.).
37. Strobel D. F. Physics and chemistry of the E region: A review //Radio Science. – 1974. – Т. 9. – №. 2. – С. 159-165.