

УДК 550.348

ИСКУССТВЕННАЯ ИНЖЕКЦИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ – НОВЫЙ КАНАЛ МОДИФИКАЦИИ ИОНИЗИРОВАННОЙ И НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ АТМОСФЕРЫ

© 2022 г. В. Л. Фролов^{1, 2*}, Ю. Ю. Куликов³, А. В. Троицкий¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: frolov@nirfi.unn.ru

Поступила в редакцию 18.02.2022;

после доработки 19.05.2022;

принята в печать 20.05.2022

Приведены результаты исследований характеристик искусственной инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу при ее нагреве мощными радиоволнами коротковолнового диапазона. Эксперименты выполнялись на среднеширотном нагревном стенде СУРА. Показано, что такая инъекция обладает высокой энергетикой и может рассматриваться как новый канал модификации нейтральной и ионизированной компонент атмосферы Земли. Анализируются полученные экспериментальные данные по воздействию энергичных электронов на генерацию микроволнового излучения на ионосферных высотах и на содержание озона на высотах мезосферы. Приводится интерпретация наблюдаемых при этом явлений и возможного их влияния на свойства приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: модификация ионосферы, мощные радиоволны, искусственная ионосферная турбулентность, инъекция энергичных электронов, атмосфера Земли, микроволновое излучение, озонметрия.

DOI: 10.31857/S0207401X22100053

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение особенностей взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферой Земли относится к числу наиболее активно разрабатываемых в последние десятилетия задач физики плазмы и солнечно-земных связей. Принципиальным моментом здесь является то, что взаимодействие интенсивного радиоизлучения с плазмой сопровождается развитием целого ряда фундаментальных нелинейных явлений, таких как: параметрические неустойчивости плазмы и возбуждение сильной плазменной турбулентности, генерация искусственных ионосферных неоднородностей с размерами поперек линий геомагнитного поля от долей метра до десятков километров, модификация профиля плотности плазмы под действием сил светового и теплового давления, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация вторичного электромагнитного излучения в областях с сильно развитой искусственной ионосферной турбулентностью (ИИТ), возбуждение электрических полей и токов в плазме и других (см., например,

[1–6] и цитируемую в них многочисленную литературу).

Несмотря на достигнутые большие успехи, изучение природы и свойств этих явлений по ряду направлений еще нельзя считать полностью законченным. Особенно это касается изучения механизмов генерации ИИТ далеко за пределами области интенсивного взаимодействия пучка мощных радиоволн с плазмой. Существенно, что мощности работающих сегодня в мире радиостанций различного назначения достаточны, чтобы вызывать заметные изменения характеристик ионосферы. Это означает, что ионосфера в настоящее время, фактически, постоянно находится в возбужденном состоянии, и это необходимо принимать во внимание при рассмотрении существа протекающих в ней процессов. Результаты активных экспериментов в ионосферной плазме также важны для изучения механизмов возможного взаимодействия между ионосферой и магнитосферой, имея целью разработку способов модификации состояния последней (см., например, [7, 8]).

Все перечисленное выше имеет прямое отношение к одной из актуальных задач настоящего времени — освоению околоземного космического пространства.

Ионосфера Земли (см., например, хорошо известные монографии [9–12]) представляет собой слабо ионизированный плазменный слой, который обнаруживается на высотах от 50–60 км до ~1000 км. В дневной ионосфере на высотах 50–90 км расположен D-слой — очень слабо ионизированная область ионосферы с высокой частотой соударений заряженных частиц с нейтральными атомами и молекулами, благодаря чему плазма в нем остается незамагниченной. Здесь степень ионизации атмосферы не превышает значения $N_e/N_n \approx 10^{-10}$. Этот слой хорошо обнаруживается только в освещенной Солнцем ионосфере, в ночных условиях плотность плазмы в нем намного меньше.

Выше D-слоя на высотах 90–130 км расположен E-слой ионосферы, в котором электроны уже замагничены при еще незамагниченных ионах; степень ионизации в нем достигает значения $N_e/N_n \approx 3 \cdot 10^{-8}$. На средних широтах E-слой наиболее развит в дневных условиях. Иногда (в основном в летние месяцы) на этих высотах регистрируется появление узкого по высоте спорадического E-слоя (E_s), концентрация плазмы в котором может значительно превышать концентрацию в обычном E-слое.

Максимальное значение концентрации плазмы в ионосфере достигается в F2-слое на высоте 200–300 км; оно сильно изменяется в зависимости от сезона, времени суток, широты, уровня солнечной активности и др. Степень ионизации в F2-слое составляет $N_e/N_n \approx 10^{-3}$. Этот слой существует как в дневных, так и в ночных условиях и занимает интервал высот 180–400 км. В нем замагниченными оказываются и электроны, и ионы. В такой замагниченной плазме может существовать большое количество разнообразных волн: ленгмюровские, верхнегибридные, бернштейновские высокочастотные плазменные, ионно-звуковые, магнитогидродинамические и другие типы низкочастотных волн. Выше максимума F2-слоя плотность плазмы уменьшается с ростом высоты приблизительно по экспоненциальному закону, а степень ее ионизации увеличивается. Существующее многообразие физических условий, реализуемых в ионосфере Земли, позволяет рассматривать ионосферную плазму как естественную плазменную лабораторию, в которой удобно проводить различные эксперименты по изучению взаимодействия волн и частиц, моделированию динамических процессов в космической плазме [13–16]. Важным преимуществом ионосферы по сравнению с лабораторными плазменными установками является отсутствие в ней стенок, ограничива-

ющих объем плазмы и сильно влияющих на происходящие в плазме процессы, а также высокая степень однородности плазмы. Для большого класса задач ионосферную плазму можно считать практически безграничной.

Физические эксперименты в ионосфере удобно проводить путем создания в ней ИИТ, например с помощью воздействия на нее мощными радиоволнами. При этом исследования выполняются с управляемыми источниками возмущений, которые создаются в ионосфере с известной интенсивностью, в течение заданного интервала времени, на выбранных высотах ионосферы, в известных геофизических условиях и для диагностики которых используются хорошо развитые различные радиофизические методы ее зондирования с размещением измерительных приборов как на поверхности земли, так и на борту космических аппаратов. Это позволяет, как правило, достаточно полно изучить основные свойства наблюдаемых явлений, включая динамику развития и релаксации различного рода плазменных возмущений. Важным обстоятельством является то, что создаваемые при модификации ионосферы мощными радиоволнами плазменные возмущения быстро релаксируют (за время, не большее 30 мин, для подавляющего большинства возмущений) и не вносят каких-либо загрязнений в окружающую среду.

Характеристики стенда СУРА

Уже в первых экспериментах по модификации ионосферы, начатых в 1961 г. на стенде НИИ Радио (Москва, СССР) [17] и продолженных в 1970 г. на стендах “Боулдер” (Колорадо, США) [18, 19] и “Аресибо” (Пуэрто-Рико, США) [2] и в 1973 г. на стенде “Зименки” (Горький, СССР) [20], помимо ожидаемых изменений температуры и концентрации плазмы в масштабе диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн, был обнаружен ряд новых явлений, связанных, в первую очередь, с генерацией искусственных высокочастотных плазменных колебаний и искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) различных масштабов. Выполненные широкомасштабные исследования характеристик и свойств ИИТ, возбуждаемой в ионосфере при воздействии на нее мощными радиоволнами коротковолнового (КВ) диапазона, позволили установить, что, помимо ожидаемых омического нагрева плазмы и самофокусировочной неустойчивости мощной радиоволны, в областях плазменных резонансов вблизи уровня отражения волны накачки (ВН) обыкновенной поляризации развиваются стрикционная и тепловая (резонансная) параметрические неустойчивости. Это приводит к возбуждению интенсивных высокочастотных плазменных колебаний, сильному разогреву в этой резонансной

области электронов и генерации ИИН концентрации плазмы с размерами l_{\perp} поперек линий геомагнитного поля от долей метра до десятков метров, которые оказывают существенное влияние на свойства распространяющихся через возмущенную область (ВО) ионосферы радиоволн различных диапазонов [1, 2, 4, 17–20].

В 1981 г. вступили в строй стенд EISCAT-heater (Северная Норвегия) в авроральных широтах и стенд СУРА (Н. Новгород, Россия) в средних широтах; с конца 90-х годов начались эксперименты на высокоширотном стенде HAARP (Аляска, США). Описание этих стендов приведено в обзоре [6]. В проводимых на этих стендах экспериментах, в частности, было показано, что при модификации ночной F2-области ионосферы мощными радиоволнами в центральной части возмущенной области (VO_{\perp}) ионосферы в области магнитного зенита наблюдаются разогрев электронов плазмы в 2–3 раза (до 3000 К) и формирование полости с уменьшенной на ~20% концентрацией плазмы (фокусирующей линзы) [6, 13]. Выталкивание плазмы вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля является причиной формирования на высотах внешней ионосферы дакта (крупномасштабной неоднородности) с увеличенной плотностью плазмы [21, 22]. Перераспределение плазмы при ее разогреве мощными радиоволнами приводит к возбуждению электрических токов, вытекающих в центральной части ВО ионосферы и вытекающих по ее периферии [23, 24]. Такая картина отвечает униполярной диффузии электронов и ионов, когда электроны движутся вдоль силовых линий геомагнитного поля, формируя продольные компоненты токов, а ионы – поперек, формируя их поперечные компоненты; внизу поперечные токи замыкаются в высокопроводящей E-области ионосферы, а сверху – по фоновой плазме верхней и внешней ионосферы. В дневных условиях разогрев плазмы на высотах 130–170 км приводит здесь к росту концентрации плазмы и формированию дефокусирующей линзы [1].

В последние годы нагревные эксперименты по модификации ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона активно проводятся на трех стендах: на стенде СУРА в средних широтах, на стенде HAARP (Аляска, США) в высоких широтах в зоне главного ионосферного провала и на стенде “EISCAT-heater” в авроральных широтах. Их характеристики и полученные на них наиболее важные результаты исследований так же приведены в обзоре [6].

