

КАЛИНИНГРАДСКИЙ ФИЛИАЛ
ИНСТИТУТА ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ, И
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ИМ. Н.В. ПУШКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Клименко Максим Владимирович

**Морфология и интерпретация пространственно-временных вариаций
ионосферных параметров в спокойных условиях и во время
возмущений различной природы**

Научная специальность

1.6.18. Науки об атмосфере и климате

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Калининград
2022

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Ионосфера Земли представляет собой плазменную оболочку нашей планеты и является средой, в которой осуществляется распространение радиоволн. Пространственно-временное распределение различных параметров околоземного космического пространства (концентрации, скорости движения и температуры нейтральных и заряженных частиц), в особенности, электронной концентрации, оказывает существенное влияние на условия прохождения радиосигналов через ионосферу. Таким образом, ионосфера Земли оказывает влияние на работу систем связи космических, воздушных и морских судов, загоризонтной радиолокации и глобальных навигационных систем (включая российскую систему спутникового позиционирования ГЛОНАСС), Существующие в настоящее время эмпирические и численные физико-математические модели ионосферы, используемые в качестве моделей среды при решении задач распространения радиоволн, недостаточно точно описывают необходимые для этого параметры среды, особенно, в периоды различных магнитосферных (геомагнитные бури и суббури) и атмосферных возмущений. Это относится и к наиболее часто используемой международной справочной модели ионосферы IRI (International Reference Ionosphere). Увеличение темпов развития программ по освоению Арктики, наметившийся рост в использовании высоких широт для перевозки пассажиров воздушным транспортом, и напряженная внешнеполитическая ситуация делают надежность КВ-радиосвязи и радиофизических систем противовоздушной обороны одной из наиболее важных проблем. Для обеспечения надежной и непрерывной радиосвязи необходимо решить задачу описания поведения параметров среды в конкретных гелио-геофизических условиях и в конкретных регионах. На практике необходимо предвидеть те, иногда катастрофические, изменения параметров ионосферы, которые происходят в периоды возмущений и приводят к нарушению, а иногда и к полному исчезновению радиосвязи. Поэтому исследования ионосферных эффектов во время геомагнитных бурь и атмосферных возмущений представляют собой актуальную научную и прикладную задачу современной физики ионосферной плазмы. Исследование солнечно-земных связей и влияния процессов в нижней (на высотах от поверхности Земли до 10–30 км) и средней (на высотах от 30 до 80 км) атмосфере на поведение параметров верхней атмосферы (на высотах от 80 до ~1000 км) являются неотъемлемой частью бурно развивающегося в настоящее время но-

вого направления прикладной науки – космической погоды, направленного на изучение и мониторинг состояния межпланетного и околоземного космического пространства.

Целью диссертационной работы является исследование методами математического моделирования с последующей интерпретацией пространственно-временных особенностей распределения электронной концентрации в F-области и внешней ионосфере Земли в спокойных условиях и в периоды различных явлений космической погоды и драматических вариаций параметров средней атмосферы.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Модификация ранее разработанного соискателем модуля расчета электрических полей в Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) посредством использования различных способов задания входных параметров модели в виде продольных токов и/или разности потенциалов через полярные шапки применительно к описанию различных рассматриваемых явлений.

2. Разработка и апробация постановки задачи моделирования термосферно-ионосферного отклика на геомагнитные возмущения (геомагнитные суббури и бури) на основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП).

3. Создание при непосредственном участии соискателя глобальных, региональных и локальных эмпирических моделей ионосферы, пригодных для выявления и дальнейшей интерпретации механизмов формирования основных особенностей распределения электронной концентрации в F-области ионосферы.

4. Осуществление проверки и модификации научных представлений о термосферно-ионосферном отклике на геомагнитные бури и выявление закономерностей в поведении параметров системы термосфера-ионосфера после окончания геомагнитной бури.

5. Объединение моделей средней и верхней атмосферы при непосредственном участии соискателя, и как итог, создание модели всей атмосферы. Проведение модельных исследований атмосферно-ионосферного взаимодействия в периоды внезапных стратосферных потеплений и солнечных протонных событий.

6. Проведение исследования роли электрических полей и термосферного ветра в процессе формирования дополнительных слоев в экваториальной ионосфере.

Практическая значимость

Пространственно-временные распределения ионосферных параметров, полученные по результатам расчетов на модифицированной модели ГСМ ТИП, в дальнейшем могут быть использованы и уже неоднократно использовались в качестве описания среды при решении задач о распространении радиоволн и торможении низколетящих спутников в периоды различного рода возмущений. Такое совместное использование моделей среды и моделей расчета КВ радиотрасс и лучевых траекторий позволит создать комплекс программ для оперативной оценки оптимальных частотных и угловых характеристик лучевых траекторий, необходимых для осуществления эффективной радиосвязи и радиолокации в различных регионах России и мира.

Современное состояние исследований

Качество любой эмпирической модели зависит как от качества и объема экспериментального материала, так и от подхода к построению эмпирических зависимостей одних наблюдаемых параметров от других. Основной проблемой при построении глобальной эмпирической модели любого параметра верхней атмосферы в большей или меньшей степени является недостаточный объем данных наблюдений. Эмпирическая справочная модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere – Международная справочная модель ионосферы) [1, 2] описывает климатическое состояние ионосферы и успешно используется при решении научных и прикладных задач на протяжении более 50 лет. Исследования показывают, что модель IRI в среднем дает хорошие результаты по воспроизведению ионосферных параметров в спокойных условиях на средних широтах. Опции URSI и CCIR модели IRI, предназначенные для расчета параметров максимума F2-слоя, основаны, главным образом, на данных наблюдений станций наземного зондирования ионосферы и на ограниченном объеме спутниковых данных [3, 4]. Наиболее значимые последние модификации модели IRI, как и основанных на ней моделей, описывают поведение высоты максимума F2-слоя и электронной плотности в E-области высокоширотной ионосферы [5; 6]. Также ведутся разработки эмпирических моделей широтно-долготного распределения электронной концентрации в высокоширотном регионе, включающем область главного ионосферного провала, который не самым лучшим образом представлен в модели IRI [7, 8]. Важно отметить, что существующие в настоящее время эмпирические модели средней и верхней атмосферы, которые используются в качестве моделей среды при решении различных прикладных задач, являются климати-

ческими и недостаточно точно описывают параметры среды в периоды различных геосферных, атмосферных, метеорологических и магнитосферных возмущений [9; 10]. В связи с этим, создание и модификация гибридных и взаимосвязанных самосогласованных моделей верхней атмосферы является актуальным и приоритетным прикладным и научным направлением в области космической погоды.

Гибридные (ассимиляционные) модели верхней атмосферы можно разделить на два класса, первый из которых основан на эмпирических моделях, тогда как в основе второго лежат теоретические модели. Так, например, в модели IRTAM используются данные сети станций вертикального зондирования ионосферы, предоставляемые GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory) [11], и техника нелинейной компенсации ошибок для корректировки коэффициентов CCIR модели IRI [12]. Таким образом, IRTAM, используя преимущества эмпирической модели IRI, позволяет перейти от описания F-области ионосферы в терминах космического климата к ее описанию в терминах космической погоды. Существуют также ассимиляционные процедуры, использующие модель IRI и данные абсолютных значений полного электронного содержания (ПЭС) [13]. Эти процедуры требуют тщательного тестирования. Следует учитывать, что массивы данных, по которым можно осуществлять корректировку моделей в реальном времени, достаточно ограничены и непостоянны. Именно поэтому развитие и создание численных моделей околоземного пространства до сих пор является важной научной и прикладной задачей.

В настоящее время существует целый ряд численных моделей ионосферы, разработанных в нашей стране [14-17], и за рубежом [18-20]. Во всех этих моделях такие характеристики околоземной среды, как проводимость ионосферы, электрическое поле, состав, тепловой режим и динамика нейтральной атмосферы являются входными параметрами, то есть задаются на основании различных эмпирических моделей. В отличие от упомянутых выше моделей ионосферы, в таких моделях, как ГСМ ТИП (Глобальная Самосогласованная Модель Термосферы, Ионосферы и Протоносферы) [21-23], UAM (Upper Atmosphere Model) [24], CTIPe (The Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics model) [25], TIME GCM (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere-Electrodynamics General Circulation Model) [26], GITM (Global Ionosphere-Thermosphere Model) [27], GAIA (Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model) [28], состав, тепловой режим и динамика нейтральной атмосферы и ионосферы рассчитываются самосогласо-

ванном образом. Модели GAIA и TIME GCM включают в себя нижнюю, среднюю и верхнюю атмосферу, однако, рассматривают ионосферу в ограниченном интервале высот, то есть имеют верхнюю границу. При этом, следует отметить, что в модели TIME GCM не учитывается горизонтальный перенос заряженной компоненты ионосферной плазмы, что делает ионосферный блок этой модели не совсем корректным. В модели GITM осуществляется решение системы гидродинамических уравнений для нейтральной компоненты, в том числе, уравнений для вертикальных скоростей всех нейтральных частиц, а для заряженных частиц реализована диффузионная постановка задачи с верхней границей на высоте 600 км. Отличительной особенностью моделей ГСМ ТИП, UAM и STIPe является самосогласованное описание параметров плазмосферы и электрического поля ионосферного и магнитосферного происхождения. В настоящее время одной из актуальных задач физики околоземной космической плазмы является создание корректной глобальной модели атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли с учетом самосогласованного описания магнитного и электрического полей. Решение этой задачи позволит учесть важнейшие физические процессы и, в принципе, может дать возможность описания реального поведения околоземного космического пространства. Шаги в этом направлении уже делаются. В частности, в США консорциум из нескольких институтов работает над проектом IDEA (Объединенная динамика в атмосфере Земли). Основными целями данного проекта являются соединение атмосферной модели (WAM) с моделью ионосферы-плазмосферы-электродинамики (IPE) и изучение реакции ионосферы на воздействия, связанные с солнечной активностью и процессами в нижних слоях атмосферы [29]. Параллельно продолжается объединение моделей TIE-GCM и WACCM-X в обсерватории верхней атмосферы (HAO NCAR) [30]. Разработанная модель может использоваться для изучения поведения термосферы и ионосферы и для поддержки космических миссий ICON и GOLD. Также в стадии разработки находится канадская модель ионосферы и атмосферы (C-IAM) [31]. Модель представляет собой сочетание расширенной версии канадской модели средней атмосферы (CMAM) и модели верхних слоев атмосферы (UAM).

Проблема взаимодействия стратосферы, мезосферы и нижней термосферы с ионосферой представляется весьма важной научной задачей для понимания изменчивости ионосферной плазмы. Одним из примеров достаточно регулярных драматических событий в стратосфере (на высотах 30 – 40 км) является внезапное стратосферное потепле-

ние. В принципе, некоторые механизмы взаимосвязи средней атмосферы и термосферы, а, следовательно, и ионосферы в настоящее время известны [32], но детали физических процессов атмосферно-ионосферных связей во время стратосферных потеплений остаются недостаточно понятными [33]. Стратосферные потепления сопровождаются возрастанием волновой активности, в частности, усилением планетарных волн и изменением интенсивности внутренних гравитационных волн, которые могут вызывать изменения в ионосфере [34 – 39]. С использованием моделей TIME-GCM [39] и WAM (Whole Atmosphere Model) [40, 41] показано, что планетарные волны могут модифицировать суточные и полусуточные приливы и, следовательно, электрическое динамо поле и вертикальный дрейф плазмы, особенно в низких широтах. Ярким проявлением сказанного выше стало стратосферное потепление 2009 года, во время которого наблюдалось усиление экваториальной аномалии в утренние часы и ее ослабление после полудня при соответствующем поведении вертикального электромагнитного дрейфа плазмы на экваторе [34]. Отметим, что в модельных расчетах, представленных в [35], величины вариаций динамо поля были недостаточны, тогда как результаты расчетов в [41] показали более близкие к эксперименту значения вертикального дрейфа вблизи геомагнитного экватора, однако, ионосферные эффекты от полученного дрейфа плазмы при этом не рассматривались. Различия между теоретическими и экспериментальными данными могут быть вызваны как неоднозначным выбором входных данных модели, так и упрощенным описанием некоторых физических процессов. Следует отметить, что почти все теоретические исследования в последнее время были направлены на объяснение отклика низкоширотной ионосферы на стратосферные потепления. Однако, как показывают данные наблюдений, стратосферное потепление, происходящее в высоких широтах, приводит к глобальному изменению термосферно-ионосферных параметров, а не только к изменениям на низких широтах [36, 42].

В последние десятилетия вопрос о существовании дополнительных слоев в экваториальной ионосфере время от времени вставал на повестку дня. Одним из первых экспериментальных свидетельств расслоения экваториального F2-слоя ионосферы принято считать Sen [43]. Jenkins et al. [44] сформулировали доказательства того, что наблюдаемая стратификация F-области не может являться следствием перемещающихся ионосферных возмущений, вызванных гравитационными волнами. Во многих работах были представлены доказательства существования этого явления, основанные на данных на-

блюдений станций наземного зондирования ионосферы, радаров некогерентного рассеяния и зондирования ионосферы со спутников (смотри обзор [45]). Однако, к настоящему моменту существует целый ряд нерешенных вопросов относительно характеристик дополнительных слоев, наблюдаемых различными инструментами. В первых работах по моделированию расслоения экваториального F2-слоя была показана возможность его воспроизведения на простых численных моделях и было высказано предположение о связи расслоений экваториального F2-слоя с формированием экваториальной аномалии [46]. Последовавшие за этим результаты численных моделей [47, 48] показали, что расслоения экваториального F2-слоя и появление дополнительного F3-слоя в утренние и околополуденные часы связаны с совместным действием нестационарного меридионального электромагнитного дрейфа плазмы, ионообразования и диффузионных потоков. Согласно результатам анализа данных спутниковых и наземных наблюдений F3-слой может появляться и в другие часы местного времени [49, 50]. Детальное объяснение причин формирования F3-слоя в вечерние и ночные часы к настоящему моменту отсутствует.

Основные процессы, происходящие в околоземном космическом пространстве, отвечающие за ионосферно-плазмосферные возмущения, в настоящее время хорошо известны. В то же время, глобальная структура системы ионосфера-плазмосфера изучена пока недостаточно хорошо. В частности, вопрос о вкладе плазмосферы в глобальное распределение полного электронного содержания все еще не решен, хотя его решение является очень важным для уточнения позиционирования с помощью одночастотных приемников ГЛОНАСС/GPS сигналов. Подобные исследования начали активно проводиться сразу после запуска GPS навигационной системы. Большинство предыдущих исследований оценивали вклад плазмосферы в полное электронное содержание лишь для ограниченной области долгот и широт [51-53]. Имеется лишь небольшое число исследований, в которых предпринималась попытка решить эту задачу в глобальном масштабе [54-56]. Однако, до сих пор не было ни одного исследования, в котором была бы получена оценка вклада плазмосферы в глобальное распределение полного электронного содержания на основе результатов модельных расчетов и данных наблюдений. Кроме того, совершенно не проводились исследования изменений плазмосферного вклада в полное электронное содержание во время различных возмущений.

Одним из основных свойств ионосферы Земли является ее долготная изменчивость, исследованию которой в настоящее время уделяется большое внимание. Это связано с тем, что долготные вариации ионосферных параметров сопоставимы по величине с суточными вариациями и важны для прогноза распространения радиоволн. Первые достаточно полные исследования долготных вариаций электронной концентрации N_e были выполнены по данным спутников Ariel 1 и 3 на высотах их пролетов [57]. Долготные вариации параметров F2-слоя во всем диапазоне широт были впервые выделены по данным спутника Интеркосмос-19 (ИК-19). Однако, до сих пор все еще остаются до конца неизученными долготные аномалии в различных широтных областях. Отличительной особенностью авроральной ионосферы является существование в определенных условиях главного ионосферного провала - провала в широтном ходе электронной концентрации на высотах F-области [58]. Морфологические особенности долготных вариаций главного ионосферного провала исследовались и были представлены в [59, 60], тогда как причины этих вариаций исследованы недостаточно. Другим ярким подтверждением недостаточной изученности долготных аномалий в ионосфере является аномалия моря Уэдделла. На среднеширотных ионосферных станциях Halley Bay и Argentine Island, расположенных в южном полушарии, довольно давно было обнаружено аномальное поведение критической частоты F2-слоя, f_oF_2 , в период декабрь-февраль, когда ночные значения f_oF_2 превышали дневные [61, 62]. Этот эффект был назван аномалией моря Уэдделла (Weddell Sea Anomaly). Пространственные характеристики аномалии моря Уэдделла исследовались по различным спутниковым данным [63, 64] и было показано, что аномальные суточные вариации электронной концентрации наблюдаются только в определенной области долгот в период с ноября по февраль [65, 66]. Возникает вопрос о наличии аналогичной аномалии в северном полушарии. Мамруков [67] впервые описал аномальные суточные вариации f_oF_2 по данным ионосферной станции в Якутске. Попытка выделить область Якутской аномалии была сделана по данным радиозатменного эксперимента COSMIC для минимума солнечной активности [65]. Нерешенными остаются вопросы о природе и механизмах формирования аномалии моря Уэдделла и Якутской аномалии, их зависимости от солнечной активности и о вертикальной структуре этих аномалий.

Одной из крупномасштабных особенностей среднеширотной ионосферы является зимняя аномалия, которая заключается в том, что значения электронной концентрации в

максимуме F2-слоя в дневное время при одинаковых уровнях солнечной активности зимой больше, чем летом [68, 69]. Пионерскими работами в этой области являются статьи [70-72], в которых на ограниченном массиве данных была выделена глобальная структура зимней аномалии, и было показано, что основной причиной формирования зимней аномалии в F2-слое являются сезонные изменения нейтрального состава термосферы. Согласно Rishbeth et al. [72] на фиксированной географической широте зимняя аномалия развита сильнее в долготных секторах ионосферы, наиболее приближенных к геомагнитным полюсам, и слабее развита в долготных секторах ионосферы, наиболее удаленных от геомагнитных полюсов. Данное объяснение долготной вариации зимней аномалии было успешно воспроизведено в результатах расчетов модели STIP [73]. Однако, анализ результатов, представленных в [74], указывает на необходимость проверки абсолютной достоверности этой теории.

Долготные вариации ионосферы над экватором были впервые выделены по данным спутника Интросмос-19 (ИК-19) [75-77]. Были обнаружены 3 и 4 гармоники в долготных вариациях ионосферных параметров над экватором. Согласно концепции четырех гармоник, получившей в последнее время широкое распространение [78-81], долготные вариации параметров экваториальной ионосферы формируются приливными волнами, приходящими из нижней атмосферы. Приливы на высотах E-слоя модулируют электрическое поле, которое посредством вертикального электромагнитного дрейфа влияет на суточное и долготное распределение плазмы на высотах F2-слоя [78-79].

При исследовании ионосферных откликов на геомагнитные бури обычно рассматриваются возмущения, которые наблюдаются в главную фазу бури, поскольку наиболее интенсивные ионосферные возмущения наблюдаются именно в этот период [82-84]. Имеется ряд обзоров, в которых описываются основные процессы, происходящие в системе термосфера-ионосфера в периоды геомагнитных бурь [82, 83, 85, 86]. По знаку возмущений электронной концентрации в F-области ионосферы принято выделять положительную и отрицательную ионосферные бури, появление которых объясняется различными цепочками процессов в системе магнитосфера-ионосфера-термосфера. Отрицательные возмущения электронной концентрации в F-области ионосферы в главную фазу бури и на начальных этапах фазы восстановления геомагнитных бурь являются одним из наиболее исследованных явлений [82]. Вопрос о механизмах формирования положительной ионосферной бури и условиях ее появления в главную фазу геомагнитной

бури остается к настоящему моменту нерешенным. Согласно Prolss [82], Namgaladze et al. [87], Balan et al. [88, 89], появления дополнительного термосферного ветра к экватору в главную фазу бури достаточно для генерации положительной ионосферной бури на средних и низких широтах в дневное время. Heelis et al. [90] сделали вывод о том, что расширение области магнитосферной конвекции к экватору во время сильных геомагнитных бурь приводит к росту полного электронного содержания днем на средних и низких широтах. Оживленная дискуссия механизмов формирования дневных положительных ионосферных бурь [91-93] не выявила единой точки зрения по этому вопросу. Согласно [93] для объяснения положительной ионосферной бури требуется комбинация прямого проникновения электрического поля магнитосферной конвекции к низким широтам, расширения области влияния поля магнитосферной конвекции на низкоширотную ионосферу и возмущений термосферного ветра. Очевидно, что данная формулировка требует уточнения. Какой же из предложенных механизмов является основным в формировании положительных ионосферных бурь, существующих в течение нескольких часов в главную фазу геомагнитной бури? Кроме ответа на этот вопрос, также следует уточнить пространственно-временные границы влияния как каждого из упомянутых выше механизмов формирования положительных ионосферных бурь, так и других механизмов таких, как изменение нейтрального состава и ионосферно-плазмосферное взаимодействие. Кроме того, положительные ионосферные возмущения на фазе восстановления геомагнитных бурь представляют собой наименее исследованную сторону отклика верхней атмосферы на геомагнитные бури, которая была выявлена и начала изучаться только в последние годы [94, 95]. Поведение же ионосферы на более поздних стадиях фазы восстановления и после окончания геомагнитной бури вообще практически не исследовалось. Что касается высокоширотной ионосферы, то в одном из первых исследований зимней арктической ионосферы Sato [96] выявил в распределении критической частоты F2-слоя область повышенной плотности ионосферной плазмы, протягивающуюся через полярную шапку с дневной стороны на ночную. Морфологический эффект антисолнечного переноса плазмы через полярные шапки был назван Sato [96] и Knudsen [97] языком ионизации. Согласно Foster et al. [98] вероятность появления языка ионизации увеличивается во время геомагнитных бурь, когда резко возрастают скорости горизонтального переноса тепловой плазмы за счет электромагнитного дрейфа на высотах F-области высокоширотной ионосферы. Важно отметить формирование «нейтрального

языка» во время геомагнитной бури, который наблюдался Burns et al. [99] и моделировался Liu et al. [100]. Эти исследования показали, что такая структура («нейтральный язык») в основном формируется за счет адвекции к полюсу нейтральных частиц из средних широт. Адвекция объясняется электромагнитным дрейфом ионов и более частыми ион-нейтральными столкновениями. Требуются дополнительные исследования для уточнения влияния термосферно-ионосферного взаимодействия на структуру языка ионизации.

Краткое описание результатов, полученных соискателем

Ранее был разработан новый блок расчета электрических полей и зональных токов в ионосфере Земли в модели ГСМ ТИП [23, 101]. В этом блоке приведение трехмерного моделирующего уравнения, описывающего закон сохранения плотности полного тока в ионосфере Земли, к двумерному виду осуществляется его интегрированием по толщине токопроводящего слоя ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Использование нового блока расчета электрических полей позволило корректно описать поведение электрического поля на геомагнитном экваторе. Полученные в модельных расчетах глобальные распределения потенциала электрического поля удовлетворительно согласуются с результатами модельных расчетов других авторов.

Основываясь на результатах расчетов модифицированной модели верхней атмосферы (ГСМ ТИП) было дано объяснение механизмов формирования F3-слоя в вечернее и ночное время. Наблюдающийся в спокойных условиях в ночное время F3-слой может формироваться неоднородным по высоте вертикальным электромагнитным дрейфом плазмы [A1, A2][102, 103]. По данным внешнего зондирования со спутника Интеркосмос-19 (ИК-19) были исследованы морфологические особенности проявления дополнительного F3-слоя в экваториальной ионосфере. Данные зондирования спутника ИК-19 показали, что F3-слой формируется между гребнями экваториальной аномалии в любые моменты местного времени [A3, A4][104, 105]. Суточные и долготные вариации F3-слоя и экваториальной аномалии полностью определяются суточной и долготной вариацией вертикального электромагнитного дрейфа плазмы в окрестности геомагнитного экватора. F3-слой, согласно спутниковым данным, располагается симметрично относительно геомагнитного экватора с максимумом вероятности появления в окрестности экватора. Вероятность появления F3-слоя слабо зависит от сезона. Выявлено, что по данным

внешнего зондирования F3-слой наблюдается в основном в дневное и вечернее время, но иногда он фиксируется и в послеполуночные-утренние часы [A4][105].

Исследования, проведенные с использованием различных моделей, подтвердили, что основным механизмом генерации плазменных пузырей является появление широтно-долготной области, в которой вертикальный электромагнитный дрейф плазмы меняет свое направление [A5][106]. Был сделан вывод о том, что наблюдавшийся в некоторых экспериментах рост электронной температуры в экваториальной ионосфере не оказывает влияния на генерацию плазменных пузырей. Явление перегрева внутри плазменных пузырей может формироваться за счет конвективных течений горячих электронов из области перегрева у основания F-области, возникающих благодаря тем же механизмам, которые формируют плазменные пузыри.

На основе анализа данных наблюдений и модельных исследований были получены новые данные о морфологических особенностях и механизмах формирования долготных и суточных вариаций (аномалий) электронной концентрации (электронной концентрации в максимуме F2-слоя $N_m F2$ и полного электронного содержания ПЭС) на различных широтах. Термин "ионосферная аномалия" означает любые отклонения от теории "слоя Чепмена" [68], т.е. отклонения от обратной зависимости электронной концентрации в максимуме F2-слоя от зенитного угла Солнца χ .

На основе спутниковых данных были исследованы морфологические особенности долготных вариаций положения Главного Ионосферного Провала (ГИП) [A6, A7][7, 107]. Показано, что долготный эффект в положении ГИП является устойчивым явлением в любых геофизических условиях. Средняя амплитуда долготных вариаций положения ГИП в дневное время больше, чем ночью. Впервые на основе статистической обработки данных удалось четко различить ГИП и высокоширотный провал (внутри аврорального овала) в обоих полушариях при высокой солнечной активности в утренние часы. При низкой солнечной активности утром: ГИП и высокоширотный провал четко не различаются; разброс данных и амплитуда долготного эффекта меньше. Модельные исследования на основе ГСМ ТИП [A7][107] показали, что при низкой солнечной активности долготные вариации положения ГИП в дневное время в основном определяются долготными изменениями функции ионизации, возникающими из-за долготных изменений зенитного угла Солнца и долготного распределения плотности атомарного кислорода. Динамические процессы не оказывают существенного влияния на долготный эффект в поло-

жении дневного ГИП. Формирование долготных изменений в ночном ГИП связано с долготным эффектом ионизации высокоэнергичных высыпающихся частиц, состава нейтральной атмосферы и высокоширотного электрического поля.

Для анализа зимней аномалии в N_mF2 были использованы данные, опубликованные в работе [74], а также данные радиозатменных наблюдений со спутников COSMIC, CHAMP и GRACE за 2001–2015 гг. Для анализа зимней аномалии в ПЭС использовались глобальные ионосферные карты (GIM) ПЭС лаборатории JPL [108]. В качестве величины, характеризующей степень развития (или интенсивности) зимней аномалии, использовалось отношение полуденных значений ПЭС и N_mF2 , усредненных за зимний период, к полуденным значениям, усредненным за летний период, т.е. отношение зима/лето для полудня. Анализ данных наблюдений указывает на то, что отношение зима/лето существенно выше в Северном полушарии, чем в Южном. Этот вывод отличается от результатов, представленных в [68], где предложенный механизм формирования аномалии приводит к одинаковому характеру развития зимней аномалии в Северном и Южном полушариях. Наибольшее отношение зима/лето наблюдается в североамериканском долготном секторе в Северном полушарии и в австралийском секторе в Южном полушарии, что согласуется с механизмом, предложенным в работе [68]. Наименьшее значение отношения зима/лето для Северного полушария наблюдается в Восточно-Европейском секторе, что не согласуется с механизмом, предложенным в работе [68], согласно которому наименьшее отношение ожидается в Восточно-Сибирском секторе. Таким образом, теория Ришбета лишь частично объясняет долготную вариацию зимней аномалии (минимум зимней аномалии в европейском регионе и локальный максимум в восточно-сибирском регионе не могут быть объяснены на основе этой теории) [A8][109]. Сопоставление особенностей проявления зимней аномалии в N_mF2 и ПЭС показало, что основные закономерности зимней аномалии (географическое положение и изменение с солнечной активностью) для этих параметров совпадают. Однако, зимняя аномалия в ПЭС развита заметно слабее, чем в N_mF2 . При больших значениях солнечной и геомагнитной активности амплитуда зимней аномалии увеличивается.

На основании уникального банка данных спутника Интеркосмос-19 была осуществлена проверка адекватности описания долготных вариаций электронной концентрации на субавроральных широтах, полученного на основе результатов расчетов численной модели GSM ТИП и эмпирической модели IRI [A9, A10][110, 111]. Доказана общая

природа ионосферных аномалий моря Уэдделла (WSA), среднеширотной летней вечерней аномалии и Якутской аномалии (YA), когда летние значения критической частоты F2-слоя ионосферы f_oF2 в ночное (вечернее) время больше, чем днем [A9, A11][110, 112]. На основе данных наблюдений спутника ИК-19 и результатов модельных расчетов выделены пространственные области формирования аномалии моря Уэдделла и Якутской аномалии. Основным механизмом указанных выше аномалий является вертикальный перенос плазмы вдоль магнитного поля под действием термосферного ветра (при этом горизонтальный перенос плазмы за счет $E \times B$ -дрейфа и распределение нейтрального состава термосферы имеют второстепенное значение [A9-A11][110-112]). Плазмосфера оказывает незначительное влияние на формирование ионосферных аномалий Якутской и моря Уэдделла, формирование которых идет с опережением во внешней ионосфере по сравнению с F2-слоем. Данные наблюдений показывают, что высотный диапазон 250-500 км вносит основной вклад в наземные наблюдения аномалии моря Уэдделла в полном электронном содержании. Рассмотрена сезонная зависимость долготных вариаций электронной концентрации в максимуме F2-слоя, N_mF2 , и полного электронного содержания, ПЭС, на ряде среднеширотных станций в северном полушарии по результатам расчетов, полученных с использованием модели ГСМ ТИП, и данным измерений наземной сети приемников сигналов системы навигационных спутников GPS, ионозондов и радаров некогерентного рассеяния в 2009 году [A11, A12][112, 113]. Показано, что летняя среднеширотная вечерняя аномалия в суточном ходе ПЭС проявляется менее заметно и в более ранние часы по сравнению с ее проявлением в N_mF2 . В отличие от формирования этой аномалии в N_mF2 в Иркутске и в Калининграде, в полном электронном содержании аномальный суточный ход летом существует только над Иркутском. Анализ результатов модельных расчетов позволил сделать следующий вывод: долготные вариации N_mF2 на средних широтах формируются изменениями состава термосферы и динамическими процессами в ионосфере, связанными с термосферным ветром; долготные вариации ПЭС слабо зависят от изменений нейтрального состава термосферы и определяются, в основном, динамическими процессами.

На основе анализа результатов моделей всей атмосферы (EAGLE) и верхней атмосферы (ГСМ ТИП) для января 2009 года было показано, что атмосферно-ионосферное взаимодействие играет ключевую роль в формировании долготной структуры и пространственно-временного поведения параметров низкоширотной ионосферы. Вечерний

всплеск восточного электрического поля и 4-х пиковая структура долготной вариации зонального электрического поля в экваториальном регионе формируются за счет атмосферно-ионосферного взаимодействия [A13][114].

Проведено глобальное (для всех широт и долгот) исследование вклада плазмосферы в полное электронное содержание (ПЭС) для зимних условий 2009 года в минимуме солнечной активности на основе результатов модельных расчетов и данных спутниковых наблюдений. Показано, что вклад плазмосферы в полное электронное содержание (ПЭС) может превышать вклад ионосферы, особенно ночью в эпоху минимума солнечной активности [A10, A14][111, 115]. Максимальный вклад плазмосферы в ПЭС (до 85%) согласно результатам численных расчетов наблюдается ночью вблизи экватора и превышает вклад ионосферы. Вклад плазмосферы в ПЭС днем не превышает ~ 40%, что согласуется с результатами предыдущих исследований [52]. На средних и экваториальных широтах вклад плазмосферы может возрасти во время геомагнитной бури на 20–25%. Отклик N_mF2 и ПЭС на геомагнитные возмущения может значительно отличаться, вплоть до знака возмущения [A15, A16][116, 117]. Среднеширотная ионосфера более изменчива в главную фазу бури, чем плазмосфера. Показано, что возмущения ПЭС и f_oF2 во время геомагнитных бурь похожи, но не идентичны. На одной и той же широте возмущения ПЭС и f_oF2 в одно и то же время могут иметь разные знаки, что говорит о невозможности описания возмущений ПЭС, основываясь только на возмущениях f_oF2 . Одновременное появление возмущений f_oF2 и ПЭС разных знаков во время геомагнитной бури связано с недозаполненностью плазменных трубок, изменением шкалы высот за счет разогрева электронов во внешней ионосфере и уменьшением роли вариаций состава нейтральной атмосферы с высотой.

Разработана постановка задачи и сценарии исследования отклика системы термосфера-ионосфера на геомагнитные бури [A15-A24][10, 116-124] и суббури [A25][125] с использованием модели верхней атмосферы (ГСМ ТИП). На основе этой модели проведены исследования и осуществлена интерпретация закономерностей, выявленных по данным наблюдений. На основе интерпретации данных наблюдений с помощью результатов расчетов на модели ГСМ ТИП показано, что во время геомагнитной бури (в среднем) благодаря перераспределению нейтрального состава термосферы в высокоширотном F2-слое ионосферы формируется полоса отрицательных возмущений, а в низкоширотном – полоса положительных возмущений [A15, A16, A18, A23][10, 116, 117, 123].

Согласно результатам [A21, A22, A24][121, 122, 124] положительные ионосферные возмущения на средних и низких широтах формируются за счет: 1) эффектов электрических полей на начальной стадии развития геомагнитной бури; 2) подъема плазмы термосферным ветром во временном интервале 1-3 часа после начала бури; 3) увеличения отношения $n(O)/n(N_2)$ во временном интервале 4-12 часов после начала бури. На основе результатов моделирования сделан вывод о том, что структура высокоширотных возмущений концентрации $n(N_2)$ и термосферный ветер оказывают значительное влияние на структуру языка ионизации во время геомагнитных бурь [A19][119].

При непосредственном участии соискателя был проведен статистический анализ ионосферных эффектов геомагнитных бурь [A23][123]. Все геомагнитные бури были разделены на четыре типа: изолированные (временной интервал между соседними бурями больше 5 дней); неизолированные (указанный интервал не превышает 5 дней); слабые ($Dst > -100$ нТл) и сильные ($Dst \leq -100$ нТл). В каждой группе бури делились по сезонам: зима (декабрь-февраль); весна (март-май); лето (июнь-август) и осень (сентябрь-ноябрь). Статистический анализ изолированных бурь подтвердил гипотезы о формировании положительных возмущений электронной концентрации в главную фазу геомагнитной бури за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора.

В восстановительную фазу бури на субавроральных и средних широтах днем формируются положительные возмущения электронной концентрации за счет увеличения отношения $n(O)/n(N_2)$, а ночью отрицательные эффекты вследствие недозаполненности плазменных трубок, возникшей в результате их опустошения в главную фазу бури. Увеличение отношения $n(O)/n(N_2)$ приводит к появлению дневных положительных эффектов последствия в N_mF_2 и ПЭС на средних широтах на 2-5 сутки после окончания геомагнитных бурь [A15, A16][116, 117]. В полном электронном содержании этот эффект значительно слабее, чем в f_oF_2 . Это объясняется недозаполненностью плазмосферы после окончания геомагнитной бури и тем, что состав нейтральной атмосферы оказывает гораздо большее влияние на F-область ионосферы, чем на электронную концентрацию на больших высотах. Положительный эффект последствия был подтвержден статистически и выявлена его сезонная зависимость [126, A23][123, 126].

Разработаны при непосредственном участии соискателя постановки задач отклика системы термосфера-ионосфера на внезапные стратосферные потепления [A26-A29][127-130] с использованием моделей верхней атмосферы (ГСМ ТИП) и всей атмо-

сферы (EAGLE). Целью этих работ являлось: 1) проведение исследований глобального отклика системы термосфера-ионосфера на внезапное стратосферное потепление; 2) воспроизведение и дальнейшая интерпретация зарегистрированного поведения экваториальной аномалии во время внезапных стратосферных потеплений 2008 и 2009 годов. В первой идеализированной постановке задачи параметры взаимодействия между нижней атмосферой, мезосферой и нижней термосферой (MLT) задавались в виде глобальных распределений T_n и плотности нейтрального газа на нижней границе модели ГСМ ТИП (80 км). Для учета эффектов стратосферного потепления на нижней границе ГСМ ТИП использовались два варианта граничных условий: 1. суперпозиция фоновых значений параметров модели нижней атмосферы COMMA-LIM [131] и возмущения в виде планетарной волны (PW) с зональным числом 1 и амплитудными значениями $\Delta T_n \sim \pm 20$ К на географической широте 60° ; 2. значения термосферных параметров, рассчитанные в модели TIME-GCM [39] на высоте 80 км. Возмущения T_n , заданные на нижней границе модели, приводят к отрицательным возмущениям f_oF2 практически по всему глобусу. Этот результат согласуется с данными наблюдений COSMIC во время потеплений в январе 2008 и 2009 года, представленными в [36]. На основе анализа результатов расчетов на модели верхней атмосферы Земли (ГСМ ТИП) показано, что причиной отрицательных ионосферных возмущений на авроральных и средних широтах во время внезапных стратосферных потеплений является уменьшение отношения O/N_2 вследствие нагрева верхней термосферы [A26, A27][127, 128]. Результаты расчетов, полученные при совместном использовании моделей ГСМ ТИП и TIME-GCM, воспроизводят некоторые особенности поведения низкоширотной ионосферы, качественно похожие на наблюдавшиеся, такие как, например, усиление дрейфа плазмы вверх (вниз) утром (после полудня), но величина и время появления возмущений в модельных расчетах значительно отличаются от данных наблюдений. Далее был задан дополнительный электрический потенциал таким образом, чтобы получить зональное электрическое поле, вызывающее вертикальный электромагнитный дрейф со скоростями, наблюдавшимися в Jisatagsa во время стратосферного потепления. При этом удалось получить в модели возмущения ПЭС качественно и количественно близкие к наблюдениям. Проведенные исследования доказывают, что изменения зонального электрического поля (вертикального дрейфа плазмы) являются ключевым механизмом отклика низкоширотной ионосферы на внезапные стратосферные потепления [A28][129].

Анализ результатов расчетов на модели всей атмосферы EAGLE и данных наблюдений позволил выявить охлаждение в тропической нижней термосфере, вызванное стратосферным потеплением [A29][130]. Показано, что температурные возмущения с максимальным охлаждением в нижней термосфере во время потепления существенно влияют на термосферные ветры и ионосферные проводимости, что важно для генерации возмущений динамо электрического поля на высотах E-области ионосферы (100-120 км). На основе результатов расчетов модели EAGLE и данных наблюдений выявлен отклик на внезапное стратосферное потепление 2009 года в виде послезаходного увеличения и предвосходного уменьшения полного электронного содержания в низкоширотной ионосфере. Показано, что в послезаходные часы стратосферное потепление влияет на полное электронное содержание в низких широтах посредством возмущений меридионального электрического поля.

Разработана постановка задачи и сценарии исследования отклика системы термосфера-ионосфера на протонные события [A30, A31][132, 133] с использованием моделей верхней атмосферы (GCM TИП) и всей атмосферы (EAGLE). На основе этих моделей проведены исследования и осуществлена интерпретация закономерностей, выявленных по данным наблюдений. Несмотря на относительную прозрачность термосферы для протонов высоких энергий, в численных экспериментах на модели всей атмосферы EAGLE был получен ионосферный отклик на солнечные протонные события и протонные высыпания из хвоста магнитосферы [A30][132]. Были отмечены максимальные положительные возмущения ПЭС и электронной концентрации в E-области высокоширотного региона. Эти положительные возмущения ПЭС объясняются не только процессами прямой ионизации высыпадающими протонами, но и связанным с ними нагревом электронов в ионосфере, который приводит к росту шкалы высот электронов во внешней ионосфере и плазмосфере. Показано, что на высотах F2-слоя ионосферы положительные возмущения за счет усиления потоков солнечных и магнитосферных протонов формируются в низкоширотной области вследствие генерации динамических процессов в стратосфере и мезосфере, которые вызывают направленный к экватору перенос атомарного кислорода.

Разработаны и осуществлена верификация эмпирических моделей ионосферы [A9, A10, A12, A20, A32][110, 111, 113, 120, 134] и методов их адаптации [A33, A34][135, 136]. Создана при непосредственном участии соискателя модель Главного Ионосферного Провала (ГИП) [A6][7], построенная на основе спутниковых данных. Мо-

дель главного ионосферного провала создавалась в два этапа – вначале была построена модель положения минимума провала, а затем, с учетом этого положения, строилось пространственное распределение f_oF2 в области ГИП. Необходимость такого подхода диктуется сильной зависимостью положения минимума провала от местного времени и долготы. Для построения модели ионосферного провала использовались данные спутников «Космос-900», «Интеркосмос-19» и CHAMP. Для минимума солнечной активности (2004–2009 гг., $F10.7 < 100$) использовались прямые зондовые измерения N_e на низкоорбитальном спутнике CHAMP (~ 8000 витков). Данные измерений на высоте спутника CHAMP приводились к высоте максимума F2-слоя. Модель размещена на Web-сайте ИЗМИРАН <http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/>. Под руководством соискателя разработана глобальная эмпирическая модель ионосферы по данным радиозатменных наблюдений [A8][109]. Тестирование метода адаптации эмпирических моделей ионосферы по данным измерений наклонного полного электронного содержания показало, что использование методики (в данной конкретной реализации) позволяет лишь для некоторых сезонов улучшить точность позиционирования объектов радиолокационными станциями [A34][136]. Невозможность воспроизведения стандартными эмпирическими моделями (IRI и NeQuick) структуры главного ионосферного провала приводит к тому, что эффективность коррекции этих моделей наихудшая в зимний период на высоких и субавроральных широтах.