Продолжающиеся уже более чем 50 лет целенаправленные исследования в области взаимодействия мощного КВ-радиоизлучения с плазмой, проводимые в России, США и странах Западной Европы, позволили выявить основные закономерности развития ИИТ и построить эм-

пирические и теоретические модели развития основных ее компонент. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что наиболее эффективное ее возбуждение наблюдается при модификации F2-области ионосферы волнами обыкновенной поляризации, когда имеет место их резонансное взаимодействие с магнитоактивной плазмой, характеризующееся возбуждением стрикционной и тепловой (резонансной) параметрических неустойчивостей [1]. Был обнаружен и изучен эффект “магнитного зенита” – эффект усиления генерации ИИТ при распространении мощной радиоволны вдоль силовых линий геомагнитного поля в области ее взаимодействия с плазмой [5, 6, 13]. Полученные здесь результаты, в первую очередь, касаются VO_{\perp} , положение и размеры которой в горизонтальной плоскости определяются диаграммой направленности излучения мощной радиоволны; на уровне F2-слоя размеры VO_{\perp} ионосферы в зависимости от частоты и мощности излучения ВН составляют 50–100 км. Размер VO_{\perp} по вертикали (правильнее – вдоль геомагнитного поля) при модификации F2-области составляет от нескольких сот метров до десятков километров в зависимости от типа возбуждаемой турбулентности [5].

Выполненные в последние годы на стенде СУРА эксперименты позволили обнаружить и исследовать эффект искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты за счет влияния на ионосферно-магнитосферные связи генерации ИИТ при модификации F2-области ионосферы. В разд. 2 работы будут подробно рассмотрены характеристики такой инжекции и ее влияние на свойства ионизированной и нейтральной компонент атмосферы Земли.

Все рассматриваемые в данной работе эксперименты были выполнены на нагревном стенде СУРА в НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Н. Новгород, Россия). Стенд расположен приблизительно в 100 км к востоку от г. Н. Новгород; его координаты: 56.15° с.ш., 46.1° в.д. (параметр Мак-Илвайна $L \approx 2.7$). Стенд имеет трехмодульную структуру. Каждый модуль состоит из генерирующего ВЧ-мощность до 250 кВт радиопередатчика ПКВ-250, который нагружен на свою антенную решетку, состоящую из 12×4 широкополосных скрещенных диполей и вытянутую поперек геомагнитного меридиана. Стенд может излучать волны обыкновенной (O) и необыкновенной (X) поляризации в диапазоне частот от 4.3 до 9.5 МГц. Модули стенда могут работать независимо или объединяться в режиме когерентного излучения любыми двумя или всеми тремя модулями вместе. В последнем случае решетка состоит из 144 диполей, занимающих площадь 300×300 м². Максимальная эффективная мощность излучения стенда при этом

составляет $P_{ef} = P_0 G \approx 80$ МВт (P_0 – максимальная мощность, генерируемая передатчиками стенда; G – коэффициент усиления передающей антенны стенда) на частотах $f_{ВН} \approx 4300$ кГц и ~ 280 МВт на частотах $f_{ВН} \approx 9300$ кГц, увеличиваясь с ростом частоты ВН. Диаграмма направленности антенны стенда в плоскости магнитного меридиана может отклоняться от вертикали в пределах $\pm 40^\circ$. Для увеличения эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой за счет эффекта “магнитного зенита” [13] часто используется модификация ионосферы не вертикальным, а наклоненным на 12° – 14° от вертикали на юг пучком мощных радиоволн. При таком наклоне координаты центра пятна засвеченной мощными радиоволнами области ионосферы на высоте 250 км составляют $\varphi = 55.7^\circ$ с.ш. и $\lambda = 46^\circ$ в.д.; само пятно засветки ионосферы мощными радиоволнами при $f_{ВН} \approx 4300$ кГц имеет диаметр ~ 60 км по уровню $0.5P_{max}$. Более подробные характеристики стенда приведены в работе [25].

Стенд СУРА является на сегодня единственной в мире действующей установкой, расположенной в средних широтах, где сильные естественные геомагнитные возмущения являются достаточно редким событием. Этим он отличается от стендов EISCAT-heater и HAARP, расположенных на более высоких широтах, в которых сильные естественные возмущения в ионосфере и магнитосфере Земли значительно затрудняют проведение экспериментов и усложняют интерпретацию наблюдаемых явлений. Надо также иметь в виду, что стенд HAARP по своему положению попадает в область главного ионосферного провала со своими специфическими свойствами ионосферы.

2. ИСКУССТВЕННАЯ ИНЖЕКЦИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В ИОНОСФЕРУ

В настоящем разделе работы представлены результаты выполненных в последние годы на стенде СУРА исследований искусственной инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу. Отметим, что большой цикл исследований по стимулированию такой инъекции был выполнен в США с использованием излучений мощных наземных передатчиков, работающих в очень низкочастотном (ОНЧ) диапазоне [26–29]. Выполнялись также эксперименты на нагревном стенде HAARP по генерации волн в крайне низкочастотном (КНЧ) и ОНЧ-диапазонах за счет нелинейной демодуляции сигнала ВН [6, 29, 30]. Этот стенд расположен в более северных широтах, чем стенд СУРА, в области главного ионосферного провала, в которой имеет место

возбуждение интенсивных естественных ионосферных неоднородностей, что затрудняет обнаружение и изучение вызванных нагревом ионосферы плазменных возмущений и определяет специфику проводимых на нем исследований [31]. Эксперименты по стимуляции высыпаний энергичных электронов неоднократно проводились на стенде EISCAT-heater [32, 33], который расположен на авроральных широтах в области с высоким уровнем естественной плазменной турбулентности, где ионосферно-магнитосферные процессы оказывают сильное влияние на свойства взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Важно, что в экспериментах на стендах EISCAT-heater и HAARP для модификации ионосферы использовались модулированные по амплитуде мощные радиоволны с частотами модуляции, лежащими в КНЧ- и ОНЧ-диапазонах (в интервале частот от нескольких Гц до 30 кГц). В отличие от них все проведенные до сегодняшнего дня на стенде СУРА эксперименты по стимулированию инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты выполнялись при модификации ионосферы немодулированными по амплитуде мощными радиоволнами КВ-диапазона, излучаемыми в режиме “несущая”.

Выполненные на стенде СУРА исследования позволили установить, что на свойства искусственной инъекции энергичных электронов, стимулированной его работой, сильное влияние оказывают:

а) характеристики излучения мощной радиоволны – через ее частоту, эффективную мощность и режим излучения;

б) время суток и ионосферные условия проведения измерений – через величину поглощения мощных радиоволн в нижних слоях ионосферы, критическую частоту F2-слоя (f_oF2), форму его вертикального профиля изменения концентрации, высоту отражения ВН, наличие спорадического слоя E_s ;

в) уровень текущей геомагнитной активности и время, прошедшее после последней суббури – через состояние ионосферной плазмы и насыщенность радиационного пояса энергичными электронами;

г) расстояние орбиты спутника до центра возмущенной магнитной силовой трубки и др.

Совокупное влияние этих причин обуславливает большой разброс результатов проведенных измерений. Нужно также указать, что оптимальными условиями проведения экспериментов, с точки зрения генерации наиболее интенсивной ИИТ, можно считать следующие условия:

1) эксперименты проводятся в поздние вечерние или ночные часы, нагрев ионосферы осуществляется волнами O -поляризации;

2) частота ВН не превышает 6 МГц, причем ее величина должна быть на 0.3–0.5 МГц ниже критической частоты F2-слоя ионосферы, f_oF2 ;

3) высота отражения ВН превышает 200 км;

4) измерения проводятся при эффективной мощности излучения ВН не меньше 50 МВт в спокойной или слабозмущенной ионосфере при низком линейном поглощении радиоволн в ее нижних слоях;

5) используется наклон диаграммы направленности передающей антенны стенда на $\sim 12^\circ$ на юг, чтобы усилить генерацию ИИТ за счет эффекта “магнитного зенита” [5, 6, 13].

В представленных в работе исследованиях излучение мощной радиоволны начиналось, как правило, приблизительно за 15 мин до пролета спутника через возмущенную магнитную силовую трубку, опирающуюся на VO_{\perp} с сильно развитой ИИТ. При благоприятных ионосферных условиях такая длительность нагрева является достаточной для развития плазменных возмущений до практически стационарного уровня не только в области отражения ВН, но и на высотах внешней ионосферы. При проведении измерений в магнитно-сопряженной к VO_{\perp} ионосфере в ряде случаев использовались более длительные нагревы плазмы с временем излучения ВН 30–45 мин, чтобы обеспечить высокий уровень генерации плазменных возмущений во всей возмущенной магнитной силовой трубке.

Измерения характеристик искусственной инжекции энергичных электронов на ионосферные высоты выполнялись с помощью детекторов энергичных электронов, размещенных на спутниках DEMETER и NOAA при их пролете через возмущенную магнитную силовую трубку или близко от нее. Эксперименты на французском спутнике DEMETER выполнялись в 2005–2010 гг., высота его орбиты равна 660 км; на спутниках NOAA-18 и NOAA-19 (США) – в 2019–2021 гг., высота их орбиты равна 860 км. Над стендом СУРА спутник DEMETER пролетал в 18:00–18:30 UT либо в поздние вечерние или ночные часы в зависимости от сезона проведения измерений и около 07:30–08:00 UT в дневных условиях (местное время $T_{\text{МСК}} = T_{\text{UT}} + 3$ или 4 ч в разные годы проведения измерений). В магнитно-сопряженной к стенду ионосфере спутник пролетал через возмущенную магнитную силовую трубку около 18:30 UT, что соответствует для разных сезонов поздним вечерним или ночным условиям нагрева ионосферы мощными радиоволнами.