Под руководством соискателя осуществлено объединение моделей среды с моделью расчета распространения радиоволн [A35, A36][137, 138], основанной на решении уравнения эйконала. Это позволило провести исследования влияния геомагнитных бурь на изменения характеристик радиотрасс КВ-диапазона в трехмерно неоднородной анизотропной ионосфере. Также под руководством соискателя разработаны и реализованы алгоритмы расчета радиотрасс волн КВ-диапазона на основе вариационного принципа Ферма для функционала оптической длины радиолуча [A37-A39][139-141]. Показано, что метод глобальной оптимизации, основанный на последовательном поиске экстремумов различного типа (минимумов и седловых точек первого рода) функционала фазового пути радиолуча позволяет эффективно и оперативно находить семейство решений в неоднородных средах в виде однокачковых трасс (верхние и нижние радиолучи), а также волноводные решения. Разработанный для решения задач распространения радио-

волн метод глобальной оптимизации в модифицированном виде нашел свое применение для решения прикладной задачи расчета волн цунами [A40][142].

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанные сценарии и реализованные постановки задач исследования и интерпретации наблюдаемого отклика системы термосфера-ионосфера на геомагнитные бури [A15-A24][10, 116-124], суббури [A25][125], протонные события [A30, A31][132, 133], внезапные стратосферные потепления [A26-A29][127-130] с использованием численных моделей.

2. Результаты исследования и тестирования способов устранения некоторых существующих проблем, возникающих при решении прикладных задач радиосвязи, навигации и радиолокации с использованием эмпирических, численных и ассимиляционных моделей среды [A6, A8-A10, A12, A20, A32-A34][7, 109-111, 113, 120, 134-136] и моделей расчета радиотрасс [A35-A40][137-142].

3. Результаты уточнения существующих, а в некоторых случаях выявление и интерпретация новых морфологических особенностей пространственно-временного распределения электронной концентрации на высотах F-области, внешней ионосферы и плазмосферы на различных широтах в спокойных условиях [A1-A4, A6-A11, A14][7, 102-105, 107, 109-112, 115].

4. Доработанный (на основе интерпретации данных наблюдений с помощью модели верхней атмосферы и результатов статистического анализа) общий сценарий процессов, возникающих в системе термосфера-ионосфера на различных фазах геомагнитной бури и после ее окончания [A15, A16, A18, A19, A21-A24][10, 116, 117, 119, 121-124]. Выявлен, статистически подтвержден и проинтерпретирован дневной положительный ионосферный эффект последствия геомагнитной бури [A15, A16, A23][116, 117, 123].

5. Численные эксперименты на моделях верхней атмосферы и всей атмосферы, которые позволили выявить, интерпретировать и оценить роль эффектов солнечных протонных событий, протонных высыпаний из хвоста магнитосферы и квазизахваченных электронов из радиационных поясов в формировании глобального ионосферного отклика на геомагнитные бури [A21, A22, A30, A31][121, 122, 132, 133].

6. Выявленная причина отрицательных ионосферных возмущений на авроральных и средних широтах во время внезапных стратосферных потеплений, а именно, уменьшение отношения концентраций O/N_2 вследствие нагрева верхней термосферы [A26, A27][127, 128], в то время, как изменения зонального электрического поля (вертикального дрейфа плазмы) являются ключевым механизмом отклика низкоширотной ионосферы на внезапные стратосферные потепления [A28, A29][129, 130].

Список публикаций автора

- A1. Klivenko M.V., Klivenko V.V., Karpachev A.T. Formation mechanism of additional layers above regular F2 layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 179–185, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.011.
- A2. Lynn K.J.W., Nanan B., Klivenko M.V., Klivenko V.V., Karpachev A.T. Comment on “A study of the F2 layer stratification on ionograms using a simple model of TIDs” by Jiang et al // *Journal of Geophysical Research*, 2020, V. 125, e2019JA027575, doi:10.1029/2019JA027575.
- A3. Karpachev A.T., Klivenko M.V., Klivenko V.V., Zhbakov G.A., Telegin V.A. Latitudinal structure of the equatorial F3 layer based on Intercosmos-19 topside sounding data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 77, P. 186–193, doi:10.1016/j.jastp.2011.12.018.
- A4. Karpachev A.T., Klivenko M.V., Klivenko V.V., Kuleshova V.P. Statistical study of the F3 layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 121–128, doi: 10.1016/j.jastp.2013.01.010.
- A5. de Meneses F.C., Klivenko M.V., Klivenko V.V., Alam Kherani E., Muralikrishna P., Xu Jiyao, Hasbi A.M. Electron temperature enhancements in nighttime equatorial ionosphere under the occurrence of plasma bubbles// *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 36–47, doi:10.1016/j.jastp.2013.04.003.
- A6. Karpachev A.T., Klivenko M.V., Klivenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, V. 146, P. 149–159, doi:10.1016/j.jastp.2016.05.008.
- A7. Karpachev A.T., Klivenko M.V., Klivenko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position // *Advances in Space Research*, 2019, V. 63, No. 2, P. 950–966, doi:10.1016/j.asr.2018.09.038.
- A8. Yasyukevich Y., Yasyukevich A., Ratovsky K., Klivenko M., Klivenko V., Chirik N. Winter anomaly in NmF2 and TEC: when and where it can occur // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, V. 8, A45, doi:10.1051/swsc/2018036.
- A9. Klivenko M.V., Klivenko V.V., Karpachev A.T., Ratovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Intercosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI repro-

duction and GSM TIP model simulation // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2020–2032, doi:10.1016/j.asr.2014.12.032.

A10. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Cherniak I.V., Galkin I.A. Longitudinal variation in the ionosphere-plasmasphere system at the minimum of solar and geomagnetic activity: investigation of temporal and latitudinal dependences // *Radio Science*, 2016, V. 51, P. 1864–1875, doi:10.1002/2015RS005900.

A11. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Zakharenkova I.E., Yasyukevich Yu.V., Korenkova N.A., Cherniak Iu.V., Mylnikova A.A. Mid-latitude Summer Evening Anomaly (MSEA) in F2 layer electron density and Total Electron Content at solar minimum // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 9, P. 1951–1960, doi:10.1016/j.asr.2015.07.019.

A12. Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V., Lukianova R.Yu. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // *Advances in Space Research*, 2017, V. 60, No. 2, P. 444–451, doi:10.1016/j.asr.2016.12.008.

A13. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak Iu.V. The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2077–2085, doi:10.1016/j.asr.2014.06.027.

A14. Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Rozanov E.V. The dependence of four-peak longitudinal structure of the tropical electric field on the processes in the lower atmosphere and geomagnetic field configuration // *Advances in Space Research*, 2019, V. 64, No. 10, P. 1854–1864, doi:10.1016/j.asr.2019.06.029.

A15. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Cherniak Iu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // *Annales Geophysicae*, 2017, V. 35, P. 923–938, doi:10.5194/angeo-35-923-2017.

A16. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-

plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, V. 180, P. 78–92, doi:10.1016/j.jastp.2017.12.017.

A17. Klimenko M.V., Klimenko V.V. Disturbance dynamo, prompt penetration electric field and overshielding in the Earth's ionosphere during geomagnetic storm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90–91, December 2012, P. 146-155, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.018.

A18. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P. Numerical modeling of the global ionospheric effects of storm sequence on September 9-14, 2005 - comparison with IRI model // *Earth, Planets and Space*, 2012, V. 64, No. 6, P. 433–440, doi:10.5047/eps.2011.06.048.

A19. Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., Lukianova R.Y., & Cherniak I.V. Simulation and observations of the polar tongue of ionization at different heights during the 2015 St. Patrick's Day storm // *Space Weather*, 2019, V. 17, P. 1073–1089, doi:10.1029/2018SW002143.

A20. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Zhang Y. E-region ionospheric storm on May 1–3, 2010: GSM TIP model representation and suggestions for IRI improvement // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2124-2130, doi:10.1016/j.asr.2014.08.003.

A21. Suvorova A.V., Huang C.-M., Dmitriev A.V., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Tumanova Y.S. Effects of ionizing energetic electrons and plasma transport in the ionosphere during the initial phase of the December 2006 magnetic storm // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 5880–5896, doi:10.1002/2016JA022622.

A22. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V.A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008 // *Journal of Geophysical Research*, 2017, V. 122, P. 2398–2423, doi:10.1002/2016JA023260.

A23. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., Klimenko V.V., Vesnin A.M. Statistical Analysis and Interpretation of High-, Mid- and Low-Latitude Responses in Regional Electron Content to Geomagnetic Storms // *Atmosphere*, 2020, V. 11, P. 1308, doi:10.3390/atmos11121308.

- A24. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Vasilyev R.V., Klimenko V.V., Podlesnyi A.V. Vertical plasma transport in the ionosphere over Irkutsk during St. Patrick's Day geomagnetic storm: observations and modeling // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67(1), P. 122-132, doi:10.1016/j.asr.2020.10.021.
- A25. Klimenko V.V., Klimenko M.V. EEJ and EIA variations during modeling substorms with different onset moments // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56(9), P. 1982-1991, doi:10.1016/j.asr.2015.07.041.
- A26. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko, M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M. Modeling the effect of Sudden Stratospheric Warming within the thermosphere-ionosphere system // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 77–85, doi: 10.1016/j.jastp.2012.09. 005.
- A27. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Korenkova N.A., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M., Shcherbakov A., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Condor Patilongo P.J. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // *Journal of Geophysical Research*, 2012, V. 117, A10309, doi:10.1029/2012JA018018.
- A28. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Liu H., Goncharenko L. P., Tolstikov M.V. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models – first results // *Journal of Geophysical Research*, 2015, V. 120, P. 7873–7888, doi:10.1002/2014JA020861.
- A29. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Vasiliev P.A., Karpov I.V., Korenkov Yu.N., Zakharenkova I.E., Funke B., Rozanov E.V. Identification of the mechanisms responsible for anomalies in the tropical lower thermosphere/ionosphere caused by the January 2009 sudden stratospheric warming // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2019, V. 9, A39, doi: 10.1051/swsc/2019037.
- A30. Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Korenkov Yu.N., Funke B., Zakharenkova I.E., Wissing J.M., Rozanov E.V. Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15-22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67, No. 1, P. 133–149, doi:10.1016/j.asr.2020.10.026.
- A31. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al. On Possible Causes of Positive Disturbance of Global Electronic Content during a Complex Heliogeophysical Event on September 2017 // *Cosmic Research*, 2021, V. 59, P. 456–462, doi:10.1134/S0010952521060046.

- A32. Ovodenko V.B., Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Oinats A.V., Kotova D.S., Nikolaev A.V. et al. Spatial and temporal evolution of different-scale ionospheric irregularities in Central and East Siberia during the 27–28 May 2017 geomagnetic storm // *Space Weather*, 2020, V. 18, e2019SW002378, doi:10.1029/2019SW002378.
- A33. Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 5, P. 900–906, doi:10.1016/j.asr.2015.05.017.
- A34. Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasyukevich Y.V., Klimenko M.V., Ratovsky K.G., Mylnikova A.A., Andreeva E.S., Kozlovsky A.E., Korenkova N.A., Nesterov I.A., & Tumanova Yu.S. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes // *GPS Solutions*, 2020, V. 24, P. 25, doi:10.1007/s10291-019-0936-x.
- A35. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Numerical Simulation of the Influence of the may 2–3, 2010 Geomagnetic Storm on HF Radio-Wave Propagation in the Ionosphere // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, V. 57, P. 467–477, doi:10.1007/s11141-014-9529-2.
- A36. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E., Ratovsky K.G., Nosikov I.A., Zhao B. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26–29, 2011 // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 9, P. 2012–2029, doi:10.1016/j.asr.2015.05.009.
- A37. Nosikov I.A., Bessarab P.F., Klimenko M.V. Method of Transverse Displacements Formulation for Calculating the HF Radio Wave Propagation Paths. Statement of the Problem and Preliminary Results // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, V. 59, P. 1–12, doi:10.1007/s11141-016-9670-1.
- A38. Nosikov I.A., Klimenko M.V., Bessarab P.F., Zbankov G.A. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere // *Advances in Space Research*, 2017, V. 60, No. 2, P. 491–497, doi:10.1016/j.asr.2016.12.003.
- A39. Nosikov I., Klimenko M., Zhbankov G., Podlesnyi A., Ivanova V., Bessarab P.F. Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic Identification of High and Low Rays // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, V. 68, No. 1, 455–467, doi: 10.1109/TAP.2019.2938817.

A40. Dobrokhotov S.Y., Klimenko M.V., Nosikov I.A., Tolchenkov A.A. Variational Method for Computing Ray Trajectories and Fronts of Tsunami Waves Generated by a Localized Source // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2020, V. 60, P. 1392–1401. doi:10.1134/S0965542520080072.

Список цитируемой литературы

1. Rawer K., Bilitza D., Ramakrishnan S. Goals and Status of the International Reference Ionosphere // *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1978, V. 16, P. 177–181, doi:10.1029/RG016i002p00177.
2. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, V. 4, No. A07, doi:10.1051/swsc/2014004.
3. Jones W.B., Gallet R.M. The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods // *J. Research Nat. Bureau Stand.-D. Radio Propag.*, 1962, V. 66D, No. 4, P. 419–438.
4. Fox M.W., McNamara L.F. Improved World-Wide Maps of Monthly Median foF2 // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1988, V. 50, No. 12, P. 1077–1086, doi:10.1016/0021-9169(88)90096-7.
5. Бадин В.И., Деминов М.Г., Деминов Р.Г., Шубин В.Н. Модель медианы критической частоты E-слоя для авроральной области // *Солнечно-земная физика*, 2013, Т. 22, С. 24–26.
6. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather*, 2017, V. 15, P. 418–429, doi:10.1002/2016SW001593.
7. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // *J Atmos Sol-Terr Phys.*, 2016, V. 146, P. 149–159, doi:10.1016/j.jastp.2016.05.008.
8. Themens D.R., Jayachandran P.T., Galkin I., Hall C. The Empirical Canadian High Arctic Ionospheric Model (E-CHAIM): NmF2 and hmF2 // *Journal of Geophysical Research*, 2017, V. 122, No. 8, P. 9015–9031, doi:10.1002/2017JA024398.
9. Pavlov A.V., Pavlova N.M. Comparison of modeled electron densities and electron and ion temperatures with Arecibo observations during undisturbed and geomagnetic storm periods of 7–11 September 2005 // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A03301, doi:[10.1029/2010JA016067](https://doi.org/10.1029/2010JA016067).
10. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P. Numerical modeling of the global ionospheric effects of storm sequence on September 9-14, 2005 - comparison

with IRI model // *Earth, Planets and Space*, 2012, V. 64, No. 6, P. 433–440, doi:10.5047/eps.2011.06.048.

11. Reinisch B.W., Galkin I.A. Global ionospheric radio observatory // *Earth, Planets and Space*, 2011, V. 63, No. 4, P. 377–381, doi:10.5047/eps.2011.03.001.

12. Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // *Radio Science*, 2012, V. 47, RS0L07, doi:10.1029/2011RS004952.

13. Maltseva O., Mozhaeva N., Poltavsky O., Zhbakov G. Use of TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances // *Advances in Space Research*, 2012, V. 49, No. 6, P. 1076–1087, doi:10.1016/j.asr.2012.01.005.

14. Mingalev V.S., Krivilev V.N., Yevlashina M.L., Mingaleva G.I. Numerical modeling of the high-latitude F-layer anomalies // *Pure and Applied Geophysics*, 1988, V. 127, No. 2, P. 323–334, doi:10.1007/BF00879815.

15. Уваров В.М., Барашков П.Д., Захарова А.П. Модель полярной ионосферы с учетом влияния межпланетной среды. 1. Эффект азимутальной компоненты ММП // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1992, Т. 32, № 3, С. 70–77.

16. Тацилин А.В., Романова Е.Б. Роль электромагнитного дрейфа в формировании полярной полости // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2001, Т. 41, № 2, С. 218–223.

17. Pavlov A.V. New method in computer simulations of electron and ion densities and temperatures in the plasmasphere and low-latitude ionosphere // *Annales Geophysicae*, 2003, V. 21, No. 7, P. 1601–1628, doi:10.5194/angeo-21-1601-2003.

18. Schunk R.W. A mathematical model of the middle and high latitude ionosphere // *Pure and Applied Geophysics*, 1988, V. 127, P. 255–303, doi:10.1007/BF00879813.

19. Bailey G.J., Balan N., Su Y.Z. The Sheffield University plasmasphere ionosphere model – a review // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, V. 59, No. 13, P. 1541–1552, doi:10.1016/S1364-6826(96)00155-1.

20. Huba J.D., Joyce G., Fedder J.A. SAMI2 (Sami2 is Another Model of the Ionosphere): A New Low-latitude Ionosphere Model // *Journal of Geophysical Research*, 2000, V. 105, P. 23,035–23,053, doi:10.1029/2000JA000035.

21. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1990, Т. 30, № 4, С. 612–619.

22. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M., Bessarab F.S., Surotkin V.A. Calculated and observed ionospheric parameters for a Magion 2 passage and EISCAT data on July 31, 1990 // *Journal of Geophysical Research*, 1998, V. 103, No. A7, P. 14697–14710, doi:10.1029/98JA00210.
23. Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2006, Т. 46, № 4, С. 485-494.
24. Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Намгаладзе А.Н. Глобальная модель верхней атмосферы с переменным шагом интегрирования по широте // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1996, Т. 36, № 2, С. 89–95.
25. Millward G.H., Müller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Fuller-Rowell T.J., Richmond A.D., Moffett R.J. An investigation into the influence of tidal forcing on F region equatorial vertical ion drift using a global ionosphere-thermosphere model with coupled electrodynamics // *Journal of Geophysical Research*, 2001, V. 106, No. A11, P. 24733–24744, doi:10.1029/2000JA000342.
26. Richmond A.D., Ridley E.C., Roble R.G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics // *Geophys. Res. Lett.*, 1992, V. 6, P. 601–604.
27. Ridley A.J., Deng Y., Tóth G. The global ionosphere-thermosphere model // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, V. 68, No. 8, P. 839–864, doi:10.1016/j.jastp.2006.01.008.
28. Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., Mukhtarov P., Fujiwara H., Shinagawa H. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations // *Journal of Geophysical Research*, 2012, V. 117, A10323, doi:10.1029/2012JA017650.
29. Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W., Fuller-Rowell T.J., Wu F., Maruyama N., Iredell M.D. First forecast of a sudden stratospheric warming with a coupled whole-atmosphere/ionosphere model IDEA // *Journal of Geophysical Research*, 2014, V. 119, P. 2079–2089, doi:10.1002/2013JA019481.
30. Pedatella N.M., Fang T.-W., Jin H., Sassi F., Schmidt H., Chau J.L., Siddiqui T.A., Goncharenko L. Multimodel comparison of the ionosphere variability during the 2009 sudden

stratosphere warming // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 7204–7225, doi:10.1002/2016JA022859.

31. Martynenko O.V., Fomichev V.I., Semeniuk K., Beagley S.R., Ward W.E., Namgaladze A.A., McConnell J.C. Physical mechanisms responsible for forming the 4-peak longitudinal structure of the 135.6 nm ionospheric emission: first results from the Canadian IAM // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, V. 120, P. 51–61, doi:10.1016/j.jastp.2014.08.014.

32. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987.

33. Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H.L. Equatorial and Low Latitude Ionospheric Effects During Sudden Stratospheric Warming Events // *Space Science Reviews*, 2011, doi:10.1007/s11214-011-9797-5.

34. Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warming on equatorial ionization anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2010, V. 115, A00G07, doi:10.1029/2010JA015400.

35. Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J. Unexpected connection between the stratosphere and ionosphere // *Geophysical Research Letters*, 2010, V. 37, L10101, doi:10.1029/2010GL043125.

36. Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, V. 73, No. 13, P. 1697 – 1702, doi:10.1016/j.jastp.2011.03.006.

37. Altadill D., Apostolov E.M., Sole J.G., Jacobi C. Origin and development of vertical propagating oscillations with periods of planetary waves in the ionospheric of F region // *Physics and Chemistry of the Earth. Part C*, 2001, V. 26, No. 6, P. 387–393, doi:10.1016/S1464-1917(01)00019-8.

38. Danilov A.D., Vanina L.B. Relation between parameters of stratosphere and ionospheric F2 layer // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 2004, V. 4, No. 3, P. 237–250.

39. Liu H.-L., Wang W., Richmond A.D., Roble R.G. Ionospheric variability due to planetary waves and tides for solar minimum conditions // *Journal of Geophysical Research*, 2010, V. 115, A00G07, P. 1–13, doi: 10.1029/2009JA015188.