Над стендом СУРА спутники NOAA пролетали через возмущенную магнитную силовую трубку около 07:00 UT и 13:00 UT ($T_{\text{МСК}} = T_{\text{UT}} + 3$ ч в годы проведения измерений), т.е. в близко к полуденным, в ранние вечерние или вечерние часы в зависимости от сезона проведения экспериментов.

В магнитно-сопряженной к стенду ионосфере эти спутники пролетали через возмущенную магнитную силовую трубку около 13:30 UT, что соответствует поздним вечерним или ночным условиям нагрева ионосферы мощными радиоволнами. Заметим, что $T_{\text{МСК}}$ для стенда СУРА практически совпадает с астрономическим временем его местоположения. Из вышесказанного ясно, что измерения проводились в разное время суток, что позволило сделать определенные выводы о суточной зависимости характеристик инжекции, что необходимо для прогнозирования ее влияния на генерацию различного рода возмущений ионизированной и нейтральной компонент атмосферы Земли.

Детектирование энергичных электронов на французском спутнике DEMETER осуществлялось с помощью спектрометра IDP, который в режиме *burst mode* ежесекундно измерял энергии и величины потока энергичных электронов в диапазоне от 70 кэВ до 2.5 МэВ [34]. Особенность размещения спектрометра на корпусе спутника заключалось в том, что он измерял величины потока электронов в близко к ортогональному относительно плоскости его орбиты направлении (с питч-углами, лежащими в области $90^\circ \pm 16^\circ$ по отношению к направлению геомагнитного поля, что в случае измерений на стенде СУРА соответствовало регистрации “запертых” в магнитной силовой трубке электронов). Однако из-за низкой высоты орбиты спутника (~ 660 км) значение питч-углов для таких электронов в экваториальной области возмущенной магнитной силовой трубки лишь незначительно (на несколько градусов) превышало угол конуса потерь, что обеспечивало условия перевода в него энергичных электронов (например, при взаимодействии электронов с ОНЧ-волнами) и проникновение их на низкие ионосферные высоты. Это дает основание считать, что в этих измерениях имеет место *инжекция* энергичных электронов на ионосферные высоты. Поскольку электроны с энергией $E \approx 20$ –200 кэВ в значительной степени поглощаются на высотах нижней ионосферы 60–100 км (электроны с большей энергией проникают на более низкие высоты, см., например, работы [35, 36]) и не возвращаются обратно во внешнюю ионосферу, такая инжекция электронов на ионосферные высоты может также рассматриваться как их *высыпание* в ионосферу Земли.

Подробное описание бортовой аппаратуры спутников серии NOAA можно найти по ссылке [37]. Данные о характеристиках энергичных электронов брались с размещенных на них двух детекторов. Из-за разной их ориентации в пространстве детектор-0° (далее Д-0) в интересующих нас широтах измерял поток электронов внутри конуса потерь, что отвечает потоку высыпавшихся из радиационного пояса Земли энергичных элект-

тронов, а детектор-90° (Д-90) – вне его, что отвечает электронам, захваченным (“запертым”) в магнитной силовой трубке. Как было отмечено выше, “запертые” электроны, которые опускаются вдоль силовых линий геомагнитного поля до ионосферных высот, на экваторе возмущенной трубки лишь немного выходят за конус потерь и по разным причинам могут перейти в разряд “высыпающихся”. Из представленных в статье результатов будет видно, что измеренные на средних широтах потоки таких “высыпающихся” электронов на два порядка и больше слабее потоков “запертых”, оставаясь в большинстве случаев ниже порога их регистрации аппаратурой спутников NOAA. Аналогичная ситуация обычно имеет место и при измерении естественных потоков “высыпающихся” и “запертых” электронов на средних широтах в условиях низкой геомагнитной активности [36]. Поэтому для спутников NOAA измеренное на высоте $h \approx 860$ км детектором Д-90 увеличение потока энергичных электронов может, как и для спутника DEMETER, рассматриваться как их искусственная инжекция (или высыпание) из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты, стимулированная модификацией F2-области ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона.

Заметим, что измерения в дневные и ранние вечерние часы выполнялись при высоком линейном поглощении радиоволн в нижних слоях ионосферы в условиях низкой высоты F2-слоя; также часто имело место присутствие естественного спорадического слоя E_s на высотах 100–110 км. Кроме того, при достаточно высокой эффективной мощности излучения ВН ($P_{ef} \geq 30$ МВт) в дневное время суток могло наблюдаться формирование дефокусирующей линзы на высотах 130–170 км [1]. Все это не отвечает оптимальным условиям проведения измерений и приводит к сильному (на 20–30 дБ) уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН по сравнению с проведением измерений в ночные часы в спокойной ионосфере, определяя тем самым низкую эффективность взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и слабую интенсивность генерируемой ИИТ [5].

Отметим еще два момента, чтобы пояснить допущения, используемые нами при изложении представленного в настоящей работе материала.

1. Известно, что энергичные электроны в околоземном космическом пространстве образуют два радиационных пояса: внутренний и внешний. В спокойных геомагнитных условиях они разделены областью с пониженным содержанием энергичных электронов, положение которой соответствует величине $L \approx 2.2–3.5$ и которая более выражена для частиц с энергиями $E \geq 300$ кэВ. Для станда СУРА с $L \approx 2.7$ это соответствует попаданию в зазор между радиационными поясами. Од-

нако для электронов с энергиями $E \leq 300$ кэВ, для которых и проводились наши исследования, понижение плотности потока энергичных электронов в этом зазоре выражено слабо даже в спокойных геомагнитных условиях и еще слабее – в возмущенных условиях. Поэтому в нашем случае допустимо говорить о едином радиационном поясе Земли без разделения его на внутренний и внешний пояса.

2. Существует лишь ограниченное количество прямых измерений свойств высыпающихся энергичных электронов, проведенных на средних широтах в естественных условиях, результаты которых представляют интерес с точки зрения наших исследований. Среди них следует отметить результаты работы [38] по измерению характеристик энергичных электронов с $E = 20–150$ кэВ для $L = 2.0–2.8$, выполненных с помощью бортовой аппаратуры спутника “Космос-348”, выведенного на эллиптическую орбиту 212/680 км. В этих измерениях было получено, что:

а) величина потока высыпающихся энергичных электронов сильно зависит от широты их регистрации, увеличиваясь с приближением к полярным областям;

б) интенсивность высыпаний электронов быстро растет с повышением уровня геомагнитной активности;

в) наблюдается эффект последствия геомагнитных возмущений в ионосфере, когда повышенный уровень высыпаний регистрируется в течение недели и даже после их окончания уже в спокойных геомагнитных условиях, если судить по величине геомагнитного индекса K_p .

На основе результатов исследований характеристик естественных и искусственных высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты на долготе станда СУРА были определены их отличительные особенности и определена граница естественных высыпаний в зависимости от геофизических условий [39, 40]. Было установлено, что в северном полушарии с ростом значений геомагнитного индекса АЕ южная граница области с сильными естественными высыпаниями опускается на более южные широты, и при АЕ $\approx 300–800$ нТл она может достигать широты $\Phi_{тр}^* \approx 54.6^\circ$ с.ш., т.е. центра возмущенной магнитной силовой трубки, опускаясь до широт $46^\circ–52^\circ$ с.ш. для АЕ = 800–1200 нТл. При этом положение южной границы зоны естественных высыпаний контролируется в большей степени не величиной K_p -индекса, а средним значением индекса АЕ, определенного по его измерениям в течение нескольких часов до проведения экспериментов. Индекс АЕ имеет максимальные значения на стадии затухания геомагнитных возмущений, через 1–2 дня после ре-

гистрации максимальных значений индекса K_p , относящихся к фазе их развития. Из этих результатов видно, что в условиях спокойной или слабо возмущенной ионосферы естественные высыпания не оказывают заметного влияния на измерения характеристик инжекции энергичных электронов над стендом СУРА.

Следует отметить, что аналогичные сравнительные измерения характеристик естественных и искусственных высыпаний энергичных электронов были выполнены при проведении исследований в магнитно-сопряженной к стенду СУРА ионосфере [40, 41]. Было установлено, что на результаты измерений в этой области сильное влияние оказывает Южно-Атлантическая магнитная аномалия [42], в которой наблюдается ослабление напряженности геомагнитного поля и, следовательно, более интенсивные высыпания энергичных электронов.

2.1. Характеристики инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на высоты ионосферы в условиях модификации ее F_2 -области мощными радиоволнами КВ-диапазона. Измерения в поздние вечерние и ночные часы

Эти измерения были выполнены в 2005–2010 гг. в рамках программы СУРА–DEMETER. Спутник пролетал над стендом СУРА около 18:30 UT или в поздние вечерние или ночные часы в зависимости от сезона, когда проводились эксперименты. На рис. 1 приведен пример регистрации 14 мая 2010 г. высокого уровня искусственной инжекции энергичных электронов на ионосферные высоты. Этот сеанс измерений проводился в спокойных геомагнитных условиях с $\Sigma K_p = 4–5$ и $AE \leq 100$ нТл. Внизу черным треугольником отмечено время и координаты, когда спутник пролетал наиболее близко к центру возмущенной магнитной силовой трубки (приблизительно в 28 км от него). В этом эксперименте условия модификации ионосферной плазмы были близки к оптимальным, и на ионограммах наблюдалось развитие F -рассеяния (F_{spread}) и эффекта аномального ослабления интенсивности ветвей для их O -моды [1, 5, 6], а приборами спутника на высоте $h = 660$ км регистрировалось формирование дакта с относительным увеличением концентрации плазмы в нем $\sim 10\%$ [21]. Видно усиление в дакте потока электронов F с $E \approx 100$ кэВ. Эти измерения проводились через 12 дней после сильной магнитной суббури с $K_p \approx 5–6$, во время которой происходила интенсивная накачка радиационного пояса Земли энергичными электронами и, следовательно, выполнялись условия для более интенсивной их последующей искусственной инжекции.

На основе всех измерений, выполненных в рамках программы СУРА–DEMETER [39–41],

были сформулированы признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов при модификации ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона в поздние вечерние и ночные часы. Это:

1) максимум интенсивности инжекции наблюдается, как правило, внутри возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на $VO_{\text{ц}}$ ионосферы, где вблизи высоты отражения ВН имеют место наиболее интенсивная генерация ИИТ и наиболее сильный разогрев ионосферной плазмы;

2) наблюдается увеличение интенсивности инжекции электронов в дакте;

3) интенсивность инжекции увеличивается с ростом геомагнитной активности, во время которой происходит наполнение радиационного пояса Земли энергичными электронами;

4) слабая интенсивность искусственной инжекции или ее отсутствие после длительного периода низкой геомагнитной активности (больше 10–14 дней) определяется низким содержанием или отсутствием энергичных электронов в магнитной силовой трубке радиационного пояса Земли с $L \approx 2.7$;

5) максимальные потоки инжектируемых энергичных электронов с $F \approx 100$ электрон/с \cdot см² \cdot ср \cdot кэВ наблюдались для их энергий $E \approx 100$ кэВ;

6) в северном полушарии на высоте орбиты спутника $h \approx 660$ км область инжекции вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 900 км к северу от центра возмущенной магнитной силовой трубки и до 400 км к югу от него, намного превышая размер $VO_{\text{ц}}$ ионосферы. При этом наблюдается более плавное падение плотности потока F к северу от центра возмущенной магнитной силовой трубки, чем к югу. Размер области инжекции в ортогональном к меридиану направлении оценивается в 400–500 км, что также значительно превышает поперечный размер возмущенной магнитной силовой трубки;

7) было установлено, что в условиях “холодного старта” (после длительной, более 10–15 мин, паузы излучения ВН, когда ИИТ практически полностью релаксирует) характерное время роста интенсивности потока инжектируемых электронов после начала модификации ионосферы равно 1–7 мин и зависит от геофизических условий проведения эксперимента; время перехода к естественному уровню потока после выключения ВН составляет до 10–15 мин;

8) проведенные исследования позволили установить, что искусственная инжекция энергичных электронов, хотя и более слабого уровня, наблюдается в условиях, когда частота ВН может немного превышать критическую частоту foF_2 , но только если ее верхнегибридная частота остается

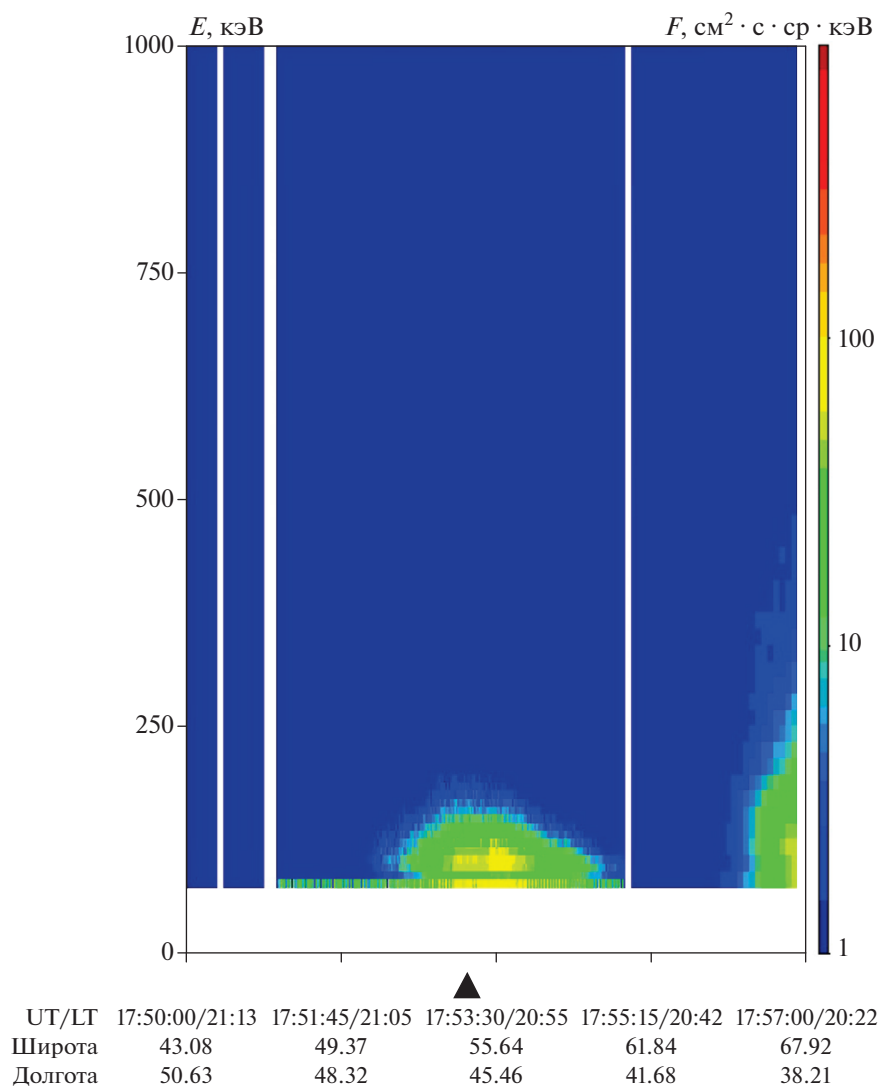


Рис. 1. Пример регистрации искусственной инъекции энергичных электронов, выполненной 14 мая 2010 г. с помощью спутника DEMETER. Цветом на рисунке отражена интенсивность потока энергичных электронов (шкала справа) для выбранных их энергий (вертикальная шкала слева). Черным треугольником отмечено время и координаты пролета спутника через центр возмущенной магнитной силовой трубки.

меньше f_oF2 . Этот результат прямо указывает, что развитие тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [1, 6] должно играть определяющую роль в механизме стимуляции инъекции;

9) проведенные эксперименты показали, что искусственная инъекция энергичных электронов в магнитно-сопряженную область (МСО) ионосферы, имела следующие характеристики:

а) в спокойных геомагнитных условиях максимальная энергия высыпавшихся электронов составляет $E \approx 100\text{--}150$ кэВ при величине их потока F до $100\text{--}200$ электрон/с \cdot см² \cdot ср \cdot кэВ;

б) максимум интенсивности инъекции, как правило, наблюдается внутри возмущенной магнитной силовой трубки;

в) в области инъекции (в интервале широт $46^\circ\text{--}53^\circ$ ю.ш.) наблюдается более резкое уменьшение энергии высыпавшихся частиц и их интенсивности при смещении от центра МСО в сторону экватора, чем при смещении в сторону южного полюса;

г) пространственные размеры зоны стимулированной модификацией ионосферы инъекции энергичных электронов в МСО могут достигать 2200 км вдоль геомагнитного меридиана и ~ 500 км поперек его;

д) интенсивность инъекции в южном полушарии заметно выше, чем в северном, что объясняется влиянием Южно-Атлантической магнитной аномалии.

2.2. Характеристики искусственной инжекции энергичных электронов в дневные и вечерние часы по результатам измерений с помощью бортовой аппаратуры спутников серии NOAA

По сравнению с ночными часами измерений, результаты которых приведены выше в п.2.1, эксперименты в дневные и вечерние часы проводятся с дополнительным линейным поглощением мощных радиоволн в нижних (D и E) слоях ионосферы. Поскольку в поздние вечерние и ночные часы линейное поглощение мало и в большинстве случаев может не учитываться, в приведенных выше измерениях эффективная мощность излучения ВН для стенда СУРА составляет $P_{ef} = P_0 G$, где $P_0 \approx 500\text{--}600$ кВт – ВЧ-мощность, генерируемая тремя передатчиками стенда, а $G \approx 160\text{--}300$ – коэффициент усиления излучающей антенны стенда в диапазоне $f_{ВН} = 4300\text{--}6800$ кГц, увеличивающийся с ростом частоты ВН. В спокойных геомагнитных условиях линейное поглощение радиоволн более сильное в полуденные часы, когда в ионосфере наблюдаются наиболее плотные D- и E-слои. Это приводит к заметному уменьшению в дневных условиях транспортируемой в F2-слой энергии мощной радиоволны и, следовательно, к уменьшению эффективности генерации и интенсивности ИИТ в верхней ионосфере. В наших экспериментах величина линейного поглощения радиоволн не определялась и для нахождения приведенной (с учетом линейного поглощения) эффективной мощности излучения ВН, P_{ef}^* , выполнялась оценка поглощения с использованием имеющихся в литературе данных. В дневные часы величина этого поглощения на пути от поверхности земли до высоты отражения ВН в спокойных геомагнитных условиях на частотах 4–5 МГц составляет примерно 5–10 дБ; более высокое поглощение имеет место в полуденные часы летних месяцев на более низких частотах ВН [43]. Это соответствует для таких частот уменьшению приведенной мощности ВН P_{ef}^* до 10–30 МВт по сравнению с эффективной мощностью излучения стенда СУРА $P_{ef} \approx 80\text{--}120$ МВт для ночных измерений в отсутствие линейного поглощения. В утренние и ранние вечерние часы величина поглощения может уменьшаться до 3–5 дБ ($P_{ef}^* \approx 20\text{--}50$ МВт). В возмущенных условиях линейное поглощение радиоволн может значительно возрастать, приводя к понижению P_{ef}^* до значения в несколько МВт в зависимости от стадии развития возмущенности и ее уровня.

При проведении измерений в дневной ионосфере необходимо также принимать во внимание возможность образования дефокусирующей линзы на высотах 130–170 км, если эффективная мощность излучения ВН превышает 30 МВт [1].

Это еще больше уменьшает поток энергии ВН вблизи высоты ее отражения и, следовательно, интенсивность генерируемой ИИТ. Кроме того, наличие спорадического E_s -слоя может приводить к частичной экранировке верхней ионосферы и к уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН. Для плотных E_s -слоев в его отдельных локальных областях возможна полная экранировка верхней ионосферы, когда через них модификация F2-слоя становится невозможной.