40. Fuller-Rowell T., Wang H., Akmaev R., Wu F., Fang T.W., Iredell M., Richmond A.D. Forecasting the dynamic and electrodynamic response to the January 2009 sudden stratospheric warming // *Geophysical Research Letters*, 2011, V. 38, L13102, doi:10.1029/2011GL047732.
41. Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., Fang T.W., Araujo-Pradere E. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics // *Journal of Geophysical Research*, 2010, V. 115, A00G08, doi:10.1029/2010JA015524.
42. Yue X., Schreiner W.S., Lei J., Rocken C., Hunt D.C., Kuo Y.-H., Wan W. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event // *J. Geophys. Res.*, 2010, V. 115, A00G09, doi:10.1029/2010JA015466.
43. Sen H.Y. Stratification of the F2 layer of the ionosphere over Singapore // *Journal of Geophysical Research*, 1949, V. 54, No. 4, P. 363–366, doi:10.1029/JZ054i004p00363.
44. Jenkins B., Bailey G.J., Abdu M.A., Batista I.S., Balan N. Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil // *Annales Geophysicae*, 1997, V. 15, No. 6, P. 753–759, doi:10.1007/s00585-997-0753-3.
45. Klimenko M.V., Zhao B., Karpachev A.T., Klimenko V.V. Stratification of the low-latitude and near-equatorial F2 layer, topside ionization ledge, and F3 layer: What we know about this? A review // *International Journal of Geophysics*, 2012, P. 1–22, doi:10.1155/2012/938057.
46. Huang C. A certain behavior of the ionospheric F_2 region at low latitudes // *Radio Science*, 1974, V. 9, No. 5, P. 519–532, doi:10.1029/RS009i005p00519.
47. Суроткин В.А., Намгаладзе А.А., Коломийцев О.П. Моделирование суточного развития расслоений F2–области экваториальной ионосферы // *Геомагнетизм и аэронавигация*, 1985, Т. 25, № 3, С. 394–399.
48. Balan N., Batista I.S., Abdu M.A., MacDougall J., Bailey G.J. Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere // *Journal of Geophysical Research*, 1998, V. 103, No. A12, P. 29169–29182, doi:10.1029/98JA02823.
49. Depuev V.H., Pulinetz S.A. Intercosmos-19 observations of an additional topside ionization layer: The F3-layer // *Advances in Space Research*, 2001, V. 27, P. 1289–1292, doi:10.1016/S0273-1177(01)00205.

50. Zhao B., Wan W., Reinisch B., Yue X., Le H., Liu J., Xiong B. Features of the F3 layer in the low-latitude ionosphere at sunset // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A01313, doi:10.1029/2010JA016111.
51. Lunt N., Kersley L., Bailey G.J. The influence of the protonosphere on GPS observations: Model simulations // *Radio Science*, 1999, V. 34, No. 3, P. 725–732, doi:10.1029/1999RS900002.
52. Balan N., Otsuka Y., Tsugawa T., Miyazaki S., Ogawa T., Shiokawa K. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity // *Earth, Planets and Space*, 2012, V. 54, P. 71–79, doi:10.1186/BF03352423.
53. Belehaki A., Jakowski N., Reinisch B.W. Plasmaspheric electron content derived from GPS TEC and digisonde ionograms // *Advances in Space Research*, 2004, V. 33, No. 6, P. 833–837, doi:10.1016/j.asr.2003.07.008.
54. Yizengaw E., Moldwin M.B., Galvan D., Iijima B.A., Komjathy A., Mannucci A.J. Global plasmaspheric *TEC* and its relative contribution to GPS *TEC* // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, V. 70, P. 1541–1548, doi:10.1016/j.jastp.2008.04.022.
55. Cherniak Iu.V., Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I. Plasmaspheric electron content derived from GPS *TEC* and FORMOSAT-3/COSMIC measurements: Solar minimum condition // *Advances in Space Research*, 2012, V. 50, 427–440, doi:10.1016/j.asr.2012.04.002.
56. Lee H.B., Jee G., Kim Y.H., Shim J.S. Characteristics of global plasmaspheric *TEC* in comparison with the ionosphere simultaneously observed by Jason-1 satellite // *Journal of Geophysical Research*, 2013, V. 118, P. 935–946, doi:10.1002/jgra.50130.
57. Eccles D., King J.W., Rothwell P. Longitudinal variations of the mid-latitude ionosphere produced by neutral-air winds—II Comparisons of the calculated variations of electron concentration with data obtained from the Ariel I and Ariel III satellites // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1971, V. 33, No. 3, P. 371–377, doi:10.1016/0021-9169(71)90142-5.
58. Muldrew D.B. F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // *Journal of Geophysical Research*, 1965, V. 70, No. 11, P. 2635–2650, doi:10.1029/JZ070i011p02635.
59. Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. I. Положение провала // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1986, Т. 26, № 1, С. 63–68.

60. Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. П. Форма провала // *Геомагнетизм и аэрномия*, 1986, Т. 26, № 4, С. 682–684.
61. Bellchambers W.H., Piggott W.R. Ionospheric measurements made at Halley Bay // *Nature*, 1958, V. 182, P. 1596–1597, doi:10.1038/1821596a0.
62. Penndorft R. The average ionospheric conditions over the Antarctic in *Geomagnetism and Aeronomy* // *Antarctic Research Series*, V. 4, AGU. Washington DC, 1965, P. 1–45.
63. Horvath I., Essex E.A. The Weddell Sea Anomaly observed with the TOPEX satellite data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, V. 65, P. 693–706, doi:10.1016/S1364-6826(03)00083-X.
64. Jee G., Burns A.G., Kim Y.H., Wang W. Seasonal and solar activity variations of the Weddell Sea Anomaly observed in the TOPEX total electron content measurements // *Journal of Geophysical Research*, 2009, V. 114, A04307, doi:10.1029/2008JA013801.
65. Lin C.H., Liu J.Y., Cheng C.Z., Chen C.H., Liu C.H., Wang W., Burns A.G., Lei J. Three-dimensional ionospheric electron density structure of the Weddell Sea Anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2009, V. 114, A02312, doi:10.1029/2008JA013455.
66. Карпачев А.Т., Гасилов Н.А., Карпачев О.А. Морфология и причины аномалии моря Уэдделла // *Геомагнетизм и аэрномия*, 2011, Т. 51, № 6, С. 828–840.
67. Мамруков А.П. Вечернее аномальное повышение ионизации в области F // *Геомагнетизм и аэрномия*, 1971, Т. 11, № 6, С. 984–988.
68. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, V. 60, P. 1385–1402, doi:10.1016/S1364-6826(98)00062-5.
69. Burns A.G., Wang W., Qian L., Solomon S.C., Zhang Y., Paxton L.J., Yue X. On the solar cycle variation of the winter anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2014, V. 119, doi:10.1002/2013JA019552.
70. Torr M.R., Torr D.G. The seasonal behaviour of the F2-layer of the ionosphere // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1973, V. 35, P. 2237–2251, doi:10.1016/0021-9169(73)90140-2.
71. Torr D.G., Torr M.R., Richards P.G. Causes of the F region winter anomaly // *Geophysical Research Letters*, 1980, V. 7, No. 5, P. 301–304, doi:10.1029/GL007i005p00301.

72. Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., Zou L., Fuller-Rowell T.J., Millward G.H., Moffett R.J., Idenden D.W., Aylward A.D. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II: Physical discussion // *Annales Geophysicae*, 2000, V. 18, No. 8, P. 945-956, doi:10.1007/s00585-000-0945-6.
73. Zou L., Rishbeth H., Мьller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Millward G.H., Fuller-Rowell T.J., Idenden D.W., Moffett R.J. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: I. Modelling // *Annales Geophysicae*, 2000, V. 18, P. 927–944, doi:10.1007/s00585-000-0927-8.
74. Павлов А.В., Павлова Н.М. Вариации статистических параметров зимней аномалии NmF2 с широтой и солнечной активностью // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2012, Т. 52, № 3, С. 356–364.
75. Коченова Н.А. Долготные вариации экваториальной ионосферы по данным ИСЗ “Интеркосмос-19” // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1987, Т. 27, № 1, С. 142–144.
76. Карпачев А.Т. Характеристики глобального долготного эффекта в ночной экваториальной аномалии // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1988, Т. 28, № 1, С. 46–49.
77. Deminova G.F. Fine structure of foF2 longitudinal distribution in the night-time low-latitude ionosphere derived from Intercosmos-19 topside sounding data // *Advances in Space Research*, 2003, V. 31, No. 3, P. 531–536, doi:10.1016/S0273-1177(03)00037-1.
78. England S.L., Immel T.J., Sagawa E., Henderson S.B., Hagan M.E., Mende S.B., Frey H.U., Swenson C.M., Paxton L.J. Effect of atmospheric tides on the morphology of the quiet time, postsunset equatorial ionospheric anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2006, V. 111, A10S19, doi:10.1029/2006JA011795.
79. England S.L., Maus S., Immel T.J., Mende S.B. Longitudinal variation of the E-region electric fields caused by atmospheric tides // *Geophysical Research Letters*, 2006, V. 33, L21105, doi:10.1029/2006GL027465.
80. Oberheide J., Forbes J.M., Zhang X., Bruinsma S.L. Wave-driven variability in the ionosphere-thermosphere-mesosphere system from TIMED observations: what contributes to the “wave 4”? // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A01306, doi:10.1029/2010JA015911.
81. Pedatella N.M., Forbes J.M., Maute A., Richmond A.D., Fang T.-W., Larson K.M., Millward G. Longitudinal variations in the F region ionosphere and the topside ionosphere-

- plasmasphere: Observations and model simulations // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A12309, doi:10.1029/2011JA016600.
82. Prolss G.W. Ionospheric F-region storms / In *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*. V. 2. Ed. by Volland H. Boca Raton. CRC Press, 1995, P. 195–248.
83. Buonsanto M.J. Ionospheric storms: A review // *Space Science Review*, 1999, V. 88, doi:10.1023/A:1005107532631.
84. Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Reviews of Geophysics*, 2006, V. 44, RG4001, doi:10.1029/2005RG000193.
85. Mayr H.G., Harris I., Spencer N.W. Some properties of upper atmosphere dynamics // *Reviews of Geophysics*, 1978, V. 16, doi:10.1029/RG016i004p00539.
86. Prolss G.W. Ionospheric Storms at Mid-Latitude: A Short Review / *Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances*. Eds. by Kintner P.M., Coster A.J., Fuller-Rowell T., Mannucci A.J., Mendillo M., Heelis R. *Geophysical Monograph Series*, 181. Washington, DC: American Geophys. Union, 2013, doi:10.1029/181GM03.
87. Namgaladze A.A., Förster M., Yurik R.Y. Analysis of the positive ionospheric response to a moderate geomagnetic storm using a global numerical model // *Annales Geophysicae*, 2000, V. 18, doi:10.1007/s00585-000-0461-8.
88. Balan N., Alleyne H., Otsuka Y., Vijaya Lekshmi D., Fejer B.G., McCrea I. Relative effects of electric field and neutral wind on positive ionospheric storms // *Earth, Planets and Space*, 2009, V. 61, No. 4, P. 439–445, doi:10.1186/BF03353160.
89. Balan N., Shiokawa K., Otsuka Y., Kikuchi T., Vijaya Lekshmi D., Kawamura S., Yamamoto M., Bailey G. J. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes // *Journal of Geophysical Research*, 2010, V. 115, A02304, doi:10.1029/2009JA014515.
90. Heelis R.A., Sojka J.J., David M., Schunk R.W. Stormtime density enhancements in the middle latitude dayside ionosphere // *Journal of Geophysical Research*, 2009, V. 114, A03315, doi:10.1029/2008JA013690.
91. Rishbeth H., Heelis R.A., Makela, J. J., and Basu, S.: Storming the Bastille: the effect of electric fields on the ionospheric F-layer // *Annales Geophysicae*, 2010, V. 28, P. 977–981, doi:10.5194/angeo-28-977-2010.

92. Heelis R.A., Makela J.J., Basu S. Reply to Tsurutani et al.'s comment on "Storming the Bastille: the effect of electric fields on the ionospheric F-layer" by Rishbeth et al. (2010) // *Annales Geophysicae*, 2013, V. 31, doi:10.5194/angeo-31-151-2013.
93. Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Verkhoglyadova O.P., Lakhina G.S. Comment on "Storming the Bastille: the effect of electric fields on the ionospheric F-layer" by Rishbeth et al. (2010) // *Annales Geophysicae*, 2013, V. 31. doi:10.5194/angeo-31-145-2013.
94. Balan N., Otsuka Y., Nishioka M., Liu J.Y., Bailey G.J. Physical mechanisms of the ionospheric storms at equatorial and higher latitudes during the recovery phase of geomagnetic storms // *Journal of Geophysical Research*, 2013, V. 118, doi:10.1002/jgra.50275.
95. Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Lazutin L. L. TEC evidence for near-equatorial energy deposition by 30 keV electrons in the topside ionosphere // *Journal of Geophysical Research*, 2013, V. 118. doi:10.1002/jgra.50439.
96. Sato T. Morphology of ionospheric F2 disturbances in the polar regions. A linkage between polar patches and plasmaspheric drainage plumes // *Rep. Ionos. Res. Space Res. Jpn.*, 1959, V. 131, P. 91.
97. Knudsen W.C. Magnetospheric convection and the high-latitude F2 ionosphere // *Journal of Geophysical Research*, 1974, V. 79, No. 7, P. 1046–1055, doi:10.1029/JA079i007p01046.
98. Foster J.C., Coster A.J., Ericson P.J., Holt J.M., Lind F.D., Rideout W., McCready M., van Eyken A., Barnes R.J., Greenwald R.A., Rich F.J. Multiradar observations of the polar tongue of ionization // *Journal of Geophysical Research*, 2005, V. 110, A09S31, doi:10.1029/2004JA010928.
99. Burns A.G., Wang W., Killeen T.L., Solomon S.C. A "tongue" of neutral composition // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, V. 66, No. 15-16, P. 1457–1468, doi:10.1016/j.jastp.2004.04.009.
100. Liu J., Wang W., Burns A., Solomon S.C., Zhang S., Zhang Y., Huang C. Relative importance of horizontal and vertical transports to the formation of ionospheric storm-enhanced density and polar tongue of ionization // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 8121–8133, doi:10.1002/2016JA022882.
101. Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Постановка задачи и тестовые расчеты // *Математическое моделирование*, 2006, Т.18, №3, С. 77-92.

102. Klimentko M.V., Klimentko V.V., Karpachev A.T. Formation mechanism of additional layers above regular F2 layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 179–185, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.011.
103. Lynn K.J.W., Nanan B., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Karpachev A.T. Comment on “A study of the F2 layer stratification on ionograms using a simple model of TIDs” by Jiang et al // *Journal of Geophysical Research*, 2020, V. 125, e2019JA027575, doi:10.1029/2019JA027575.
104. Karpachev A.T., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Zhabankov G.A., Telegin V.A. Latitudinal structure of the equatorial F3 layer based on Intercosmos-19 topside sounding data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 77, P. 186–193, doi:10.1016/j.jastp.2011.12.018.
105. Karpachev A.T., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Kuleshova V.P. Statistical study of the F3 layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 121–128, doi: 10.1016/j.jastp.2013.01.010.
106. de Meneses F.C., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Alam Kherani E., Muralikrishna P., Xu Jiyao, Hasbi A.M. Electron temperature enhancements in nighttime equatorial ionosphere under the occurrence of plasma bubbles// *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 36–47, doi:10.1016/j.jastp.2013.04.003.
107. Karpachev A.T., Klimentko M.V., Klimentko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position // *Advances in Space Research*, 2019, V. 63, No. 2, P. 950–966, doi:10.1016/j.asr.2018.09.038.
108. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Science*, 1998, V. 33, No. 3, P. 565–582, doi:10.1029/97RS02707.
109. Yasyukevich Y., Yasyukevich A., Ratovsky K., Klimentko M., Klimentko V., Chirik N. Winter anomaly in NmF2 and TEC: when and where it can occur // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, V. 8, A45, doi:10.1051/swsc/2018036.
110. Klimentko M.V., Klimentko V.V., Karpachev A.T., Ratovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Intercosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI repro-

duction and GSM TIP model simulation // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2020–2032, doi:10.1016/j.asr.2014.12.032.

111. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Cherniak I.V., Galkin I.A. Longitudinal variation in the ionosphere-plasmasphere system at the minimum of solar and geomagnetic activity: investigation of temporal and latitudinal dependences // *Radio Science*, 2016, V. 51, P. 1864–1875, doi:10.1002/2015RS005900.

112. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Zakharenkova I.E., Yasyukevich Yu.V., Korenkova N.A., Cherniak Iu.V., Mylnikova A.A. Mid-latitude Summer Evening Anomaly (MSEA) in F2 layer electron density and Total Electron Content at solar minimum // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 9, P. 1951–1960, doi:10.1016/j.asr.2015.07.019.

113. Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V., Lukianova R.Yu. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // *Advances in Space Research*, 2017, V. 60, No. 2, P. 444–451, doi:10.1016/j.asr.2016.12.008.

114. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak Iu.V. The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2077–2085, doi:10.1016/j.asr.2014.06.027.

115. Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Rozanov E.V. The dependence of four-peak longitudinal structure of the tropical electric field on the processes in the lower atmosphere and geomagnetic field configuration // *Advances in Space Research*, 2019, V. 64, No. 10, P. 1854–1864, doi:10.1016/j.asr.2019.06.029.

116. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Cherniak Iu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // *Annales Geophysicae*, 2017, V. 35, P. 923–938, doi:10.5194/angeo-35-923-2017.

117. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geo-

magnetic storm on 17–23 March 2015 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, V. 180, P. 78–92, doi:10.1016/j.jastp.2017.12.017.

118. Klimenko M.V., Klimenko V.V. Disturbance dynamo, prompt penetration electric field and overshielding in the Earth's ionosphere during geomagnetic storm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90–91, December 2012, P. 146-155, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.018.

119. Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., Lukianova R.Y., & Cherniak I.V. Simulation and observations of the polar tongue of ionization at different heights during the 2015 St. Patrick's Day storm // *Space Weather*, 2019, V. 17, P. 1073–1089, doi:10.1029/2018SW002143.

120. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Zhang Y. E-region ionospheric storm on May 1–3, 2010: GSM TIP model representation and suggestions for IRI improvement // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2124-2130, doi:10.1016/j.asr.2014.08.003.

121. Suvorova A.V., Huang C.-M., Dmitriev A.V., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Tumanova Y.S. Effects of ionizing energetic electrons and plasma transport in the ionosphere during the initial phase of the December 2006 magnetic storm // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 5880–5896, doi:10.1002/2016JA022622.

122. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V.A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008 // *Journal of Geophysical Research*, 2017, V. 122, P. 2398–2423, doi:10.1002/2016JA023260.

123. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., Klimenko V.V., Vesnin A.M. Statistical Analysis and Interpretation of High-, Mid- and Low-Latitude Responses in Regional Electron Content to Geomagnetic Storms // *Atmosphere*, 2020, V. 11, P. 1308, doi:10.3390/atmos11121308.

124. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Vasilyev R.V., Klimenko V.V., Podlesnyi A.V. Vertical plasma transport in the ionosphere over Irkutsk during St. Patrick's Day geomagnetic storm: observations and modeling // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67(1), P. 122-132, doi:10.1016/j.asr.2020.10.021.

125. Klimenko V.V., Klimenko M.V. EEJ and EIA variations during modeling substorms with different onset moments // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56(9), P. 1982-1991, doi:10.1016/j.asr.2015.07.041.
126. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В., Чирик Н.В., Коренькова Н.А., Котова Д.С. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение // *Солнечно-земная физика*, 2018, Т. 4, №4, С. 32–42, doi:10.12737/stp-44201804.
127. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko, M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M. Modeling the effect of Sudden Stratospheric Warming within the thermosphere-ionosphere system // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 77–85, doi: 10.1016/j.jastp.2012.09. 005.
128. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Korenkova N.A., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M., Shcherbakov A., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Condor Patilongo P.J. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // *Journal of Geophysical Research*, 2012, V. 117, A10309, doi:10.1029/2012JA018018.
129. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Liu H., Goncharenko L. P., Tolstikov M.V. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models – first results // *Journal of Geophysical Research*, 2015, V. 120, P. 7873–7888, doi:10.1002/2014JA020861.
130. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Vasiliev P.A., Karpov I.V., Korenkov Yu.N., Zakharenkova I.E., Funke B., Rozanov E.V. Identification of the mechanisms responsible for anomalies in the tropical lower thermosphere/ionosphere caused by the January 2009 sudden stratospheric warming // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2019, V. 9, A39, doi: 10.1051/swsc/2019037.
131. Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // *Advances in Space Research*, 2003, V. 32, P. 863–868, doi:10.1016/S0273-1177(03)00416-2.
132. Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Korenkov Yu.N., Funke B., Zakharenkova I.E., Wissing J.M., Rozanov E.V. Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15-22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67, No. 1, P. 133–149, doi:10.1016/j.asr.2020.10.026.

133. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al. On Possible Causes of Positive Disturbance of Global Electronic Content during a Complex Heliogeophysical Event on September 2017 // *Cosmic Research*, 2021, V. 59, P. 456–462, doi:10.1134/S0010952521060046.
134. Ovodenko V.B., Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Oinats A.V., Kotova D.S., Nikolaev A.V. et al. Spatial and temporal evolution of different-scale ionospheric irregularities in Central and East Siberia during the 27–28 May 2017 geomagnetic storm // *Space Weather*, 2020, V. 18, e2019SW002378, doi:10.1029/2019SW002378.
135. Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 5, P. 900–906, doi:10.1016/j.asr.2015.05.017.
136. Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasyukevich Y.V., Klimenko M.V., Ratovsky K.G., Mylnikova A.A., Andreeva E.S., Kozlovsky A.E., Korenkova N.A., Nesterov I.A., & Tumanova Yu.S. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes // *GPS Solutions*, 2020, V. 24, P. 25, doi:10.1007/s10291-019-0936-x.
137. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Numerical Simulation of the Influence of the may 2–3, 2010 Geomagnetic Storm on HF Radio-Wave Propagation in the Ionosphere // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, V. 57, P. 467–477, doi:10.1007/s11141-014-9529-2.
138. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E., Ratovsky K.G., Nosikov I.A., Zhao B. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26–29, 2011 // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 9, P. 2012–2029, doi:10.1016/j.asr.2015.05.009.
139. Nosikov I.A., Bessarab P.F., Klimenko M.V. Method of Transverse Displacements Formulation for Calculating the HF Radio Wave Propagation Paths. Statement of the Problem and Preliminary Results // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, V. 59, P. 1–12, doi:10.1007/s11141-016-9670-1.
140. Nosikov I.A., Klimenko M.V., Bessarab P.F., Zbankov G.A. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere // *Advances in Space Research*, 2017, V. 60, No. 2, P. 491–497, doi:10.1016/j.asr.2016.12.003.
141. Nosikov I., Klimenko M., Zbankov G., Podlesnyi A., Ivanova V., Bessarab P.F. Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic Identification

of High and Low Rays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, V. 68, No. 1, 455–467, doi: 10.1109/TAP.2019.2938817.

142. Dobrokhotov S.Y., Klimenko M.V., Nosikov I.A., Tolchenkov A.A. Variational Method for Computing Ray Trajectories and Fronts of Tsunami Waves Generated by a Localized Source // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2020, V. 60, P. 1392–1401. doi:10.1134/S0965542520080072.

WEST DEPARTMENT OF PUSHKOV INSTITUTE OF TERRESTRIAL
MAGNETISM, IONOSPHERE AND RADIO WAVE PROPAGATION
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

As Manuscript

Klimenko Maxim Vladimirovich

Morphology and interpretation of spatio-temporal variations of ionospheric parameters under quiet conditions and during disturbances of various natures

Scientific specialization

1.6.18. Atmosphere and Climate science

Thesis for a Doctor degree in mathematical and physical sciences

Translation from Russian

Kaliningrad

2022

General Work Description

The urgency of the problem. The Earth's ionosphere is the plasma shell of our planet and the medium for radio waves propagation. The spatio-temporal distribution of various parameters (concentration, velocity, and temperature of neutral and charged particles) of the near-Earth space environment, in particular, the electron density, has a significant effect on the conditions for the propagation of radio signals through the ionosphere. Thus, the Earth's ionosphere affects the operation of communication systems of space, aircraft and sea vessels, over-the-horizon radar and global navigation systems (including the Russian GLONASS satellite positioning system). The currently existing empirical and numerical physical and mathematical models of the ionosphere used as environment models when solving problems of radio wave propagation do not accurately describe the parameters of the environment, especially during periods of various magnetospheric (geomagnetic storms and substorms) and atmospheric disturbances. This also applies to the commonly used international reference model of the ionosphere IRI (International Reference Ionosphere). The increase in the rate of growth of programs for the development of the Arctic, the emerging growth in the use of high latitudes for the transport of passengers by air, and the tense foreign political situation make the reliability of HF radio communications and air defense radio physical systems one of the most important problems. To ensure reliable and uninterrupted radio communication, it is necessary to solve the problem of describing the behavior of environmental parameters under specific helio-geophysical conditions and in specific regions. In practice, it is necessary to foresee those, sometimes catastrophic, changes in the parameters of the ionosphere that occur during periods of disturbances and lead to disruption, and sometimes to the complete disappearance of radio communications. Therefore, the study of ionospheric effects during geomagnetic storms and atmospheric disturbances is an urgent scientific and applied problem of modern ionospheric plasma physics. The study of solar-terrestrial relations and the influence of processes in the lower (at altitudes from the Earth's surface up to 10–30 km) and middle (at altitudes from 30 to 80 km) atmosphere on the behavior of the parameters of the upper atmosphere (at altitudes from 80 to ~1000 km) are an integral part of the currently rapidly developing new direction of applied science - space weather, aimed at studying and monitoring the state of interplanetary and near-Earth space.

The purpose of the dissertation work is to study and subsequent interpretation the spatio-temporal features of the distribution of electron density in the F-region and the topside ionosphere using the methods of mathematical modeling under quiet conditions and during periods of various space weather phenomena and dramatic variations in the parameters of the middle atmosphere.

To achieve this goal, I solved the following **tasks**:

1. Modification of the module for calculating electric fields previously developed by the applicant in the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP) by using various methods of setting the input parameters of the model in the form of field-aligned currents and/or cross polar cap potential in relation to the description of various considered phenomena.

2. Development and approbation of the problem statement for modeling the thermospheric-ionospheric response to geomagnetic disturbances (geomagnetic substorms and storms) based on the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP).

3. Creation of global, regional and local empirical ionosphere models, suitable for identifying and further interpreting of the formation mechanisms of the main features of the electron density distribution in the ionosphere F-region.

4. Implementation of verification and modification of scientific ideas about the thermospheric-ionospheric response to geomagnetic storms and identification of regularities in the behavior of the thermosphere-ionosphere system parameters after the end of a geomagnetic storm.

5. Combining the models of the middle and upper atmosphere, and as a result, creating a model of the entire atmosphere. Carrying out model studies of atmospheric-ionospheric interaction during periods of sudden stratospheric warming and solar proton events.

6. Research into the role of electric fields and thermospheric wind in the formation of additional layers in the equatorial ionosphere.

Practical Significance

The spatio-temporal distributions of ionospheric parameters obtained from the calculation results on the modified GSM TIP model can later be used and have already been repeatedly used as a description of the medium in solving problems of radio wave propagation and deceleration of low-flying satellites during periods of various types of disturbances. Such a

joint use of environment models and models for calculating HF radio paths and ray trajectories will make it possible to create a set of programs for the rapid assessment of the optimal frequency and angular characteristics of ray trajectories necessary for effective radio communication and radar in various regions of Russia and the world.

Current State of Research

The quality of any empirical model depends both on the quality and volume of the experimental material, and on the approach to developing empirical dependences of some observed parameters from others. The main problem in the development of a global empirical model of any upper atmosphere parameter, to a greater or lesser extent, is the insufficient amount of observational data. The empirical reference model of the ionosphere IRI (International Reference Ionosphere) [1, 2] describes the climatic state of the ionosphere and has been successfully used in solving scientific and applied problems for more than 50 years. Studies have shown that the IRI model, on average, gives good results in reproducing ionospheric parameters in quiet conditions at mid-latitudes. The URSI and CCIR options of the IRI model, developed to calculate the parameters of the F2-layer maximum, are mainly based on observational data from ground-based ionospheric sounding stations and on a limited amount of satellite data [3, 4]. The most significant recent modifications of the IRI model, as well as models based on it, describe the behavior of the F2-layer peak height and electron density in the E-region of the high-latitude ionosphere [5; 6]. Empirical models of the electron density in the high-latitude region, including the area of the main ionospheric trough, are also being developed, which is not best represented in the IRI model [7, 8]. It is important to note that the currently existing empirical models of the middle and upper atmosphere, which are used as models of the environment in solving various applied problems, are climatic and do not accurately describe the parameters of the environment during periods of various heliospheric, atmospheric, meteorological and magnetospheric disturbances [9; 10]. In this regard, the creation and modification of hybrid and interconnected self-consistent models of the upper atmosphere is an urgent, priority applied and scientific problem in the field of space weather.

Hybrid (assimilative) models of the upper atmosphere can be divided into two classes, the first of which is based on empirical models, while the second is based on theoretical models. For example, the IRTAM model uses data from a network of vertical ionospheric sounding stations provided by GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory) [11] and a non-linear error compensation technique to correct the CCIR coefficients of the IRI model [12].

Thus, IRTAM, using the advantages of the empirical IRI model, makes it possible to move from the description of the F-region of the ionosphere in terms of space climate to its description in terms of space weather. There are also assimilation procedures using the IRI model and absolute values of the total electron content (TEC) [13]. These procedures require extensive testing. It should be taken into account that the data arrays by which the models can be corrected in real time are rather limited and changeable. That is why the development and creation of numerical models of the near-Earth space is still an important scientific and applied task.

At present, there are a number of numerical models of the ionosphere developed in our country [14–17] and abroad [18–20]. In all these models, such characteristics of the near-Earth environment as the ionospheric conductivity, electric field, composition, thermal regime, and dynamics of the neutral atmosphere are input parameters, that is, they are set on the basis of various empirical models. Unlike the models of the ionosphere mentioned above, in such models as the GSM TIP (Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere) [21-23], UAM (Upper Atmosphere Model) [24], CTIPe (The Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics model) [25], TIME GCM (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere-Electrodynamics General Circulation Model) [26], GITM (Global Ionosphere-Thermosphere Model) [27], GAIA (Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model) [28], composition, the thermal regime and dynamics of the neutral atmosphere and ionosphere are calculated in a self-consistent manner. The GAIA and TIME GCM models include the lower, middle and upper atmosphere, however, they consider the ionosphere in a limited range of heights, that is, they have an upper boundary. At the same time, it should be noted that the TIME GCM model does not take into account the horizontal transfer of the charged component of the ionospheric plasma, which makes the ionospheric block of this model not entirely correct. The GITM model solves a system of hydrodynamic equations for the neutral component, including equations for the vertical velocities of all neutral particles, and for charged particles, a diffusion formulation of the problem with an upper boundary at an altitude of 600 km is implemented. A distinctive feature of the GSM TIP, UAM, and CTIPe models is the self-consistent description of the plasmaspheric parameters and the electric field of ionospheric and magnetospheric origin. At present, one of the topical problems in the physics of near-Earth space plasma is the creation of a correct global model of the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere of the Earth, taking into account a self-consistent description of

the magnetic and electric fields. The solution of this problem will make it possible to take into account the most important physical processes and, in principle, may make it possible to describe the real behavior of near-Earth outer space. Steps in this direction are already being taken. In particular, in the USA a consortium of several institutes is working on the IDEA (Unified Dynamics in the Earth's Atmosphere) project. The main goals of this project are to connect the atmospheric model (WAM) with the ionosphere-plasmasphere-electrodynamics (IPE) model and study the response of the ionosphere to the impacts associated with solar activity and processes in the lower atmosphere [29]. In parallel, the integration of the TIE-GCM and WACCM-X models at the Upper Atmosphere Observatory (HAO NCAR) continues [30]. The developed model can be used to study the behavior of the thermosphere and ionosphere and to support the ICON and GOLD space missions. Also under development is the Canadian Ionosphere and Atmospheric Model (C-IAM) [31]. The model is a combination of an extended version of the Canadian Mid-Atmosphere Model (CMAM) and the Upper Atmosphere Model (UAM).

The problem of the interaction of the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere with the ionosphere seems to be a very important scientific problem for understanding the variability of the ionospheric plasma. One example of fairly regular dramatic events in the stratosphere (at altitudes of 30-40 km) is a sudden stratospheric warming. In principle, some mechanisms of the relationship between the middle atmosphere and the thermosphere, and, consequently, the ionosphere, are currently known [32], but the details of the physical processes of atmosphere-ionosphere coupling during stratospheric warming remain insufficiently understood [33]. Stratospheric warming's are accompanied by an increase in wave activity, in particular, an increase in planetary waves and a change in the intensity of internal gravity waves, which can cause changes in the ionosphere [34–39]. Using the TIME-GCM [39] and WAM (Whole Atmosphere Model) [40, 41] models, it was shown that planetary waves can modify diurnal and semidiurnal tides and, consequently, the electric dynamo field and vertical plasma drift, especially at low latitudes. A striking manifestation of the above was the 2009 stratospheric warming, during which an increase in the equatorial anomaly was observed in the morning hours and its weakening in the afternoon with the corresponding behavior of the vertical electromagnetic plasma drift at the equator [34]. Note that in the model calculations presented in [35], the values of the dynamo electric field variations were insufficient, while the results of the calculations in [41] showed values of the

vertical drift near the geomagnetic equator that are closer to the experiment, however, the ionospheric effects from the obtained plasma drift in this case were not considered. Differences between theoretical and experimental data can be caused both by the ambiguous choice of model input data and by a simplified description of some physical processes. It should be noted that almost all recent theoretical studies have been aimed at explaining the response of the low-latitude ionosphere to stratospheric warming. However, as observational data has shown, stratospheric warming occurring at high latitudes leads to a global change in thermospheric–ionospheric parameters, and not only to changes at low latitudes [36, 42].

In recent decades, the question of the existence of additional layers in the equatorial ionosphere has been on the agenda from time to time. One of the first experimental evidence of the stratification of the equatorial F2 layer of the ionosphere is considered by Sen [43]. Jenkins et al. [44] formulated evidence that the observed stratification of the F-region cannot be a consequence of traveling ionospheric disturbances caused by atmospheric gravity waves. Evidence of the existence of this phenomenon based on observational data from ground-based ionospheric sounding, incoherent scatter radars, and satellite sounding of the ionosphere was presented in many papers (see review [45]). However, to date, there are a number of unresolved problems regarding the characteristics of additional layers observed by various instruments. In the first works on modeling the stratification of the equatorial F2-layer, the possibility of its reproduction on simple numerical models was shown, and it was suggested that the stratification of the equatorial F2-layer is related to the formation of the equatorial anomaly [46]. The subsequent results of numerical models [47, 48] showed that the stratification of the equatorial F2-layer and the appearance of an additional F3-layer in the morning and near noon hours are associated with the combined action of the nonstationary meridional electromagnetic plasma drift, photoionization, and diffusion processes. According to the results of the data analysis from satellite and ground-based observations, the F3-layer can also appear at other hours of local time [49, 50]. A detailed explanation of the reasons for the formation of the F3-layer in the evening and night hours is not yet available.

The main processes occurring in near-Earth space environment, which are responsible for ionospheric-plasmaspheric disturbances, are now well known. At the same time, the global structure of the ionosphere-plasmasphere system has not yet been studied well enough. In particular, the question of the contribution of the plasmasphere to the global distribution of the total electron content has not yet been resolved, although its solution is very important for

refining positioning using single-frequency GLONASS/GPS signal receivers. Such studies began to be actively carried out immediately after the launch of the GNSS navigation system. Most previous studies have estimated the contribution of the plasmasphere to the total electron content only for a limited region of longitudes and latitudes [51–53]. There are only a small number of studies that attempted to solve this problem on a global scale [54-56]. However, so far there has not been a single study in which an estimate of the contribution of the plasmasphere to the global distribution of the total electron content would be obtained based on the results of model calculations and observational data. In addition, studies of changes in the plasmaspheric contribution to the total electron content during various disturbances have not been carried out at all.

One of the main properties of the Earth's ionosphere is its longitudinal variability, the study of which is currently receiving much attention. This is due to the fact that longitudinal variations in ionospheric parameters are comparable in magnitude with diurnal variations and are important for predicting radio wave propagation. The first sufficiently complete studies of longitudinal variations in the electron density N_e were carried out using data from the Ariel 1 and 3 satellites at their fly by heights [57]. Longitudinal variations in the parameters of the F2-layer over the entire range of latitudes were first identified using data from the Interkosmos-19 (IK-19) satellite. However, longitudinal anomalies in various latitudinal regions still remain unexplored to the end. A distinctive feature of the auroral ionosphere is the existence, under certain conditions, of the main ionospheric trough - a trough in the latitudinal variation of the electron concentration at the heights of the F-region [58]. Morphological features of longitudinal variations of the main ionospheric trough have been studied and presented in [59, 60], while the reasons for these variations have not been studied enough. Another striking confirmation of the insufficient knowledge of longitudinal anomalies in the ionosphere is the Weddell Sea anomaly. At the mid-latitude ionospheric stations Halley Bay and Argentine Island, located in the southern hemisphere, the anomalous behavior of the critical frequency of the F2-layer, f_oF_2 , was detected quite a long time ago in the period December–February, when the nighttime f_oF_2 values exceeded the daytime values [61, 62]. This effect has been called the Weddell Sea Anomaly. The spatial characteristics of the Weddell Sea anomaly were studied using various satellite data [63, 64] and it was shown that anomalous diurnal variations in the electron density are observed only in a certain region of longitudes from November to February [65, 66]. The question arises about the presence of a similar anomaly in the northern

hemisphere. Mamrukov [67] was the first to describe the anomalous diurnal variations in f_oF_2 from the data of the Yakutsk ionospheric station. An attempt to identify the region of the Yakutsk anomaly was made using the data of the COSMIC radio occultation experiment for the solar activity minimum [65]. Questions about the nature and formation mechanisms of the Weddell Sea anomaly and the Yakutsk anomaly, their dependence on solar activity, and the vertical structure of these anomalies remain unresolved.

One of the large-scale features of the mid-latitude ionosphere is the winter anomaly, which consists in the fact that the daytime values of the F2-layer peak electron density at the same levels of solar activity are greater in winter than in summer [68, 69]. Pioneer works in this area are papers [70–72], in which the global structure of the winter anomaly was identified on a limited dataset, and it was shown that the main reason for the formation of the winter anomaly in the F2-layer is seasonal changes in the neutral composition of the thermosphere. According to Rishbeth et al. [72], at a fixed geographic latitude, the winter anomaly is more developed in the near to geomagnetic pole longitudinal sector, and less developed in the far-to-pole longitudinal sector. This explanation of the longitudinal variation of the winter anomaly was successfully reproduced in the results of calculations of the CTIP model [73]. However, an analysis of the results presented in [74] indicates that we need to test the absolute reliability of this theory.

Longitudinal variations of the ionosphere over the equator were first identified using data from the Intrkosmos-19 (IK-19) satellite [75–77]. 3rd and 4th harmonics were detected in the longitudinal variations of ionospheric parameters above the equator. According to the concept of four peak structure, which has recently become very popular [78–81], longitudinal variations in the parameters of the equatorial ionosphere are formed by tidal waves coming from the lower atmosphere. Tides at the heights of the E-layer modulate the electric field, which, through the vertical electromagnetic drift, affects the diurnal and longitudinal distribution of plasma at the heights of the F2-layer [78-79].

For study the ionospheric responses to geomagnetic storms the main phase of the storm are usually considered, since the most intense ionospheric disturbances occurred during this period [82–84]. There are a number of reviews that describe the main processes in the thermosphere-ionosphere system during geomagnetic storms [82, 83, 85, 86]. According to the sign of disturbances in the electron density of the F-region, it is customary to distinguish positive and negative ionospheric storms, the appearance of which is explained by various

chains of processes in the magnetosphere-ionosphere-thermosphere system. Negative disturbances of the electron density in the F-region during the main phase of the storm and at the initial stages of the recovery phase of geomagnetic storms are one of the most studied phenomena [82]. The question of the formation mechanisms of a positive ionospheric storm and the conditions for its appearance in the main phase of a geomagnetic storm remains unresolved. According to Prolss [82], Namgaladze et al. [87], Balan et al. [88, 89], the appearance of an additional thermospheric wind toward the equator during the main phase of the storm is sufficient to generate a positive ionospheric storm at middle and low latitudes in the daytime. Heelis et al. [90] concluded that the expansion of the magnetospheric convection area towards the equator during strong geomagnetic storms leads to an increase in the daytime total electron content at middle and low latitudes. A lively discussion of the formation mechanisms of daytime positive ionospheric storms [91–93] did not reveal a unified point of view on this issue. According to [93], the explanation of a positive ionospheric storm requires a combination of direct penetration of the magnetospheric convection electric field to low latitudes, expansion of the area of the magnetospheric convection electric field influence on the low-latitude ionosphere, and thermospheric wind disturbances. Obviously, this statement needs clarification. Which of the proposed mechanisms is the main one in the formation of positive ionospheric storms that exist for several hours during the main phase of a geomagnetic storm? In addition to answering this question, it is also necessary to clarify the special-temporal boundaries of the influence both each of the above-mentioned formation mechanisms of positive ionospheric storms, and other mechanisms such as changes in the neutral composition and ionosphere-plasmosphere coupling. In addition, positive ionospheric disturbances during the recovery phase of geomagnetic storms represent the least studied aspect of the upper atmosphere response to geomagnetic storms, which was revealed and began to be studied only during recent years [94, 95]. The behavior of the ionosphere at the later stages of the recovery phase and after the end of the geomagnetic storm has practically not been studied at all. As for the high-latitude ionosphere, in one of the first studies of the winter Arctic ionosphere, Sato [96] revealed in the distribution of the critical frequency of the F2-layer a region of increased ionospheric plasma density, which extends through the polar cap from the dayside to the nightside. The morphological effect of antisolar plasma transport through the polar caps was called by Sato [96] and Knudsen [97] as the tongue of ionization. According to Foster et al. [98], the probability of the tongue of ionization appearance increases during geomagnetic

storms, when the rates of thermal plasma horizontal transport increase sharply due to electromagnetic drift at the F-region heights of the high-latitude ionosphere. It is important to note the formation of a "neutral tongue" during a geomagnetic storm, which was observed by Burns et al. [99] and modeled by Liu et al. [100]. These studies have shown that such a structure ("neutral tongue") is mainly formed due to advection to the pole of neutral particles from mid-latitudes. The advection is explained by electromagnetic ion drift and more frequent ion-neutral collisions. Additional studies are required to clarify the influence of the thermosphere-ionosphere coupling on the structure of the ionization tongue.