Для определения характеристик инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли во внешнюю ионосферу в дневные и вечерние часы проведения измерений использовались метеоспутники США NOAA-18 и NOAA-19. Потоки энергичных электронов определялись с помощью двух ортогонально расположенных на корпусе спутника детекторов (D-0 и D-90), проводящих детектирование в четырех диапазонах энергий электронов E : $E_1 = 40\text{--}130$ кэВ, $E_2 = 130\text{--}287$ кэВ, $E_3 = 287\text{--}612$ кэВ и $E_4 \geq 612$ кэВ. Выполненные измерения показали, что в возмущенной магнитной силовой трубке плотность потока искусственно инжектируемых при нагреве ионосферы энергичных электронов с $E \geq 287$ кэВ (в третьем и четвертом диапазонах) всегда была ниже порогового уровня их обнаружения: $F_{пор} \approx 10^2$ электрон/см² · с · ср.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты сеанса измерений, выполненного 3 июня 2019 г. в спокойных геомагнитных условиях (индекс AE ≤ 50 нТл, $\Sigma K_p = 6$; последняя суббура была 29 мая с K_p до 4). На этом рисунке приведены результаты измерения детекторами D-0 и D-90 величины потока F энергичных электронов в двух диапазонах наиболее низких энергий их регистрации: $E_1 = 40\text{--}130$ кэВ (верхняя панель) и $E_2 = 130\text{--}287$ кэВ (средняя панель); на нижней панели показано изменение во времени широты орбиты спутника. Спутник в $T^* = 12:57:12$ UT = 15:57:12 мск (это время отмечено на рисунке вертикальной линией) пролетал наиболее близко к центру возмущенной магнитной силовой трубки в еще дневной ионосфере, когда имело место высокое линейное поглощение радиоволн в ее нижних слоях. Стенд в этом сеансе работал на частоте 4300 кГц при критической частоте $f_oF2 \approx 4.4$ МГц с достаточно низкой эффективной мощностью излучения ВН: $P_{ef} \approx 25$ МВт. С учетом условий проведения этих измерений значение приведенной мощности P_{ef}^* не превышало 5 МВт. На еще большее уменьшение мощности проходящего в верхнюю ионосферу излучения ВН влияло присутствие во время измерений E_s -слоя с критической частотой до 4 МГц. При этом ионограммы вертикального зондирования показывали, что после включения ВН в E_s наблюдалось развитие

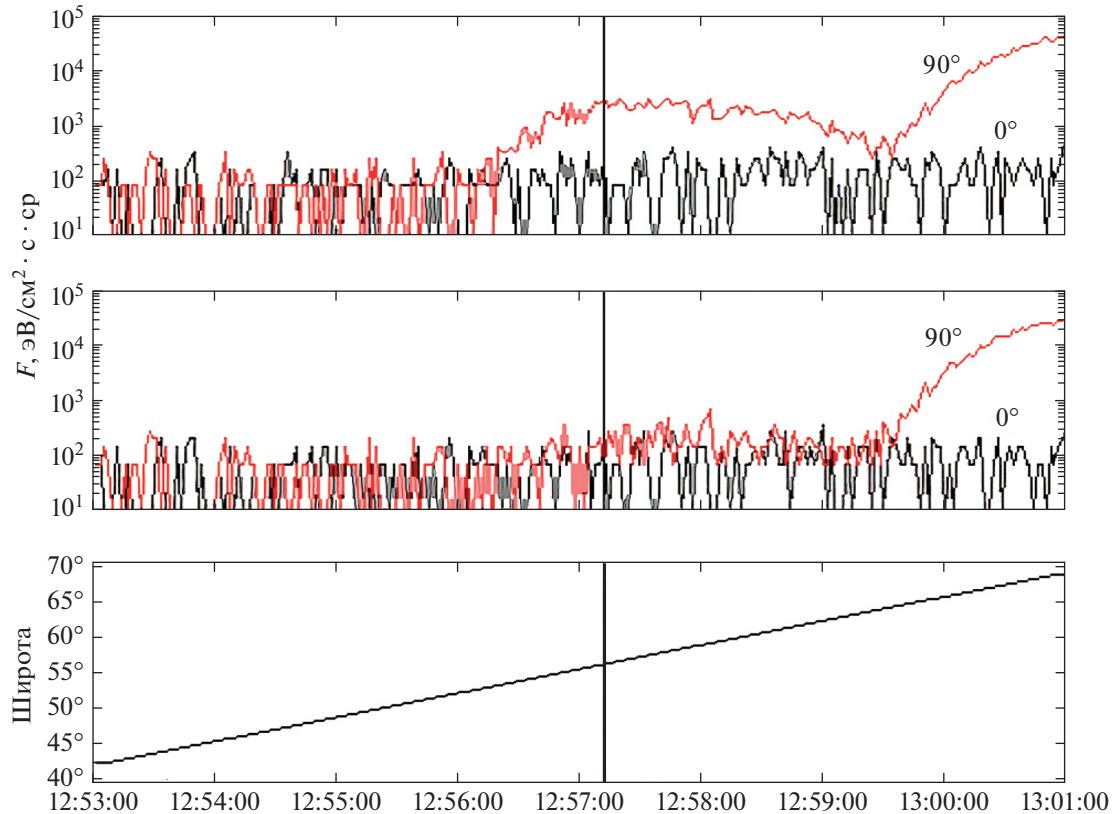


Рис. 2. Пример регистрации искусственной инъекции энергичных электронов, выполненной 3 июня 2019 г. с помощью спутника NOAA. На верхней и средней панелях рисунка показаны интенсивности потоков энергичных электронов, измеренные с помощью детекторов Д-90 и Д-0 для диапазона энергий $E_1 = 40\text{--}130$ кэВ и $E_2 = 130\text{--}287$ кэВ соответственно. На нижней панели показано изменение во времени широты орбиты спутника. Вертикальной линией отмечено время пролета спутника через центр возмущенной магнитной силовой трубки.

слоя $E_s, spread$, что указывает на генерацию в нем искусственных неоднородностей концентрации плазмы с l_{\perp} порядка нескольких сотен метров. Из этого можно заключить, что, помимо ожидаемого эффекта частичной экранировки, в E_s должно быть место дополнительное нелинейное поглощение энергии мощной радиоволны, связанное с нелинейным взаимодействием ВЧ с плазмой. С учетом всего вышесказанного можно оценить значение приведенной эффективной мощности излучения ВЧ P_{ef}^* , составляющее не более 3 МВт. При такой низкой мощности P_{ef}^* в этом сеансе ожидаемо не обнаруживалась генерация искусственного слоя F_{spread} на ионограммах вертикального зондирования, определяемого генерацией интенсивных среднemasштабных искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 0.5\text{--}2$ км в результате развития самофокусировочной неустойчивости мощной радиоволны в ВО ионосферы и эффекта аномального ослабления, связанного с генерацией мелкомасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \leq 50$ м при развитии тепло-

вой параметрической неустойчивости, а также рассеяния в свою моду на неоднородностях с $l_{\perp} \approx 100\text{--}200$ м [1, 5, 6, 20]. Все это свидетельствует о низком уровне интенсивности ИИТ. Однако, как следует из рис. 2, даже в таких условиях проведения измерений и при таком слабом взаимодействии мощной радиоволны с ионосферной плазмой детектором Д-90 регистрировалась стимулированная нагревом ионосферы искусственная инъекция энергичных электронов с $E_1 = 40\text{--}130$ кэВ и достаточно высокой плотностью их потока $F(1) \approx 3 \cdot 10^3$ электрон/см² · с · ср; лишь немного выше порога обнаружения регистрировались электроны с энергиями $E_2 = 130\text{--}287$ кэВ, для которых $F(2) \approx 2 \cdot 10^2$ электрон/см² · с · ср. В этом сеансе южная граница регистрации естественных авроральных высыпаний находилась на широте $\sim 62^\circ$ с.ш., вблизи которой все еще обнаруживается присутствие искусственной инъекции в ионосфере энергичных электронов.

На основе всех полученных экспериментальных данных следует заключить, что интенсивность искусственной инъекции энергичных элект-

тронов из радиационного пояса Земли в ионосфере должна в большей степени определяться уровнем их содержания в радиационном поясе, чем интенсивностью развития ИИТ.

2.3. Энергетические характеристики искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты

Рассмотренные выше результаты экспериментальных исследований позволяют оценить полную мощность, вносимую в ионосферу Земли обоих полушарий высыпавшимися энергичными электронами. В приведенных ниже оценках учитывалось наличие всех электронов с энергиями $E \geq 20$ кэВ, для которых, согласно изложенному в работах [35, 36, 38], максимум их спектральной плотности имеет место при $E \approx 20$ кэВ. Предполагается степенной характер спектра электронов со значениями показателя спектра ~ 1 и ~ 2.5 , характерными соответственно для ночных и полуденных часов проведения измерений в оптимальных условиях нагрева ионосферной плазмы с достаточно высоким содержанием энергичных электронов в радиационном поясе Земли. Зная энергетический спектр электронов, инжектируемых в результате модификации ионосферы мощными радиоволнами, и полагая площади областей высыпаний равными $(500 \text{ км} \times 1000 \text{ км}) = 5 \cdot 10^5 \text{ км}^2 = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$ в северном полушарии и $(500 \text{ км} \times 1500 \text{ км}) = 7.5 \cdot 10^5 \text{ км}^2 = 7.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$ в южном полушарии, а также более высокую интенсивность инжекции в южном полушарии, можно оценить полную мощность W , вносимую этими электронами в ионосферу обоих полушарий. По данным измерений в спокойных геомагнитных условиях, полученным с помощью спутников NOAA, в полуденные часы она, как правило, не превышает 0.1 кВт; в вечерние часы она составляет около 1 кВт, достигая величины 5–10 кВт в возмущенных геомагнитных условиях. Напомним, что измерения в ранние вечерние и особенно в дневные часы выполняются в условиях повышенного или даже высокого уровня линейного поглощения энергии ВН в нижней ионосфере, когда значение приведенной мощности излучения ВН P_{ef}^* не превышает 3–10 МВт и имеет место развитие ИИТ слабого уровня. В этих условиях интенсивные потоки высыпавшихся энергичных электронов могут наблюдаться только при высоком уровне их содержания в радиационном поясе Земли. Принимая во внимание результаты отдельных экспериментов, следует полагать, что в утренние часы инжекция энергичных электронов будет приблизительно такого же уровня, как и в ранние вечерние часы.