Brief Description of the Results Obtained by the Applicant

Previously, a new simulation block of the electric fields and zonal currents in the Earth's ionosphere was developed in the GSM TIP model [23, 101]. In this block, the reduction of the three-dimensional modeling equation describing the conservation law of the total current density in the Earth's ionosphere to a two-dimensional form is carried out by its integration over the thickness of the current-conducting ionospheric layer along the geomagnetic field lines. The use of a new block for calculating electric fields allow to correctly describe the behavior of the electric field at the geomagnetic equator. The global distributions of the ionospheric electric potential obtained in GSM TIP model simulations are in satisfactory agreement with the results of model calculations by other authors.

Based on the calculation results of the modified upper atmosphere model (GSM TIP), an explanation was given for the formation mechanisms of the sunset and nighttime F3-layer. The F3-layer observed under quiet conditions at night can be formed by vertical electromagnetic plasma drift, which is inhomogeneous in height [A1, A2][102, 103]. According to topside sounding data from the Interkosmos-19 (IK-19) satellite, the morphological features of the additional F3-layer manifestation in the equatorial ionosphere were studied. Sounding data from the IK-19 satellite showed that the F3-layer is formed between the crests of the equatorial anomaly at any moments of local time [A3, A4][104, 105]. The diurnal and longitudinal variations of the F3-layer and the equatorial anomaly are completely determined by the diurnal and longitudinal variations of the vertical electromagnetic plasma drift in the vicinity of the geomagnetic equator. The F3-layer, according to satellite data, is located symmetrically with respect to the geomagnetic equator with a maximum occurrence probability in the vicinity of the equator. The appearance probability of the F3-layer weakly depends on the season. It was found that, according to

topside sounding data, the F3-layer is observed mainly in the daytime and in the evening, but sometimes it is also recorded in the post-midnight-morning hours [A4][105].

Studies carried out using various models have confirmed that the main mechanism for the generation of plasma bubbles is the appearance of a latitude-longitude region in which the vertical electromagnetic plasma drift changes its direction [A5][106]. It was concluded that the increase in electron temperature observed in some experiments in the equatorial ionosphere does not affect the generation of plasma bubbles. The phenomenon of overheating inside plasma bubbles can be formed due to convective flows of hot electrons from the overheated region at the base of the F-region, arising due to the same mechanisms that form plasma bubbles.

Based on the analysis of observational data and model studies, new data were obtained on the morphological features and formation mechanisms of longitudinal and diurnal variations (anomalies) of the electron density (electron density at the F2-layer maximum, N_mF2 , and the total electron content, TEC) at different latitudes. The term “ionospheric anomaly” means any deviation from the Chapman layer theory [68], i.e. deviations from the inverse dependence of the electron density at the F2-layer maximum on the solar zenith angle χ .

On the basis of satellite data, the morphological features of longitudinal variations in the position of the Main Ionospheric Trough (MIT) were studied [A6, A7][7, 107]. It is shown that the longitudinal effect in the position of the MIT is a stable phenomenon in any geophysical conditions. The average amplitude of longitudinal variations in the position of the MIT during the daytime is greater than at night. For the first time, based on statistical data processing, it was possible to clearly distinguish between the MIT and the high-latitude trough (inside the auroral oval) in both hemispheres at high solar activity in the morning. At low solar activity in the morning: the MIT and the high-latitude trough are not clearly distinguished; the scatter of the data and the amplitude of the longitudinal effect are smaller. Model studies based on the GSM TIP [A7][107] have shown that, at low solar activity, the longitudinal variations in the position of the MIT during the daytime are mainly determined by the longitudinal variations in the ionization function, which arise due to the longitudinal variations in the solar zenith angle and the longitudinal distribution of the atomic oxygen density. Dynamic processes do not have a significant effect on the longitudinal effect in the position of the daytime MIT. The formation of longitudinal variations in the nighttime MIT is associated with the

longitudinal effect of ionization by high-energy precipitating particles, the composition of the neutral atmosphere, and the high-latitude electric field.

To analyze the winter anomaly in N_mF2 , we used the data published in [74], as well as data from radio occultation observations from the COSMIC, CHAMP, and GRACE satellites for 2001–2015. To analyze the winter anomaly in the TEC, the global ionospheric maps (GIM) of the TEC of the JPL laboratory [108] were used. As a value characterizing the degree of development (or intensity) of the winter anomaly, we used the ratio of the midday values of TEC and N_mF2 averaged over the winter period to the midday values averaged over the summer period, i.e. winter/summer ratio for noon. An analysis of observational data indicates that the winter/summer ratio is significantly higher in the Northern Hemisphere than in the Southern one. This conclusion differs from the results presented in [68], where the proposed anomaly formation mechanism leads to the same character of the winter anomaly development in the Northern and Southern hemispheres. The highest winter/summer ratio is observed in the North American longitudinal sector in the Northern Hemisphere and in the Australian sector in the Southern Hemisphere, which is consistent with the mechanism proposed in [68]. The lowest winter/summer ratio for the Northern Hemisphere is observed in the East European sector, which is inconsistent with the mechanism proposed in [68], according to which the lowest ratio is expected in the East Siberian sector. Thus, the Rishbeth theory only partially explains the longitudinal variation of the winter anomaly (the winter anomaly minimum in the European region and the local maximum in the East Siberian region cannot be explained on the basis of this theory) [A8][109]. Comparison of the features of the winter anomaly manifestation in N_mF2 and TEC showed that the main regularities of the winter anomaly (geographical position and change with solar activity) for these parameters coincide. However, the winter anomaly in TEC is noticeably less developed than in N_mF2 . At high values of solar and geomagnetic activity, the amplitude of the winter anomaly increases.

Based on the unique data bank of the Interkosmos-19 satellite, the adequacy of the description of longitudinal variations in the electron density at subauroral latitudes, obtained on the basis of the numerical GSM TIP model calculation results and the IRI empirical model, was verified [A9, A10][110, 111]. The common nature of the ionospheric anomalies such as Weddell Sea anomaly (WSA), the mid-latitude summer evening anomaly, and the Yakutsk anomaly (YA), when the summer values of the critical frequency of the ionosphere F2-layer, f_oF2 , at night (evening) time are higher than during the day [A9, A11][110, 112], was proved.

Based on the observational data of the IK-19 satellite and the model calculation results, the spatial regions of the Weddell Sea and Yakutsk anomalies formation were identified. The main formation mechanism of the above mentioned anomalies is the vertical plasma transport along the magnetic field lines under the influence of the thermospheric wind (in this case, the horizontal plasma transport due to the $E \times B$ drift and the distribution of the neutral composition of the thermosphere are of secondary importance [A9-A11][110-112]). The plasmasphere has an insignificant effect on the formation of Yakutsk and Weddell Sea ionospheric anomalies, which are formed ahead of time in the topside ionosphere compared to the F2-layer. Observational data show that the altitude range of 250-500 km makes the main contribution to ground-based observations of the Weddell Sea anomaly in the total electron content. The seasonal dependence of longitudinal variations of the electron density at the maximum of the F2-layer, N_mF2 , and the total electron content, TEC, at a number of mid-latitude stations in the Northern hemisphere is considered based on the calculation results obtained using the GSM TIP model and measurement data of the ground-based network of signal receivers of the navigation satellite system GPS, ionosondes and incoherent scatter radars in 2009 [A11, A12][112, 113]. It is shown that the summer mid-latitude evening anomaly in the diurnal variation of the TEC manifests itself less noticeably and at earlier hours compared to its manifestation in N_mF2 . In contrast to the formation of this anomaly in N_mF2 in Irkutsk and Kaliningrad, in the total electron content, the anomalous diurnal variation in summer exists only over Irkutsk. An analysis of the model calculation results made it possible to draw the following conclusion: the longitudinal variations in N_mF2 at middle latitudes are formed by changes in the composition of the thermosphere and dynamic processes in the ionosphere associated with the thermospheric wind; longitudinal TEC variations weakly depend on changes in the neutral composition of the thermosphere and are determined mainly by dynamic processes.

Based on the analysis of the results of the whole atmosphere (EAGLE) and upper atmosphere (GSM TIP) models for January 2009, it was shown that the atmosphere-ionosphere coupling plays a key role in the formation of the longitudinal structure and the spatio-temporal behavior of the low-latitude ionosphere parameters. The pre-reversal enhancement of the eastward electric field and the 4-peak structure of the longitudinal variation of the zonal electric field in the equatorial region are formed due to the atmosphere-ionosphere coupling [A13][114].

A global (for all latitudes and longitudes) study of the plasmasphere contribution to the total electron content (TEC) for the winter conditions of 2009 at solar activity minimum was carried out based on the results of model calculations and satellite observation data. It has been shown that the plasmasphere contribution to the total electron content can exceed the ionosphere contribution, especially at night during the solar activity minimum [A10, A14][111, 115]. The maximum plasmasphere contribution to the TEC (up to 85%), according to the results of numerical calculations, is observed at night near the equator and exceeds the ionospheric contribution. The plasmasphere contribution to the TEC during the daytime does not exceed ~40%, which agrees with the results of previous studies [52]. At middle and equatorial latitudes, the plasmasphere contribution can increase during a geomagnetic storm by 20–25%. The response of N_mF2 and TEC to geomagnetic disturbances can differ significantly, up to the sign of the disturbance [A15, A16][116, 117]. The midlatitude ionosphere is more variable during the main storm phase than the plasmasphere. It is shown that TEC and $foF2$ disturbances during geomagnetic storms are similar, but not identical. At the same latitude, TEC and $foF2$ disturbances can have different signs at the same time, which means that it is impossible to describe TEC disturbances based only on $foF2$ disturbances. The simultaneous appearance of $foF2$ and TEC disturbances of different signs during a geomagnetic storm is associated with the underfilling of plasma tubes, a change in the height scale due to heating of electrons in the topside ionosphere, and a decrease in the role of variations in the composition of the neutral atmosphere with altitude.

A problem statement and scenarios for studying the response of the thermosphere-ionosphere system to geomagnetic storms [A15-A24][10, 116-124] and substorms [A25][125] using the upper atmosphere model (GSM TIP) have been developed. On the basis of this model, studies were carried out and the interpretation of the regularities identified from the observational data was carried out. Based on the interpretation of observational data using the results of calculations on the GSM TIP model, it has been shown that during a geomagnetic storm (on average), due to the redistribution of the neutral composition of the thermosphere, a band of negative disturbances is formed in the high-latitude F2-layer of the ionosphere, and a band of positive disturbances is formed in the low-latitude F2-layer [A15, A16, A18, A23][10, 116, 117, 123]. According to the results of [A21, A22, A24][121, 123, 124], positive ionospheric disturbances at middle and low latitudes are formed due to: 1) the effects of electric fields at the initial stage of geomagnetic storm development; 2) plasma rise by the

thermospheric wind in the time interval of 1-3 hours after the onset of the storm; 3) increase in the $n(\text{O})/n(\text{N}_2)$ ratio in the time interval 4-12 hours after the storm beginning. Based on the simulation results, it was concluded that the structure of high-latitude $n(\text{N}_2)$ density disturbances and the thermospheric wind have a significant effect on the structure of the ionization tongue during geomagnetic storms [A19][119].

With the direct participation of the applicant, a statistical analysis of the geomagnetic storm ionospheric effects was carried out [A23][123]. All geomagnetic storms were divided into four types: isolated (the time interval between neighboring storms is more than 5 days); non-insulated (the specified interval does not exceed 5 days); weak ($\text{Dst} > -100$ nT) and strong ($\text{Dst} \leq -100$ nT). In each group, storms were divided by season: winter (December-February); spring (March-May); summer (June-August) and autumn (September-November). Statistical analysis of isolated storms confirmed the hypotheses about the formation of positive disturbances in the electron density during the main phase of a geomagnetic storm due to the transfer of oxygen from auroral latitudes towards the equator.

During the recovery phase of the storm at subauroral and middle latitudes, positive disturbances of the electron density are formed during the day due to an increase in the $n(\text{O})/n(\text{N}_2)$ ratio, and at night, negative effects are formed due to the underfilling of plasma tubes resulting from their depletion during the main phase of the storm. An increase in the $n(\text{O})/n(\text{N}_2)$ ratio leads to the appearance of daytime positive aftereffects in $N_m\text{F}_2$ and TEC at middle latitudes on days 2-5 after the end of geomagnetic storms [A15, A16][116, 117]. In the total electron content, this effect is much weaker than in $fo\text{F}_2$. This is explained by the underfilling of the plasmasphere after the end of the geomagnetic storm and by the fact that the composition of the neutral atmosphere has a much greater effect on the F-region of the ionosphere than on the electron density at high altitudes. The positive aftereffect was confirmed statistically and its seasonal dependence was revealed [103, A23][123, 126].

With the direct participation of the applicant for setting the problems of the thermosphere-ionosphere system response to sudden stratospheric warming's [A26-A29][127-130] the upper atmosphere (GSM TIP) and whole atmosphere (EAGLE) models were used for investigations. The purpose of these works was: 1) to study the global response of the thermosphere-ionosphere system to sudden stratospheric warming; 2) reproduction and further interpretation of the recorded behavior of the equatorial anomaly during sudden stratospheric warmings in 2008 and 2009. In the first idealized formulation of the problem, the parameters of

interaction between the lower atmosphere, mesosphere, and lower thermosphere (MLT) were specified in the form of global distributions of T_n and neutral gas density at the lower boundary of the GSM TIP model (80 km). To take into account the effects of stratospheric warming at the lower boundary of the GSM TIP, two variants of boundary conditions were used: 1. superposition of the background values of the parameters of the lower atmosphere model COMMA-LIM [131] and perturbations in the form of a planetary wave (PW) with a zonal number of 1 and amplitude values $\Delta T_n \sim \pm 20$ K at geographic latitude 60° ; 2. values of thermospheric parameters calculated in the TIME-GCM model [39] at an altitude of 80 km. Perturbations T_n given on the lower boundary of the model lead to negative foF_2 perturbations almost over the entire globe. This result agrees with the data of COSMIC observations during the January 2008 and 2009 warmings presented in [36]. Based on the analysis of the calculation results on the Earth's upper atmosphere model (GSM TIP), it was shown that the cause of negative ionospheric disturbances at auroral and middle latitudes during sudden stratospheric warmings is a decrease in the O/N_2 ratio due to heating of the upper thermosphere [A26, A27][127, 128]. The calculation results obtained with the combined use of the GSM TIP and TIME-GCM models reproduce some features of the low-latitude ionosphere behavior that are qualitatively similar to those observed, such as, for example, an increase in the plasma upward (downward) drift in the morning (afternoon), but the magnitude and occurrence time perturbations in model calculations differ significantly from observational data. Further, an additional electric potential was set in such a way as to obtain a zonal electric field that causes a vertical electromagnetic drift with velocities observed in Jicamarca during the stratospheric warming. At the same time, it was possible to obtain TEC disturbances qualitatively and quantitatively close to the observations in the model. The studies performed prove that changes in the zonal electric field (vertical plasma drift) are the key mechanism of the response of the low-latitude ionosphere to sudden stratospheric warmings [A28][129].

An analysis of the calculation results on the EAGLE whole-atmosphere model and observational data made it possible to identify cooling in the tropical lower thermosphere caused by stratospheric warming [A29][130]. It is shown that the temperature disturbances with maximum cooling in the lower thermosphere during warming significantly affect thermospheric winds and ionospheric conductivities, which is important for the generation of dynamo electric field disturbances at heights of the ionospheric E-region (100–120 km). Based on the results of EAGLE model calculations and observational data, a response to the sudden

stratospheric warming in 2009 was revealed in the form of a post-sunset increase and a pre-sunrise decrease in the total electron content in the low-latitude ionosphere. It is shown that in the after sunset hours stratospheric warming affects the total electron content at low latitudes through perturbations of the meridional electric field.

Statements of the problem and scenarios for studying the response of the thermosphere-ionosphere system to proton events [A30, A31][132, 133] using the models of the upper atmosphere (GSM TIP) and the entire atmosphere (EAGLE) have been developed. On the basis of these models, studies were carried out and the interpretation of the regularities revealed from the observational data was carried out. Despite the relative transparency of the thermosphere for high-energy protons, in numerical experiments on the EAGLE whole-atmosphere model, an ionospheric response to solar proton events and proton precipitation from the magnetotail was obtained [A30][132]. The maximum positive perturbations of TEC and electron density were noted in the E-region of the high-latitude region. These positive TEC disturbances are explained not only by direct ionization by precipitating protons, but also by the associated heating of electrons in the ionosphere, which leads to an increase in the electron scale height in the topside ionosphere and plasmasphere. It is shown that at the heights of the F2-layer of the ionosphere, positive disturbances due to increased fluxes of solar and magnetospheric protons are formed in the low-latitude region due to the generation of dynamic processes in the stratosphere and mesosphere, which cause equatorial transport of atomic oxygen.

Empirical models of the ionosphere [A9, A10, A12, A20, A32][110, 111, 113, 120, 134] and methods of their adaptation [A33, A34][135, 136] have been developed and verified. A model of the Main Ionospheric Trough (MIT) [A6][7] was created with the direct participation of the applicant, developed on the basis of satellite data. The model of the main ionospheric trough was created in two stages: first, a model of the position of the trough minimum was built, and then, taking into account this position, the spatial distribution of f_oF_2 in the MIT region was constructed. The need for such an approach is dictated by the strong dependence of the dip minimum position on local time and longitude. To build the ionospheric trough model, data from the Kosmos-900, Interkosmos-19, and CHAMP satellites were used. For the solar activity minimum (2004–2009, $F_{10.7} < 100$), we used direct probe measurements of N_e on the CHAMP low-orbit satellite (~8000 orbits). The measurement data at the height of the CHAMP satellite were reduced to the height of the F2-layer maximum. The model is posted on the IZMIRAN website <http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/>. Under the

guidance of the applicant, a global empirical model of the ionosphere was developed based on radio occultation observations [A8][109]. Testing of the adaptation method of the empirical ionosphere models according to the measurement data of the slant total electron content showed that the use of the technique (in this specific implementation) allows improving the accuracy of object positioning by radar stations only for some seasons [A34][136]. The impossibility of reproducing the structure of the main ionospheric trough by standard empirical models (IRI and NeQuick) leads to the fact that the correction efficiency of these models is the worst in winter at high and subauroral latitudes.

Under the guidance of the applicant, the medium models were combined with the model for calculating the radio waves propagation [A35, A36][137, 138], based on the solution of the eikonal equation. This made it possible to study the influence of geomagnetic storms on changes in the characteristics of HF radio paths in a three-dimensionally inhomogeneous anisotropic ionosphere. Also, under the guidance of the applicant, algorithms for calculating HF radio paths based on Fermat's variational principle for the functional of the radio beam optical length [A37-A39][139-141] were developed and implemented. It is shown that the global optimization method based on the successive search for extrema of various types (minima and saddle points of the first type) of the radio beam phase path functional makes it possible to efficiently and quickly find a family of solutions in inhomogeneous media in the form of single-hop paths (upper and lower radio beams), as well as waveguide solutions. The modified global optimization method developed for solving problems of radio wave propagation has found its application for solving the applied problem of calculating tsunami waves [A40][142].

The Following Provisions Are Put Forward for Defense:

1. Developed scenarios and implemented problem statements for studying and interpreting the observed response of the thermosphere-ionosphere system to geomagnetic storms [A15-A24][10, 116-124], substorms [A25][125], proton events [A30, A31][132, 133], sudden stratospheric warmings [A26-A29][127-130] using numerical models.

2. The results of research and testing of ways to eliminate some of the existing problems that arise when solving applied problems of radio communication, navigation and radar using empirical, numerical and assimilation models of the environment [A6, A8-A10,

A12, A20, A32-A34][7, 109-111, 113, 120, 134-136] and models for calculating radio paths [A35-A40][137-142].

3. Results of refinement of existing, and in some cases, identification and interpretation of new morphological features of the spatio-temporal distribution of the electron concentration at the heights of the F-region, topside ionosphere and plasmasphere at different latitudes in quiet conditions [A1-A4, A6-A11, A14][7, 102-105, 107, 109-112, 115].

4. Modified (based on the interpretation of observational data using the upper atmosphere model and the results of statistical analysis) the general scenario of processes that occur in the thermosphere-ionosphere system at various phases of the geomagnetic storm and after it [A15, A16, A18, A19, A21-A24][10, 116, 117, 119, 121-124]. The daily positive ionospheric effect of the aftereffect of a geomagnetic storm was revealed, statistically confirmed and interpreted [A15, A16, A23][116, 117, 123].

5. Numerical experiments on models of the upper atmosphere and the entire atmosphere, which made it possible to identify, interpret and evaluate the role of the effects of solar proton events, proton precipitation from the magnetotail and quasi-trapped electrons from radiation belts in the formation of the global ionospheric response to geomagnetic storms [A21, A22, A30, A31][121, 122, 132, 133].

6. The identified cause of negative ionospheric disturbances at auroral and middle latitudes during sudden stratospheric warming's, namely, a decrease in the O/N₂ concentration ratio due to heating of the upper thermosphere [A26, A27][127, 128], while changes in the zonal electric field (vertical plasma drift) are a key mechanism in the response of the low-latitude ionosphere to sudden stratospheric warming's [A28, A29][129, 130].

List of Author's Publications

- A1. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T. Formation mechanism of additional layers above regular F2 layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 179–185, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.011.
- A2. Lynn K.J.W., Nanan B., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T. Comment on “A study of the F2 layer stratification on ionograms using a simple model of TIDs” by Jiang et al // *Journal of Geophysical Research*, 2020, V. 125, e2019JA027575, doi:10.1029/2019JA027575.
- A3. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zhabankov G.A., Telegin V.A. Latitudinal structure of the equatorial F3 layer based on Intercosmos-19 topside sounding data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 77, P. 186–193, doi:10.1016/j.jastp.2011.12.018.
- A4. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Kuleshova V.P. Statistical study of the F3 layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 121–128, doi: 10.1016/j.jastp.2013.01.010.
- A5. de Meneses F.C., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Alam Kherani E., Muralikrishna P., Xu Jiyao, Hasbi A.M. Electron temperature enhancements in nighttime equatorial ionosphere under the occurrence of plasma bubbles// *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 36–47, doi:10.1016/j.jastp.2013.04.003.
- A6. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, V. 146, P. 149–159, doi:10.1016/j.jastp.2016.05.008.
- A7. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position // *Advances in Space Research*, 2019, V. 63, No. 2, P. 950–966, doi:10.1016/j.asr.2018.09.038.
- A8. Yasyukevich Y., Yasyukevich A., Ratovsky K., Klimenko M., Klimenko V., Chirik N. Winter anomaly in NmF2 and TEC: when and where it can occur // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, V. 8, A45, doi:10.1051/swsc/2018036.
- A9. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., Ratovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Intercosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI

reproduction and GSM TIP model simulation // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2020–2032, doi:10.1016/j.asr.2014.12.032.

A10. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Cherniak I.V., Galkin I.A. Longitudinal variation in the ionosphere-plasmasphere system at the minimum of solar and geomagnetic activity: investigation of temporal and latitudinal dependences // *Radio Science*, 2016, V. 51, P. 1864–1875, doi:10.1002/2015RS005900.

A11. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Zakharenkova I.E., Yasyukevich Yu.V., Korenkova N.A., Cherniak Iu.V., Mylnikova A.A. Mid-latitude Summer Evening Anomaly (MSEA) in F2 layer electron density and Total Electron Content at solar minimum // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 9, P. 1951–1960, doi:10.1016/j.asr.2015.07.019.

A12. Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V., Lukianova R.Yu. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // *Advances in Space Research*, 2017, V. 60, No. 2, P. 444–451, doi:10.1016/j.asr.2016.12.008.

A13. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak Iu.V. The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2077–2085, doi:10.1016/j.asr.2014.06.027.

A14. Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Rozanov E.V. The dependence of four-peak longitudinal structure of the tropical electric field on the processes in the lower atmosphere and geomagnetic field configuration // *Advances in Space Research*, 2019, V. 64, No. 10, P. 1854–1864, doi:10.1016/j.asr.2019.06.029.

A15. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Cherniak Iu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // *Annales Geophysicae*, 2017, V. 35, P. 923–938, doi:10.5194/angeo-35-923-2017.

A16. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-

plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, V. 180, P. 78–92, doi:10.1016/j.jastp.2017.12.017.

A17. Klimenko M.V., Klimenko V.V. Disturbance dynamo, prompt penetration electric field and overshielding in the Earth's ionosphere during geomagnetic storm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90–91, December 2012, P. 146–155, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.018.

A18. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P. Numerical modeling of the global ionospheric effects of storm sequence on September 9–14, 2005 - comparison with IRI model // *Earth, Planets and Space*, 2012, V. 64, No. 6, P. 433–440, doi:10.5047/eps.2011.06.048.

A19. Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., Lukianova R.Y., & Cherniak I.V. Simulation and observations of the polar tongue of ionization at different heights during the 2015 St. Patrick's Day storm // *Space Weather*, 2019, V. 17, P. 1073–1089, doi:10.1029/2018SW002143.

A20. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Zhang Y. E-region ionospheric storm on May 1–3, 2010: GSM TIP model representation and suggestions for IRI improvement // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2124–2130, doi:10.1016/j.asr.2014.08.003.

A21. Suvorova A.V., Huang C.-M., Dmitriev A.V., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Tumanova Y.S. Effects of ionizing energetic electrons and plasma transport in the ionosphere during the initial phase of the December 2006 magnetic storm // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 5880–5896, doi:10.1002/2016JA022622.

A22. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V.A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008 // *Journal of Geophysical Research*, 2017, V. 122, P. 2398–2423, doi:10.1002/2016JA023260.

A23. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., Klimenko V.V., Vesnin A.M. Statistical Analysis and Interpretation of High-, Mid- and Low-Latitude Responses in Regional Electron Content to Geomagnetic Storms // *Atmosphere*, 2020, V. 11, P. 1308, doi:10.3390/atmos11121308.

- A24. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Vasilyev R.V., Klimenko V.V., Podlesnyi A.V. Vertical plasma transport in the ionosphere over Irkutsk during St. Patrick's Day geomagnetic storm: observations and modeling // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67(1), P. 122-132, doi:10.1016/j.asr.2020.10.021.
- A25. Klimenko V.V., Klimenko M.V. EEJ and EIA variations during modeling substorms with different onset moments // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56(9), P. 1982-1991, doi:10.1016/j.asr.2015.07.041.
- A26. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko, M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M. Modeling the effect of Sudden Stratospheric Warming within the thermosphere-ionosphere system // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 77–85, doi: 10.1016/j.jastp.2012.09. 005.
- A27. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Korenkova N.A., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M., Shcherbakov A., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Condor Patilongo P.J. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // *Journal of Geophysical Research*, 2012, V. 117, A10309, doi:10.1029/2012JA018018.
- A28. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Liu H., Goncharenko L. P., Tolstikov M.V. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models – first results // *Journal of Geophysical Research*, 2015, V. 120, P. 7873–7888, doi:10.1002/2014JA020861.
- A29. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Vasiliev P.A., Karpov I.V., Korenkov Yu.N., Zakharenkova I.E., Funke B., Rozanov E.V. Identification of the mechanisms responsible for anomalies in the tropical lower thermosphere/ionosphere caused by the January 2009 sudden stratospheric warming // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2019, V. 9, A39, doi: 10.1051/swsc/2019037.
- A30. Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Korenkov Yu.N., Funke B., Zakharenkova I.E., Wissing J.M., Rozanov E.V. Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15-22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67, No. 1, P. 133–149, doi:10.1016/j.asr.2020.10.026.
- A31. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al. On Possible Causes of Positive Disturbance of Global Electronic Content during a Complex Heliogeophysical Event on

September 2017 // Cosmic Research, 2021, V. 59, P. 456–462, doi:10.1134/S0010952521060046.

A32. Ovodenko V.B., Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Oinats A.V., Kotova D.S., Nikolaev A.V. et al. Spatial and temporal evolution of different-scale ionospheric irregularities in Central and East Siberia during the 27–28 May 2017 geomagnetic storm // Space Weather, 2020, V. 18, e2019SW002378, doi:10.1029/2019SW002378.

A33. Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // Advances in Space Research, 2015, V. 56, No. 5, P. 900–906, doi:10.1016/j.asr.2015.05.017.

A34. Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasyukevich Y.V., Klimenko M.V., Ratovsky K.G., Mylnikova A.A., Andreeva E.S., Kozlovsky A.E., Korenkova N.A., Nesterov I.A., & Tumanova Yu.S. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes // GPS Solutions, 2020, V. 24, P. 25, doi:10.1007/s10291-019-0936-x.

A35. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Numerical Simulation of the Influence of the may 2–3, 2010 Geomagnetic Storm on HF Radio-Wave Propagation in the Ionosphere // Radiophysics and Quantum Electronics, 2014, V. 57, P. 467–477, doi:10.1007/s11141-014-9529-2.

A36. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E., Ratovsky K.G., Nosikov I.A., Zhao B. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26–29, 2011 // Advances in Space Research, 2015, V. 56, No. 9, P. 2012–2029, doi:10.1016/j.asr.2015.05.009.

A37. Nosikov I.A., Bessarab P.F., Klimenko M.V. Method of Transverse Displacements Formulation for Calculating the HF Radio Wave Propagation Paths. Statement of the Problem and Preliminary Results // Radiophysics and Quantum Electronics, 2016, V. 59, P. 1–12, doi:10.1007/s11141-016-9670-1.

A38. Nosikov I.A., Klimenko M.V., Bessarab P.F., Zbankov G.A. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere // Advances in Space Research, 2017, V. 60, No. 2, P. 491–497, doi:10.1016/j.asr.2016.12.003.

A39. Nosikov I., Klimenko M., Zbankov G., Podlesnyi A., Ivanova V., Bessarab P.F. Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic

Identification of High and Low Rays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, V. 68, No. 1, 455–467, doi: 10.1109/TAP.2019.2938817.

A40. Dobrokhotov S.Y., Klimenko M.V., Nosikov I.A., Tolchenkov A.A. Variational Method for Computing Ray Trajectories and Fronts of Tsunami Waves Generated by a Localized Source // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2020, V. 60, P. 1392–1401. doi:10.1134/S0965542520080072.

List of Cited Literature

1. Rawer K., Bilitza D., Ramakrishnan S. Goals and Status of the International Reference Ionosphere // *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1978, V. 16, P. 177–181, doi:10.1029/RG016i002p00177.
2. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, V. 4, No. A07, doi:10.1051/swsc/2014004.
3. Jones W.B., Gallet R.M. The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods // *J. Research Nat. Bureau Stand.-D. Radio Propag.*, 1962, V. 66D, No. 4, P. 419–438.
4. Fox M.W., McNamara L.F. Improved World-Wide Maps of Monthly Median foF2 // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1988, V. 50, No. 12, P. 1077–1086, doi:10.1016/0021-9169(88)90096-7.
5. Badin V.I., Deminov M.G., Deminov R.G., Shubin V.N. E-layer critical frequency median model for auroral region // *Solar Terrestrial Physics*, 2013, V. 22, P. 24–26.
6. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather*, 2017, V. 15, P. 418–429, doi:10.1002/2016SW001593.
7. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // *J Atmos Sol-Terr Phys.*, 2016, V. 146, P. 149–159, doi:10.1016/j.jastp.2016.05.008.
8. Themens D.R., Jayachandran P.T., Galkin I., Hall C. The Empirical Canadian High Arctic Ionospheric Model (E-CHAIM): NmF2 and hmF2 // *Journal of Geophysical Research*, 2017, V. 122, No. 8, P. 9015–9031, doi:10.1002/2017JA024398.
9. Pavlov A.V., Pavlova N.M. Comparison of modeled electron densities and electron and ion temperatures with Arecibo observations during undisturbed and geomagnetic storm periods of 7–11 September 2005 // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A03301, doi:[10.1029/2010JA016067](https://doi.org/10.1029/2010JA016067).
10. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P. Numerical modeling of the global ionospheric effects of storm sequence on September 9-14, 2005 - comparison

with IRI model // *Earth, Planets and Space*, 2012, V. 64, No. 6, P. 433–440, doi:10.5047/eps.2011.06.048.

11. Reinisch B.W., Galkin I.A. Global ionospheric radio observatory // *Earth, Planets and Space*, 2011, V. 63, No. 4, P. 377–381, doi:10.5047/eps.2011.03.001.

12. Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // *Radio Science*, 2012, V. 47, RS0L07, doi:10.1029/2011RS004952.

13. Maltseva O., Mozhaeva N., Poltavsky O., Zhbakov G. Use of TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances // *Advances in Space Research*, 2012, V. 49, No. 6, P. 1076–1087, doi:10.1016/j.asr.2012.01.005.

14. Mingalev V.S., Krivilev V.N., Yevlashina M.L., Mingaleva G.I. Numerical modeling of the high-latitude F-layer anomalies // *Pure and Applied Geophysics*, 1988, V. 127, No. 2, P. 323–334, doi:10.1007/BF00879815.

15. Uvarov V.M., Baracskov P.D., Zakharova A.P. Model of polar ionosphere with taking into account of interplanetary medium. 1. Effect of azimuthally component of IMF // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1992, V. 32, No. 3, P. 70–77. (in Russian)

16. Tashchilin A.V., Romanova E.B. The role of electromagnetic drift in the formation of the polar hole // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2001, T. 41, № 2, C. 211–216.

17. Pavlov A.V. New method in computer simulations of electron and ion densities and temperatures in the plasmasphere and low-latitude ionosphere // *Annales Geophysicae*, 2003, V. 21, No. 7, P. 1601–1628, doi:10.5194/angeo-21-1601-2003.

18. Schunk R.W. A mathematical model of the middle and high latitude ionosphere // *Pure and Applied Geophysics*, 1988, V. 127, P. 255–303, doi:10.1007/BF00879813.

19. Bailey G.J., Balan N., Su Y.Z. The Sheffield University plasmasphere ionosphere model – a review // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, V. 59, No. 13, P. 1541–1552, doi:10.1016/S1364-6826(96)00155-1.

20. Huba J.D., Joyce G., Fedder J.A. SAMI2 (Sami2 is Another Model of the Ionosphere): A New Low-latitude Ionosphere Model // *Journal of Geophysical Research*, 2000, V. 105, P. 23,035–23,053, doi:10.1029/2000JA000035.

21. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. A global numerical model of the thermosphere, ionosphere and protonosphere of the Earth // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1990, V. 30, No. 4, P. 612-619.

22. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M., Bessarab F.S., Surotkin V.A. Calculated and observed ionospheric parameters for a Magion 2 passage and EISCAT data on July 31, 1990 // *Journal of Geophysical Research*, 1998, V. 103, No. A7, P. 14697–14710, doi:10.1029/98JA00210.
23. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bruykanov V.V. Numerical Simulation of the Electric Field and Zonal Current in the Earth's Ionosphere: The Dynamo Field and Equatorial Electrojet // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2006, V. 46, P. 457–466, doi:10.1134/S0016793206040074.
24. Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N. Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1996, V. 36, No. 2, P. 89-95.
25. Millward G.H., Müller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Fuller-Rowell T.J., Richmond A.D., Moffett R.J. An investigation into the influence of tidal forcing on F region equatorial vertical ion drift using a global ionosphere-thermosphere model with coupled electrodynamics // *Journal of Geophysical Research*, 2001, V. 106, No. A11, P. 24733–24744, doi:10.1029/2000JA000342.
26. Richmond A.D., Ridley E.C., Roble R.G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics // *Geophys. Res. Lett.*, 1992, V. 6, P. 601–604.
27. Ridley A.J., Deng Y., Tóth G. The global ionosphere-thermosphere model // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, V. 68, No. 8, P. 839–864, doi:10.1016/j.jastp.2006.01.008.
28. Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., Mukhtarov P., Fujiwara H., Shinagawa H. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations // *Journal of Geophysical Research*, 2012, V. 117, A10323, doi:10.1029/2012JA017650.
29. Wang H., Akmaev R.A., Fang T.-W., Fuller-Rowell T.J., Wu F., Maruyama N., Iredell M.D. First forecast of a sudden stratospheric warming with a coupled whole-atmosphere/ionosphere model IDEA // *Journal of Geophysical Research*, 2014, V. 119, P. 2079–2089, doi:10.1002/2013JA019481.
30. Pedatella N.M., Fang T.-W., Jin H., Sassi F., Schmidt H., Chau J.L., Siddiqui T.A., Goncharenko L. Multimodel comparison of the ionosphere variability during the 2009 sudden

stratosphere warming // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 7204–7225, doi:10.1002/2016JA022859.

31. Martynenko O.V., Fomichev V.I., Semeniuk K., Beagley S.R., Ward W.E., Namgaladze A.A., McConnell J.C. Physical mechanisms responsible for forming the 4-peak longitudinal structure of the 135.6 nm ionospheric emission: first results from the Canadian IAM // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, V. 120, P. 51–61, doi:10.1016/j.jastp.2014.08.014.

32. Danilov A.D., Kazimirovsky E.S., Vergasova G.V., Khachikyan G.Ya., *Meteorologicheskie effekty v ionosfere (Meteorological Effects in the Ionosphere)*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987.

33. Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H.L. Equatorial and Low Latitude Ionospheric Effects During Sudden Stratospheric Warming Events // *Space Science Reviews*, 2011, doi:10.1007/s11214-011-9797-5.

34. Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warming on equatorial ionization anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2010, V. 115, A00G07, doi:10.1029/2010JA015400.

35. Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J. Unexpected connection between the stratosphere and ionosphere // *Geophysical Research Letters*, 2010, V. 37, L10101, doi:10.1029/2010GL043125.

36. Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, V. 73, No. 13, P. 1697 – 1702, doi:10.1016/j.jastp.2011.03.006.

37. Altadill D., Apostolov E.M., Sole J.G., Jacobi C. Origin and development of vertical propagating oscillations with periods of planetary waves in the ionospheric of F region // *Physics and Chemistry of the Earth. Part C*, 2001, V. 26, No. 6, P. 387–393, doi:10.1016/S1464-1917(01)00019-8.

38. Danilov A.D., Vanina L.B. Relation between parameters of stratosphere and ionospheric F2 layer // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 2004, V. 4, No. 3, P. 237–250.

39. Liu H.-L., Wang W., Richmond A.D., Roble R.G. Ionospheric variability due to planetary waves and tides for solar minimum conditions // *Journal of Geophysical Research*, 2010, V. 115, A00G07, P. 1–13, doi: 10.1029/2009JA015188.

40. Fuller-Rowell T., Wang H., Akmaev R., Wu F., Fang T.W., Iredell M., Richmond A.D. Forecasting the dynamic and electrodynamic response to the January 2009 sudden stratospheric warming // *Geophysical Research Letters*, 2011, V. 38, L13102, doi:10.1029/2011GL047732.
41. Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., Fang T.W., Araujo-Pradere E. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics // *Journal of Geophysical Research*, 2010, V. 115, A00G08, doi:10.1029/2010JA015524.
42. Yue X., Schreiner W.S., Lei J., Rocken C., Hunt D.C., Kuo Y.-H., Wan W. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event // *J. Geophys. Res.*, 2010, V. 115, A00G09, doi:10.1029/2010JA015466.
43. Sen H.Y. Stratification of the F2 layer of the ionosphere over Singapore // *Journal of Geophysical Research*, 1949, V. 54, No. 4, P. 363–366, doi:10.1029/JZ054i004p00363.
44. Jenkins B., Bailey G.J., Abdu M.A., Batista I.S., Balan N. Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil // *Annales Geophysicae*, 1997, V. 15, No. 6, P. 753–759, doi:10.1007/s00585-997-0753-3.
45. Klimenko M.V., Zhao B., Karpachev A.T., Klimenko V.V. Stratification of the low-latitude and near-equatorial F2 layer, topside ionization ledge, and F3 layer: What we know about this? A review // *International Journal of Geophysics*, 2012, P. 1–22, doi:10.1155/2012/938057.
46. Huang C. A certain behavior of the ionospheric F_2 region at low latitudes // *Radio Science*, 1974, V. 9, No. 5, P. 519–532, doi:10.1029/RS009i005p00519.
47. Surotkin V.A., Namgaladze A.A., Kolomijtsev O.P. Modelling of the diurnal development of the equatorial ionospheric F2-region bifurcations // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1985, V. 25, No. 3, P. 394-399.
48. Balan N., Batista I.S., Abdu M.A., MacDougall J., Bailey G.J. Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere // *Journal of Geophysical Research*, 1998, V. 103, No. A12, P. 29169–29182, doi:10.1029/98JA02823.
49. Depuev V.H., Pulinetz S.A. Intercosmos-19 observations of an additional topside ionization layer: The F3-layer // *Advances in Space Research*, 2001, V. 27, P. 1289–1292, doi:10.1016/S0273-1177(01)00205.