В ночное время суток в спокойных геомагнитных условиях при выполнении оптимальных условий взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой оценка полной мощности высокоэнергичных электронов, инжектируемых из радиационного пояса Земли в ионосферу обоих полушарий, может составлять 50–100 кВт; в возмущенных геомагнитных условиях мощность высыпаний может быть в несколько раз больше и достигать величины $W \approx 500$ кВт. Эта величина для условий проводимых измерений близка к генерируемой передатчиками стенда ВЧ-мощности: $P_0 \approx 450\text{--}600$ кВт. Такая большая величина мощности инжектируемых в ионосферу Земли энергичных электронов является индикатором сильного влияния на ионосферно-магнитосферные связи модификации среднеширотной ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона.

Представленные выше результаты выполненных на стенде СУРА исследований позволяют заключить, что искусственная инжекция энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты благодаря ее высокой энергетике и возможности использования в различное время суток и в различных геофизических условиях может с успехом применяться для изучения протекающих в магнитосфере процессов и оказания влияния на ионосферно-магнитосферные связи; она также может рассматриваться как мощный источник генерации вторичных возмущений в ионосферной плазме и в нейтральной атмосфере. Ниже (в разд. 3) будут продемонстрированы некоторые примеры такого влияния энергичных электронов.

2.4. Механизм стимуляции искусственной инжекции энергичных электронов в ионосферу при излучении мощной радиоволны в режиме “несущая”

Выполненные измерения продемонстрировали, что высыпание энергичных электронов регистрируется и в условиях, когда частота ВН немного превышает критическую частоту f_oF2 (в режиме “нагрева на просвет”), если при этом верхнегибридная частота для мощной радиоволны остается ниже критической частоты f_oF2 [44]. Этот факт является прямым доказательством того, что тепловая (резонансная) параметрическая неустойчивость через развитие тепловых компонент ИИТ и генерацию верхнегибридных и нижнегибридных плазменных колебаний должна лежать в основе механизма стимуляции инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на высоты ионосферы. Важно, что в $VO_{\text{д}}$ имеет место трансформация этих нижнегибридных колебаний на искусственных ионосферных неоднородностях в ОНЧ-волны, которые уходят в магнитосферу, где они, взаимодействуя с энергичными

электронами радиационного пояса Земли, способны изменять их питч-угловое распределение и вызывать их искусственную инъекцию в ионосферу, как это рассматривалось, например, в работах [6, 22, 45–47]. Такая схема генерации ОНЧ-волн при модификации ионосферной плазмы мощными радиоволнами КВ-диапазона дает возможность использовать излучение ВН в режиме “несущая” для стимуляции высыпания энергичных электронов помимо прямой их генерации за счет излучения наземными ОНЧ-передатчиками [26–28] или за счет нелинейной демодуляции модулированной по амплитуде мощной радиоволны КВ-диапазона (эффект Гетманцева) [29, 30, 48–50].

В предложенном выше механизме генерации ОНЧ-излучений существует, однако, одна проблема, которая требует своего разрешения. Известно, что время затухания естественных ОНЧ-излучений на трассе их многоскачкового распространения между магнитно-сопряженными областями ионосферы, как правило, не превышает 10–30 с, что намного короче времени уменьшения потока искусственной инъекции энергичных электронов до его естественного уровня после выключения ВН, которое составляет от нескольких минут до 10–15 мин в зависимости от условий проведения измерений. Такое сильное различие в значений времен релаксации ОНЧ-излучений и установления невозмущенного уровня потоков энергичных электронов требует включения специального механизма поддержания на более длительном временном интервале интенсивности этих излучений, если оставаться в рамках модели инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли через изменение их питч-углового распределения за счет взаимодействия волна–частица. Здесь может рассматриваться механизм их циклотронного усиления при распространении ОНЧ-излучений в магнитосфере Земли при наличии крупномасштабных плазменных неоднородностей (дактов плотности плазмы) [51, 52], либо следует допускать, что развивающиеся при модификации ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона дакты с увеличенной концентрацией плазмы захватывают в себя естественные ОНЧ-излучения, многократно увеличивая при этом их интенсивность, как это наблюдалось, например, в работе [53] и следует из результатов численного моделирования [54], с последующим каналированием их в область экватора возмущенной магнитной силовой трубки, поддерживая таким образом высокий уровень высыпаний энергичных электронов после выключения ВН. Согласно [21, 22], время релаксации дактов составляет от нескольких минут до 10–20 мин, что соответствует измеренному времени уменьшения интенсивности инъекции до ее невозмущенного уровня. Сделанные предположения

требуют, однако, дальнейшего изучения и всесторонней экспериментальной проверки.

3. ВОЗМОЖНЫЕ КАНАЛЫ ВЛИЯНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СОСТОЯНИЕ ИОНИЗИРОВАННОЙ И НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

3.1. *Ионизация атмосферы Земли энергичными электронами*

Представленные в настоящей работе результаты измерений убедительно демонстрируют, что модификация среднеширотной ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона в определенных условиях стимулирует интенсивную инъекцию (высыпание) энергичных электронов с энергиями $E \approx 100–150$ кэВ и плотностью их потока до $100–200$ электрон/с · см² · ср · кэВ из радиационного пояса Земли в ионосферу. Установлено, что зона их высыпаний в оптимальных условиях проведения экспериментов имеет большие пространственные размеры: ~1500 км вдоль геомагнитного меридиана с большей ее протяженностью на север от станда и ~500 км поперек меридиана с максимальной интенсивностью высыпаний, как правило, в возмущенной магнитной силовой трубке, опирающейся на $ВО_{\text{ц}}$ ионосферы. Важно также, что высыпания наблюдаются в обеих магнитно-сопряженных областях ионосферы, положение которых определяется геометрией возмущенной магнитной силовой трубки. Инжектируемые в ионосферу электроны способны вызывать дополнительную ионизацию плазмы на высотах ее D- и E-областей (на высотах $h \approx 70–130$ км), что приводит к увеличению в них поглощения радиоволн [9, 36, 55, 56].

Изменение величины поглощения на высотах нижней ионосферы достаточно легко детектируется в экспериментах по ослаблению интенсивности ветвей ионограмм на частотах меньше 2–3 МГц (или по вариациям минимальной регистрируемой частоты следов на ионограммах), а также по ослаблению интенсивности кратных отражений, что может служить диагностическим признаком появления высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли. В отличие от спутниковых измерений регистрация этого эффекта с помощью станций вертикального зондирования ионосферы позволяет получить информацию не только об условиях появления высыпаний, но и о размерах области их появления и, что очень важно, о характерных временах развития и релаксации искусственной инъекции, если используется 1-минутный режим съема ионограмм. В экспериментах на стенде СУРА такие измерения были выполнены с помощью

ионосферной станции КазФУ, расположенной вблизи г. Казань на расстоянии ~ 170 км к востоку от стенда [39, 40]. Анализ полученных в них экспериментальных данных, относящихся к вечерним и ночным часам проведения измерений, показал, что в условиях “холодного старта” (модификация невозмущенной ионосферы) характерное время развития поглощения интенсивности сигнала ионозонда (или появления энергичных электронов) после первого включения ВН составляет от нескольких до 10–12 мин, однако такое поглощение начинает регистрироваться существенно быстрее (уже через 1–2 мин) после включения ее второго импульса, если пауза между импульсами ВН не превышала 10–15 мин.

По результатам выполненных измерений можно также заключить, что для 3-го и следующих импульсов включения мощной радиоволны четкая корреляция подавления интенсивности зондирующего сигнала с включением ВН нарушалась: сигнал мог иметь малую интенсивность или, наоборот, свой максимум как во время ее излучения, так и во время паузы. Это указывает на наложение влияния эффектов накопления и последствия от разных циклов излучения ВН, которые особенно сильно проявляются при достаточно коротких временах ее излучения и паузы (например, при работе стенда в циклическом режиме [1–5 мин – излучение, 1–5 мин – пауза]). Сейчас ясно, что на эволюцию плазменных возмущений на временах 10–20 мин после выключения ВН оказывает влияние не только вынос плазмы из $VO_{\text{ц}}$, как это считалось раньше, но и воздействие на ионосферу высыпавшимися в нее энергичными электронами. Совокупное их влияние приводит к большому разбросу результатов измерений и усложнению интерпретации изучаемых явлений.

Несмотря на отмеченные выше сложности, перспективность ионозондовых измерений очевидна. С их помощью, используя рутинные измерения, можно изучать динамические характеристики высыпаний и их вариации в течение суток, зависимость их свойств от геомагнитной активности и степени возмущенности ионосферы, от характеристик мощной радиоволны (ее мощности, поляризации, угла наклона диаграммы направленности излучения, высоты отражения ВН) и т.д. Важно, что уже накопленный обширный банк экспериментальных данных позволяет выполнить часть этой работы без проведения новых широкомасштабных нагревных экспериментов.

В работах [55, 57] было установлено, что дополнительная искусственная ионизация атмосферы на высотах $h \leq 120$ км энергичными электронами, инжектируемыми в ионосферу при работе стенда СУРА, может обнаруживаться на расстоянии до 1000 км и более от стенда. При этом

для обеспечения необходимой степени ионизации плазмы нижней ионосферы по сделанным в работе [55] оценкам плотность потока электронов с энергиями $E \approx 100$ кэВ должна составлять величину, превышающую 10^7 электрон/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Это позволяет дать независимую оценку полной мощности, которую энергичные электроны вносят в ионосферу Земли: $W \geq 250$ кВт, что хорошо соответствует приведенным в п. 2.3 данным.