50. Zhao B., Wan W., Reinisch B., Yue X., Le H., Liu J., Xiong B. Features of the F3 layer in the low-latitude ionosphere at sunset // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A01313, doi:10.1029/2010JA016111.
51. Lunt N., Kersley L., Bailey G.J. The influence of the protonosphere on GPS observations: Model simulations // *Radio Science*, 1999, V. 34, No. 3, P. 725–732, doi:10.1029/1999RS900002.
52. Balan N., Otsuka Y., Tsugawa T., Miyazaki S., Ogawa T., Shiokawa K. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity // *Earth, Planets and Space*, 2012, V. 54, P. 71–79, doi:10.1186/BF03352423.
53. Belehaki A., Jakowski N., Reinisch B.W. Plasmaspheric electron content derived from GPS TEC and digisonde ionograms // *Advances in Space Research*, 2004, V. 33, No. 6, P. 833–837, doi:10.1016/j.asr.2003.07.008.
54. Yizengaw E., Moldwin M.B., Galvan D., Iijima B.A., Komjathy A., Mannucci A.J. Global plasmaspheric *TEC* and its relative contribution to GPS *TEC* // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, V. 70, P. 1541–1548, doi:10.1016/j.jastp.2008.04.022.
55. Cherniak Iu.V., Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I. Plasmaspheric electron content derived from GPS *TEC* and FORMOSAT-3/COSMIC measurements: Solar minimum condition // *Advances in Space Research*, 2012, V. 50, 427–440, doi:10.1016/j.asr.2012.04.002.
56. Lee H.B., Jee G., Kim Y.H., Shim J.S. Characteristics of global plasmaspheric *TEC* in comparison with the ionosphere simultaneously observed by Jason-1 satellite // *Journal of Geophysical Research*, 2013, V. 118, P. 935–946, doi:10.1002/jgra.50130.
57. Eccles D., King J.W., Rothwell P. Longitudinal variations of the mid-latitude ionosphere produced by neutral-air winds—II Comparisons of the calculated variations of electron concentration with data obtained from the Ariel I and Ariel III satellites // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1971, V. 33, No. 3, P. 371–377, doi:10.1016/0021-9169(71)90142-5.
58. Muldrew D.B. F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // *Journal of Geophysical Research*, 1965, V. 70, No. 11, P. 2635–2650, doi:10.1029/JZ070i011p02635.
59. Deminov M.G., Karpachev A.T. Longitudinal effect in the main ionospheric trough configuration. I. Trough position // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1986, V. 26(1), P. 63–68.

60. Deminov M.G., Karpachev A.T. Longitudinal effect in the main ionospheric trough configuration. 2. Trough shape // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1986, V. 26(4), P. 682-684.
61. Bellchambers W.H., Piggott W.R. Ionospheric measurements made at Halley Bay // *Nature*, 1958, V. 182, P. 1596–1597, doi:10.1038/1821596a0.
62. Penndorft R. The average ionospheric conditions over the Antarctic in *Geomagnetism and Aeronomy* // *Antarctic Research Series*, V. 4, AGU. Washington DC, 1965, P. 1–45.
63. Horvath I., Essex E.A. The Weddell Sea Anomaly observed with the TOPEX satellite data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, V. 65, P. 693–706, doi:10.1016/S1364-6826(03)00083-X.
64. Jee G., Burns A.G., Kim Y.H., Wang W. Seasonal and solar activity variations of the Weddell Sea Anomaly observed in the TOPEX total electron content measurements // *Journal of Geophysical Research*, 2009, V. 114, A04307, doi:10.1029/2008JA013801.
65. Lin C.H., Liu J.Y., Cheng C.Z., Chen C.H., Liu C.H., Wang W., Burns A.G., Lei J. Three-dimensional ionospheric electron density structure of the Weddell Sea Anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2009, V. 114, A02312, doi:10.1029/2008JA013455.
66. Karpachev A.T., Gasilov N.A., Karpachev O.A. Morphology and causes of the Weddell Sea Anomaly // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, V. 51(6), P. 828–840.
67. Mamrukov A.P. Evening anomalous enhancement of ionization in F region // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1971, V. 21(6), P. 984–988.
68. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, V. 60, P. 1385–1402, doi:10.1016/S1364-6826(98)00062-5.
69. Burns A.G., Wang W., Qian L., Solomon S.C., Zhang Y., Paxton L.J., Yue X. On the solar cycle variation of the winter anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2014, V. 119, doi:10.1002/2013JA019552.
70. Torr M.R., Torr D.G. The seasonal behaviour of the F2-layer of the ionosphere // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1973, V. 35, P. 2237–2251, doi:10.1016/0021-9169(73)90140-2.
71. Torr D.G., Torr M.R., Richards P.G. Causes of the F region winter anomaly // *Geophysical Research Letters*, 1980, V. 7, No. 5, P. 301–304, doi:10.1029/GL007i005p00301.
72. Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., Zou L., Fuller-Rowell T.J., Millward G.H., Moffett R.J., Idenden D.W., Aylward A.D. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-

layer: II: Physical discussion // *Annales Geophysicae*, 2000, V. 18, No. 8, P. 945-956, doi:10.1007/s00585-000-0945-6.

73. Zou L., Rishbeth H., Møller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Millward G.H., Fuller-Rowell T.J., Idenden D.W., Moffett R.J. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: I. Modelling // *Annales Geophysicae*, 2000, V. 18, P. 927–944, doi:10.1007/s00585-000-0927-8.

74. Pavlov A.V., Pavlova N.M. Variations in statistical parameters of the NmF2 winter anomaly with latitude and solar activity // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, V. 52, P. 335–343, doi:10.1134/S0016793212030127.

75. Kochenova N.A. Longitudinal variations of the equatorial ionosphere according to Intercosmos-19 data // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1987, V. 27, P. 142–144. (in Russian)

76. Karpachev A.T. Characteristics of the global longitudinal effect in the night-time equatorial anomaly // *Geomagnetism and Aeronomy*, 1988, V. 28, P. 46–49.

77. Deminova G.F. Fine structure of foF2 longitudinal distribution in the night-time low-latitude ionosphere derived from Intercosmos-19 topside sounding data // *Advances in Space Research*, 2003, V. 31, No. 3, P. 531–536, doi:10.1016/S0273-1177(03)00037-1.

78. England S.L., Immel T.J., Sagawa E., Henderson S.B., Hagan M.E., Mende S.B., Frey H.U., Swenson C.M., Paxton L.J. Effect of atmospheric tides on the morphology of the quiet time, postsunset equatorial ionospheric anomaly // *Journal of Geophysical Research*, 2006, V. 111, A10S19, doi:10.1029/2006JA011795.

79. England S.L., Maus S., Immel T.J., Mende S.B. Longitudinal variation of the E-region electric fields caused by atmospheric tides // *Geophysical Research Letters*, 2006, V. 33, L21105, doi:10.1029/2006GL027465.

80. Oberheide J., Forbes J.M., Zhang X., Bruinsma S.L. Wave-driven variability in the ionosphere-thermosphere-mesosphere system from TIMED observations: what contributes to the “wave 4”? // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A01306, doi:10.1029/2010JA015911.

81. Pedatella N.M., Forbes J.M., Maute A., Richmond A.D., Fang T.-W., Larson K.M., Millward G. Longitudinal variations in the F region ionosphere and the topside ionosphere-plasmasphere: Observations and model simulations // *Journal of Geophysical Research*, 2011, V. 116, A12309, doi:10.1029/2011JA016600.

82. Prolss G.W. Ionospheric F-region storms / In Handbook of Atmospheric Electrodynamics. V. 2. Ed. by Volland H. Boca Raton. CRC Press, 1995, P. 195–248.
83. Buonsanto M.J. Ionospheric storms: A review // Space Science Review, 1999, V. 88, doi:10.1023/A:1005107532631.
84. Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // Reviews of Geophysics, 2006, V. 44, RG4001, doi:10.1029/2005RG000193.
85. Mayr H.G., Harris I., Spencer N.W. Some properties of upper atmosphere dynamics // Reviews of Geophysics, 1978, V. 16, doi:10.1029/RG016i004p00539.
86. Prolss G.W. Ionospheric Storms at Mid-Latitude: A Short Review / Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances. Eds. by Kintner P.M., Coster A.J., Fuller-Rowell T., Mannucci A.J., Mendillo M., Heelis R. Geophysical Monograph Series, 181. Washington, DC: American Geophys. Union, 2013, doi:10.1029/181GM03.
87. Namgaladze A.A., Förster M., Yurik R.Y. Analysis of the positive ionospheric response to a moderate geomagnetic storm using a global numerical model // Annales Geophysicae, 2000, V. 18, doi:10.1007/s00585-000-0461-8.
88. Balan N., Alleyne H., Otsuka Y., Vijaya Lekshmi D., Fejer B.G., McCrea I. Relative effects of electric field and neutral wind on positive ionospheric storms // Earth, Planets and Space, 2009, V. 61, No. 4, P. 439–445, doi:10.1186/BF03353160.
89. Balan N., Shiokawa K., Otsuka Y., Kikuchi T., Vijaya Lekshmi D., Kawamura S., Yamamoto M., Bailey G. J. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes // Journal of Geophysical Research, 2010, V. 115, A02304, doi:10.1029/2009JA014515.
90. Heelis R.A., Sojka J.J., David M., Schunk R.W. Stormtime density enhancements in the middle latitude dayside ionosphere // Journal of Geophysical Research, 2009, V. 114, A03315, doi:10.1029/2008JA013690.
91. Rishbeth H., Heelis R.A., Makela, J. J., and Basu, S.: Storming the Bastille: the effect of electric fields on the ionospheric F-layer // Annales Geophysicae, 2010, V. 28, P. 977–981, doi:10.5194/angeo-28-977-2010.
92. Heelis R.A., Makela J.J., Basu S. Reply to Tsurutani et al.'s comment on "Storming the Bastille: the effect of electric fields on the ionospheric F-layer" by Rishbeth et al. (2010) // Annales Geophysicae, 2013, V. 31, doi:10.5194/angeo-31-151-2013.

93. Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Verkhoglyadova O.P., Lakhina G.S. Comment on “Storming the Bastille: the effect of electric fields on the ionospheric F-layer” by Rishbeth et al. (2010) // *Annales Geophysicae*, 2013, V. 31. doi:10.5194/angeo-31-145-2013.
94. Balan N., Otsuka Y., Nishioka M., Liu J.Y., Bailey G.J. Physical mechanisms of the ionospheric storms at equatorial and higher latitudes during the recovery phase of geomagnetic storms // *Journal of Geophysical Research*, 2013, V. 118, doi:10.1002/jgra.50275.
95. Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Lazutin L. L. TEC evidence for near-equatorial energy deposition by 30 keV electrons in the topside ionosphere // *Journal of Geophysical Research*, 2013, V. 118. doi:10.1002/jgra.50439.
96. Sato T. Morphology of ionospheric F2 disturbances in the polar regions. A linkage between polar patches and plasmaspheric drainage plumes // *Rep. Ionos. Res. Space Res. Jpn.*, 1959, V. 131, P. 91.
97. Knudsen W.C. Magnetospheric convection and the high-latitude F2 ionosphere // *Journal of Geophysical Research*, 1974, V. 79, No. 7, P. 1046–1055, doi:10.1029/JA079i007p01046.
98. Foster J.C., Coster A.J., Ericson P.J., Holt J.M., Lind F.D., Rideout W., McCready M., van Eyken A., Barnes R.J., Greenwald R.A., Rich F.J. Multiradar observations of the polar tongue of ionization // *Journal of Geophysical Research*, 2005, V. 110, A09S31, doi:10.1029/2004JA010928.
99. Burns A.G., Wang W., Killeen T.L., Solomon S.C. A “tongue” of neutral composition // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, V. 66, No. 15-16, P. 1457–1468, doi:10.1016/j.jastp.2004.04.009.
100. Liu J., Wang W., Burns A., Solomon S.C., Zhang S., Zhang Y., Huang C. Relative importance of horizontal and vertical transports to the formation of ionospheric storm-enhanced density and polar tongue of ionization // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 8121–8133, doi:10.1002/2016JA022882.
101. Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bruykanov V.V. Numerical modeling of electric field and zonal current in the Earth’s ionosphere – Statement of the problem and test calculations // *Matematicheskoye Modelirovaniye*, 2006, V. 18, P. 77–92. (In Russian)
102. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T. Formation mechanism of additional layers above regular F2 layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 179–185, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.011.

103. Lynn K.J.W., Nanan B., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Karpachev A.T. Comment on “A study of the F2 layer stratification on ionograms using a simple model of TIDs” by Jiang et al // *Journal of Geophysical Research*, 2020, V. 125, e2019JA027575, doi:10.1029/2019JA027575.
104. Karpachev A.T., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Zhabankov G.A., Telegin V.A. Latitudinal structure of the equatorial F3 layer based on Intercosmos-19 topside sounding data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 77, P. 186–193, doi:10.1016/j.jastp.2011.12.018.
105. Karpachev A.T., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Kuleshova V.P. Statistical study of the F3 layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 121–128, doi: 10.1016/j.jastp.2013.01.010.
106. de Meneses F.C., Klimentko M.V., Klimentko V.V., Alam Kherani E., Muralikrishna P., Xu Jiyao, Hasbi A.M. Electron temperature enhancements in nighttime equatorial ionosphere under the occurrence of plasma bubbles// *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, V. 103, P. 36–47, doi:10.1016/j.jastp.2013.04.003.
107. Karpachev A.T., Klimentko M.V., Klimentko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position // *Advances in Space Research*, 2019, V. 63, No. 2, P. 950–966, doi:10.1016/j.asr.2018.09.038.
108. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Science*, 1998, V. 33, No. 3, P. 565–582, doi:10.1029/97RS02707.
109. Yasyukevich Y., Yasyukevich A., Ratovsky K., Klimentko M., Klimentko V., Chirik N. Winter anomaly in NmF2 and TEC: when and where it can occur // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, V. 8, A45, doi:10.1051/swsc/2018036.
110. Klimentko M.V., Klimentko V.V., Karpachev A.T., Ratovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Intercosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2020–2032, doi:10.1016/j.asr.2014.12.032.
111. Klimentko M.V., Klimentko V.V., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Cherniak I.V., Galkin I.A. Longitudinal variation in the ionosphere-plasmasphere system at the minimum of solar

and geomagnetic activity: investigation of temporal and latitudinal dependences // *Radio Science*, 2016, V. 51, P. 1864-1875, doi:10.1002/2015RS005900.

112. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Zakharenkova I.E., Yasyukevich Yu.V., Korenkova N.A., Cherniak Iu.V., Mylnikova A.A. Mid-latitude Summer Evening Anomaly (MSEA) in F2 layer electron density and Total Electron Content at solar minimum // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 9, P. 1951–1960, doi:10.1016/j.asr.2015.07.019.

113. Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V., Lukianova R.Yu. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // *Advances in Space Research*, 2017, V. 60, No. 2, P. 444–451, doi:10.1016/j.asr.2016.12.008.

114. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak Iu.V. The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2077–2085, doi:10.1016/j.asr.2014.06.027.

115. Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Rozanov E.V. The dependence of four-peak longitudinal structure of the tropical electric field on the processes in the lower atmosphere and geomagnetic field configuration // *Advances in Space Research*, 2019, V. 64, No. 10, P. 1854–1864, doi:10.1016/j.asr.2019.06.029.

116. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Cherniak Iu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // *Annales Geophysicae*, 2017, V. 35, P. 923–938, doi:10.5194/angeo-35-923-2017.

117. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, V. 180, P. 78–92, doi:10.1016/j.jastp.2017.12.017.

118. Klimenko M.V., Klimenko V.V. Disturbance dynamo, prompt penetration electric field and overshielding in the Earth's ionosphere during geomagnetic storm // *Journal of*

Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, V. 90–91, December 2012, P. 146-155, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.018.

119. Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., Lukianova R.Y., & Cherniak I.V. Simulation and observations of the polar tongue of ionization at different heights during the 2015 St. Patrick's Day storm // *Space Weather*, 2019, V. 17, P. 1073–1089, doi: 10.1029/2018SW002143.

120. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Zhang Y. E-region ionospheric storm on May 1–3, 2010: GSM TIP model representation and suggestions for IRI improvement // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55, No. 8, P. 2124-2130, doi:10.1016/j.asr.2014.08.003.

121. Suvorova A.V., Huang C.-M., Dmitriev A.V., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Tumanova Y.S. Effects of ionizing energetic electrons and plasma transport in the ionosphere during the initial phase of the December 2006 magnetic storm // *Journal of Geophysical Research*, 2016, V. 121, P. 5880–5896, doi:10.1002/2016JA022622.

122. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V.A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008 // *Journal of Geophysical Research*, 2017, V. 122, P. 2398–2423, doi:10.1002/2016JA023260.

123. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., Klimenko V.V., Vesnin A.M. Statistical Analysis and Interpretation of High-, Mid- and Low-Latitude Responses in Regional Electron Content to Geomagnetic Storms // *Atmosphere*, 2020, V. 11, P. 1308, doi:10.3390/atmos11121308.

124. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Vasilyev R.V., Klimenko V.V., Podlesnyi A.V. Vertical plasma transport in the ionosphere over Irkutsk during St. Patrick's Day geomagnetic storm: observations and modeling // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67(1), P. 122-132, doi:10.1016/j.asr.2020.10.021.

125. Klimenko V.V., Klimenko M.V. EEJ and EIA variations during modeling substorms with different onset moments // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56(9), P. 1982-1991, doi:10.1016/j.asr.2015.07.041.

126. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Chirik N.V., Korenkova N.A., Kotova D.S. After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation // *Solar-Terrestrial Physics*, 2018, V. 4(4), P. 26–32, doi:10.12737/stp-44201804.
127. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko, M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M. Modeling the effect of Sudden Stratospheric Warming within the thermosphere-ionosphere system // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, V. 90-91, December 2012, P. 77–85, doi: 10.1016/j.jastp.2012.09. 005.
128. Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Korenkova N.A., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M., Shcherbakov A., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Condor Patilongo P.J. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // *Journal of Geophysical Research*, 2012, V. 117, A10309, doi:10.1029/2012JA018018.
129. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Liu H., Goncharenko L. P., Tolstikov M.V. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models – first results // *Journal of Geophysical Research*, 2015, V. 120, P. 7873–7888, doi:10.1002/2014JA020861.
130. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Vasiliev P.A., Karpov I.V., Korenkov Yu.N., Zakharenkova I.E., Funke B., Rozanov E.V. Identification of the mechanisms responsible for anomalies in the tropical lower thermosphere/ionosphere caused by the January 2009 sudden stratospheric warming // *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2019, V. 9, A39, doi: 10.1051/swsc/2019037.
131. Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // *Advances in Space Research*, 2003, V. 32, P. 863–868, doi:10.1016/S0273-1177(03)00416-2.
132. Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Korenkov Yu.N., Funke B., Zakharenkova I.E., Wissing J.M., Rozanov E.V. Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15-22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results // *Advances in Space Research*, 2021, V. 67, No. 1, P. 133–149, doi:10.1016/j.asr.2020.10.026.
133. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al. On Possible Causes of Positive Disturbance of Global Electronic Content during a Complex Heliogeophysical Event on September 2017 // *Cosmic Research*, 2021, V. 59, P. 456–462, doi:10.1134/S0010952521060046.

134. Ovodenko V.B., Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Oinats A.V., Kotova D.S., Nikolaev A.V. et al. Spatial and temporal evolution of different-scale ionospheric irregularities in Central and East Siberia during the 27–28 May 2017 geomagnetic storm // *Space Weather*, 2020, V. 18, e2019SW002378, doi:10.1029/2019SW002378.
135. Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 5, P. 900–906, doi:10.1016/j.asr.2015.05.017.
136. Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasyukevich Y.V. Klimenko M.V., Ratovsky K.G., Mylnikova A.A., Andreeva E.S., Kozlovsky A.E., Korenkova N.A., Nesterov I.A., & Tumanova Yu.S. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes // *GPS Solutions*, 2020, V. 24, P. 25, doi:10.1007/s10291-019-0936-x.
137. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Numerical Simulation of the Influence of the may 2–3, 2010 Geomagnetic Storm on HF Radio-Wave Propagation in the Ionosphere // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, V. 57, P. 467–477, doi:10.1007/s11141-014-9529-2.
138. Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E., Ratovsky K.G., Nosikov I.A., Zhao B. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26–29, 2011 // *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 9, P. 2012–2029, doi:10.1016/j.asr.2015.05.009.
139. Nosikov I.A., Bessarab P.F., Klimenko M.V. Method of Transverse Displacements Formulation for Calculating the HF Radio Wave Propagation Paths. Statement of the Problem and Preliminary Results // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, V. 59, P. 1–12, doi:10.1007/s11141-016-9670-1.
140. Nosikov I.A., Klimenko M.V., Bessarab P.F., Zbankov G.A. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere // *Advances in Space Research*, 2017, V. 60, No. 2, P. 491–497, doi:10.1016/j.asr.2016.12.003.
141. Nosikov I., Klimenko M., Zhbankov G., Podlesnyi A., Ivanova V., Bessarab P.F. Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic Identification of High and Low Rays // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, V. 68, No. 1, 455–467, doi: 10.1109/TAP.2019.2938817.

142. Dobrokhotov S.Y., Klimenko M.V., Nosikov I.A., Tolchenkov A.A. Variational Method for Computing Ray Trajectories and Fronts of Tsunami Waves Generated by a Localized Source // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2020, V. 60, P. 1392–1401. doi:10.1134/S0965542520080072.