Рассмотренные в настоящей работе результаты исследований по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли и их влияния на нижнюю ионосферу позволяют дать интерпретацию до сих пор необъясненного эффекта, обнаруженного в работе [58] еще в первых нагревных экспериментах на стенде “Боулдер” (Колорадо, США) при измерении величины индуцированного нагревом поглощения радиоволн в D-области ионосферы. В этой работе было продемонстрировано, что после продолжительного, 10-минутного нагрева ионосферы мощными радиоволнами наблюдалась длительная (до 10 мин) релаксация поглощения пробных радиоволн, которая никогда не регистрировалась при коротких (до 5 мс) импульсах излучения ВН; для них характерные времена роста и ослабления поглощения не превышали нескольких десятков миллисекунд, соответствуя результатам измерений в естественных условиях. Кроме того, нагрев ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации здесь был неожиданно более эффективен по сравнению с волнами X-поляризации. Эти результаты не укладывались в рамки принятых представлений о модификации нижней ионосферы мощными радиоволнами. Сейчас ясно, что наблюдаемые эффекты могут быть связаны со стимулированным мощной радиоволной высыпанием энергичных электронов, влияние которых на нижнюю ионосферу может продолжаться до 10–15 мин; при этом стимуляция высыпаний при модификации ионосферной плазмы мощными радиоволнами O-поляризации должна быть более эффективной из-за резонансного характера взаимодействия ВН с плазмой и более интенсивной генерации ИИТ.

3.2. Генерация плазменных возмущений во внешней ионосфере и в магнитно-сопряженной стенду СУРА области ионосферы

Генерация во внешней ионосфере дактов с увеличенной плотностью плазмы при модификации F2-слоя ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации было надежно установлено в экспериментах по зондированию ионосферной плазмы аппаратурой, расположенной на борту спутников DEMETER и DMSP. Измерения выполнялись как на стенде СУРА, так и на стенде HAARP; их результаты суммированы в работах

[21, 22] соответственно. Было установлено, что они обнаруживаются на высотах $h \geq 500$ км; при оптимальных условиях модификации ионосферы мощными радиоволнами увеличение концентрации плазмы в них может составлять до 40% относительно фонового ее значения. Поперечные к геомагнитному полю размеры дактов равны 60–150 км, увеличиваясь с ростом высоты. Численными методами на основе модели SAMI2 было показано, что такие дакты образуются за счет выноса плазмы из области ее сильного разогрева вблизи высоты отражения ВН во внешнюю ионосферу вдоль силовых линий геомагнитного поля [22, 59, 60]. В работе [53] было продемонстрировано, что такие дакты способны каналировать ОНЧ-излучения с увеличением их интенсивности в дакте на 20–30% относительно фонового ее значения вне его. При благоприятных ионосферных условиях и при выполнении оптимальных условий для взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой [21] их формирование при модификации F2-слоя ионосферы мощными радиоволнами является обычным явлением, поэтому их генерацию можно использовать для воздействия на ионосферно-магнитосферные связи.

Помимо указанных выше, отметим работу [61]. В ней приведены данные о регистрации ОНЧ-сигналов на частотах $f \leq 10$ кГц в пункте, расположенном в 30 км от нагревного стенда СУРА, излучавшего в режиме [2 мин – излучение, 8 мин – пауза]. Контроль за состоянием возмущенной магнитной силовой трубки осуществлялся по прохождению через нее “свистящих атмосфериков” (диапазон ОНЧ-радиоволн). Эти исследования показали, что при возмущении F2-слоя ионосферы полем мощной радиоволны КВ-диапазона имеет место возникновение каналов (дактов), ответственных за распространение ОНЧ-радиоволн вдоль силовых линий геомагнитного поля между магнитно-сопряженными областями ионосферы. В таком достаточно коротко импульсном режиме периодического излучения ВН измеренные характерные времена развития и релаксации таких каналов составляли ~ 1 мин и 2–4 мин соответственно. Столь короткие времена исключают возможность их формирования за счет термомодифузионных процессов распространения плазменных возмущений от области взаимодействия ВН с плазмой в F2-области до магнитно-сопряженной к ней ионосфере. В этой работе предполагалось, что развитие таких каналов (дактов) на длине всей возмущенной магнитно-силовой трубки должно быть связано с воздействием на плазму пучков сверхтепловых электронов, ускоренных в резонансных областях развития плазменных неустойчивостей.

По ряду причин измерения характеристик плазменных возмущений в возмущенной магнитной силовой трубке и в магнитно-сопряженной к

ВО_ц ионосфере до сих пор на стенде СУРА носили лишь эпизодический характер. Можно указать только на несколько публикаций, в которых приведены результаты таких исследований.

Появление плазменных возмущений и КНЧ–ОНЧ-излучений во внешней ионосфере регистрировалось в 1991 г. с помощью аппаратуры, размещенной на борту спутника “Космос-1809” [62]. Было определено, что размеры области с повышенной интенсивностью ОНЧ-излучений на высоте его орбиты $h \approx 960$ км могут достигать 500–700 км, что намного превышает размер области нагрева плазмы в поле пучка мощных радиоволн вблизи высоты их отражения: ~ 100 км, и больше соответствует размерам зоны искусственной инъекции энергичных электронов в ионосферу. В этих областях наблюдали повышение температуры электронов и развитие неоднородностей плотности плазмы с размерами вдоль орбиты спутника ~ 80 км, которые вызывают мерцания проходящих через них сигналов спутниковых радиомаяков.

В работе [63] приведены результаты измерения ОНЧ–КНЧ-радиоволн, которые регистрировались на высотах внешней ионосферы (на высотах 500–1000 км) при модификации ночной F2-области ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации, излучаемыми стендом СУРА. Регистрация этих радиоволн выполнялась с помощью размещенных на борту спутника Интеркосмос-24 приборов. Во время нагрева ионосферной плазмы была зарегистрирована генерация низкочастотных излучений в диапазоне 10 Гц–1.5 кГц (в диапазоне КНЧ) с максимумом их интенсивности на частотах 50–70 Гц и в диапазоне 7.5–15 кГц (в ОНЧ-диапазоне) с максимумом на частотах 8–10 кГц. Такие излучения обнаруживались, когда орбита спутника проходила на расстоянии меньше 100 км от центра возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на ВО_ц. Следовательно, эти волны возбуждались в трубке диаметром 100–200 км и потом распространялись вдоль силовых линий геомагнитного поля. Отмечается, что эксперименты по возбуждению КНЧ–ОНЧ-радиоволн в дневных условиях не дали положительных результатов, что было позднее подтверждено в экспериментах со спутником DEMETER [21]. В работе [63] усиление КНЧ-шумов объяснялось воздействием на плазму сверхтепловыми электронами, ускоренными в области резонансного взаимодействия ВН с плазмой; генерация ОНЧ-радиоволн объяснялась трансформацией нижнегибридных плазменных колебаний, возбуждаемых при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, в свистовую моду распространения на мелкомасштабных неоднородностях концентрации плазмы, которые

также создаются при развитии этой неустойчивости (см. выше п. 2.4).

Ряд измерений в магнитно-сопряженной стенду СУРА области ионосферы был проведен с использованием бортовой аппаратуры спутника DEMETER [40]. Важно, что аппаратура этого спутника позволяла одновременно измерять как вариации плотности и температуры плазмы, так и потоки высыпавшихся энергичных электронов. Недавно выполненная дополнительная обработка полученных экспериментальных данных показала, что в магнитно-сопряженной стенду СУРА области ионосферы обнаруживаются вариации концентрации электронов N_e с $\delta N_e \approx 10\%$ с пространственным масштабом флуктуаций ~ 90 км вдоль орбиты спутника, которые регистрировались на расстоянии ~ 370 км. Прибор IDP спутника DEMETER зарегистрировал в этой области сильную искусственную инжекцию энергичных электронов на ионосферные высоты с максимумом их плотности потока до 800 электрон/см² · с · ср · кэВ для электронов с энергиями $E \approx 100$ – 120 кэВ; максимальная энергия инжектируемых электронов достигала значений $E \approx 300$ кэВ. Вариации температуры электронов T_e с $\delta T_e \approx 2$ – 3% слабо выделялись на фоновом уровне естественных флуктуаций, что не позволяет уверенно говорить об их искусственном характере. Эти результаты обсуждались в докладе [64].

Анализ результатов измерений, выполненных в магнитно-сопряженной к стенду СУРА области ионосферы, приводит к выводу, что искусственные вариации электронной концентрации плазмы N_e , если и регистрировались на фоне их естественных флуктуаций, то только в тех сеансах, когда имело место интенсивное высыпание энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу. Это позволяет предположить, что генерация таких возмущений N_e определяется инжектируемыми в ионосферу энергичными электронами. Здесь важно подчеркнуть, что размеры области генерации возмущений N_e намного превышают поперечные размеры возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на VO_{\perp} , и более соответствуют размерам области высыпаний энергичных электронов. В подтверждение сделанного вывода о возможной связи генерации плазменных возмущений с высыпанием энергичных электронов из радиационного пояса Земли укажем на работу [65], в которой обнаружена такая связь для генерации естественных неоднородностей в F-слое ионосферы. Развитие интенсивной радиоавроры при вторжении в ионосферу потоков энергичных электронов обсуждается в работе [51].

Поскольку энергичные электроны одновременно высыпаются в ионосферу обоих полушарий, естественно допускать, что они могут вызывать развитие аналогичных возмущений плотности и температуры плазмы и в северном полушарии или

усиливать уже существующие в области высыпаний крупномасштабные искусственные ионосферные неоднородности. Не исключено, что именно такого рода вариации плотности плазмы регистрировались в отмеченных выше экспериментах [62]. Важно указать, что из-за более слабой естественной возмущенности ионосферной плазмы и более низкого уровня естественных высыпаний энергичных электронов в средних широтах такие исследования на стенде СУРА имеют, как это уже отмечалось ранее, явные преимущества по сравнению с измерениями на более высокоширотных нагревных стендах HAARP и EISCAT-heater.

В заключение данного раздела необходимо сделать важное замечание. Как отмечалось ранее, при изучении свойств искусственной инжекции энергичных электронов в ионосферу для модификации F2-области мы всегда использовали мощные радиоволны O-поляризации, поскольку это обеспечивает более высокий уровень развития ИИТ [1, 5, 6]. Однако выполненные в последние годы на стенде EISCAT-heater крупномасштабные исследования по нагреву ионосферных волнами X-поляризации показали, что и в этом случае в определенных условиях могут эффективно возбуждаться многие типы плазменных возмущений, которые обычно регистрируются при ее модификации волнами O-поляризации [33].

В октябре 2021 г. на стенде СУРА были проведены эксперименты по нагреву ионосферы волнами X-поляризации с целью изучения возможности стимулирования ими инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли. В одном из сеансов были зарегистрированы потоки энергичных электронов, свойства которых соответствуют характеристикам их искусственной инжекции, стимулированной модификацией ионосферы волнами O-поляризации. Эти эксперименты будут продолжены на стенде СУРА в ближайшее время. Следует отметить, что на возможность стимулирования инжекции энергичных электронов из радиационного пояса с использованием мощных радиоволн X-поляризации, указывалось еще в работе [66], в которой приводятся результаты экспериментов на стенде Platteville (Колорадо, США).

3.3. Генерация микроволнового излучения под воздействием высыпавшихся энергичных электронов и его влияние на нейтральную компоненту атмосферы Земли на ионосферных, мезосферных и тропосферных высотах

Еще одним развиваемым в НИРФИ направлением является изучение генерации микроволнового излучения (с длинами волн от миллиметров до дециметров) на ионосферных высотах под воздействием высыпавшихся энергичных электро-

нов. Ионосфера, как любое нагретое тело, излучает электромагнитную энергию в широком диапазоне радиоволн. Это тепловое излучение имеет флуктуационный характер и создается хаотическими движениями заряженных частиц. Интенсивность теплового излучения ионосферы в масштабе радиоярких температур составляет в метровом и дециметровом диапазонах единицы и десятки доли градусов соответственно [67]. При этом температура электронов в ионосфере равна 1000–1500 К. При воздействии на F2-область ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона O -поляризации вблизи высоты их отражения может происходить значительный нагрев электронов плазмы до температур 3000–4500 К [13, 68]. Соответственно, имеет место усиление интенсивности теплового излучения в дециметровом и метровом диапазонах длин волн.

В работах [69, 70] было дополнительно обнаружено мощное спорадическое СВЧ-радиоизлучение ионосферы в широком диапазоне сантиметровых и дециметровых длин волн, интенсивность которого составляла десятки градусов яркостной температуры. Было установлено, что это излучение коррелирует с всплесками солнечной активности и связанными с ними геомагнитными возмущениями [71, 72]. Только в середине 90-х годов прошлого столетия природа этого явления была объяснена в работах [73, 74] на основе “ридберговского механизма” излучения нейтральных атомов и молекул на ионосферных высотах. Данный механизм включает в себя переходы электронов между высоковозбужденными (главное квантовое число $n > 10$) ридберговскими уровнями нейтральных атомов и молекул ионосферы, возбужденными при их столкновении с потоком солнечных частиц высокой энергии. Энергетические переходы с ридберговских состояний заполняют практически весь диапазон электромагнитного спектра верхнеатмосферных эмиссий, начиная от жесткого УФ-излучения. Отметим, что радиолинии излучения, соответствующие переходам между ридберговскими состояниями вплоть до $n \approx 300$ наблюдались в галактических областях ионизированного водорода H II и в планетарных туманностях [75]. Аналогичный механизм, но на ускоренных электронах нагретой мощным КВ-излучением ионосферной плазмы, был привлечен к интерпретации искусственного излучения ионосферы в дециметровом диапазоне волн [76].

В настоящем разделе работы обсуждаются результаты выполненных в последние годы экспериментальных исследований ридберговского излучения нейтральной компоненты ионосферы, стимулированного мощным КВ-радиоизлучением среднеширотного стенда СУРА. Напомним, что ридберговскими называются такие высоковозбужденные состояния атомов и молекул, которые расположены вблизи порога ионизации и

характеризуются бесконечной последовательностью энергетических уровней в припороговой области энергий. Ридберговские атомы и молекулы имеют на своей верхней оболочке один высоковозбужденный слабосвязанный электрон. При экстремально большом возбуждении атом (молекула) может рассматриваться как макроскопический объект, так как при $n = 1000$ его размер, определяемый радиусом орбиты электрона, равен $r_n \approx 10^{-8}n^2 \approx 10^{-2}$ см. Поэтому ридберговский атом (молекулу) можно рассматривать как положительно заряженный ионный остов с одним ридберговским электроном. При этом для многих задач остов можно считать точечным положительным зарядом, а в качестве модели ридберговского атома рассматривать водородоподобный атом. В такой модели энергии ридберговских состояний изолированного атома, отсчитанные от энергии ионизации, определяются формулой Ридберга:

$$E_n = R(1 - m_e/M)(n - \delta)^{-2},$$

где $R = 13.6058$ эВ – постоянная Ридберга (энергетическая), m_e – масса электрона, M – масса ядра, δ – квантовый дефект заряда ядра, вклад которого при больших n пренебрежимо мал.

Ридберговские состояния метастабильны: время жизни ридберговского атома для $n = 1000$ составляет $\tau_n \approx 10^{-8}n^3 \approx 10$ с. Частота переходов между ридберговскими уровнями $m \rightarrow n$ определяется выражением

$$\nu = R_\nu (1 - m_e/M)(1/n^2 - 1/m^2),$$

где $R_\nu = 3.289842 \cdot 10^{15}$ Гц – постоянная Ридберга (спектроскопическая). Из этого уравнения следует, что переходы между соседними состояниями $(n + 1) \rightarrow n$ отвечают частотам излучения радиоволн $\nu_n \approx 2R_\nu n^{-3}$, которые лежат в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах при $n \approx 25$ –60, в сантиметровом – при $n \approx 60$ –130 и в дециметровом – при $n \approx 130$ –280. Особо следует отметить, что расстояние между соседними ридберговскими линиями, $\Delta\nu_n$, в сантиметровом диапазоне составляет $\Delta\nu_{103} \approx 170$ МГц, в дециметровом – $\Delta\nu_{221} \approx 8$ МГц, а в метровом диапазоне при $n > 300$ с учетом различных факторов, приводящих к уширению спектральной линии (соударения, эффекты Доплера, Зеемана и др.), спектр излучения становится практически сплошным.

В табл. 1 приведены основные характеристики атомов, находящихся в первом возбужденном состоянии с $n = 2$, и для ридберговских атомов с $n = 1000$. Отметим, что концентрация нейтральных атомов и молекул (N_2 , O_2 и O) в F2-слое ионосферы равна $N_a \approx 10^9$ см $^{-3}$, что соответствует расстоянию между ними $\sim 10^{-3}$ см. Эта величина сопоставима с размерами ридберговских атомов и молекул при $n > 300$. В этом случае их орбиты начинают соприкасаться, что приводит к значи-

Таблица 1. Основные параметры ридберговских состояний атомов

Главное квантовое число	Энергия связи электрона в атоме (потенциал ионизации), эВ	Размер атома (радиус орбиты электрона), см	Период обращения электрона по орбите, с	Естественное время жизни, с	Частота переходов между соседними состояниями, МГц
2	~5	~10 ⁻⁸	~10 ⁻¹⁵	~10 ⁻⁸	~10 ⁹
1000	~10 ⁻⁵	~10 ⁻²	~10 ⁻⁶	~10	~1

тельному усилению столкновительных и радиационных взаимодействий между ними, которые играют большую роль в физико-химических процессах в атмосфере Земли. Кроме того, на ионосферных высотах время жизни ридберговских состояний атомов и молекул, τ , определяется частотой их соударений с электронами $v_e \approx 500 \text{ с}^{-1}$, что соответствует $\tau \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Основные естественные механизмы образования ридберговских состояний на высотах ионосферы включают в себя следующие процессы: фотовозбуждения при поглощении солнечного жесткого ультрафиолетового излучения; возбуждения при столкновении энергичных электронов солнечных вспышек с атомами и молекулами атмосферы, а также электронов, выпадающих из радиационных поясов Земли при сильных геомагнитных возмущениях; диссоциативное возбуждение. Поскольку потенциалы ионизации основных атомов и молекул атмосферы на ионосферных высотах N_2 , O_2 и O равны соответственно 15.5, 12.2 и 13.62 эВ, что много меньше энергии указанных процессов. В этих процессах вполне могут возбуждаться атомы и молекулы вплоть до предионизационных уровней и даже ионизировать их. Далее, в процессе перехода ридберговских атомов и молекул в нижнее состояние излучается широкий спектр электромагнитных волн: от радиоволн до ультрафиолетового излучения. Согласно экспериментальным данным работ [70–72], интенсивность этого излучения в дециметровом диапазоне длин волн сопоставима или даже превосходит типичные уровни всплесков радиоизлучения Солнца во время солнечных вспышек.

В основе искусственного механизма образования ридберговских состояний на высотах ионосферы Земли (высоты 200–300 км) лежит модификация мощными радиоволнами КВ-диапазона O -поляризации F2-слоя ионосферы, когда вблизи высоты их отражения развиваются различные плазменные неустойчивости, приводящие к возбуждению интенсивной ИИТ, что в конечном итоге приводит к сильному разогреву плазмы, когда температура электронов T_e в ней может увеличиться в 2–3 раза. Такое увеличение T_e , а также ускорение фоновых электронов в областях с интенсивной высокочастотной плазменной турбулентностью приводит к появлению электронов с

энергиями до 5–30 эВ [6, 13]. Эти “горячие” электроны имеют энергию выше потенциала ионизации N_2 , O_2 и O и, соударяясь с ними, могут перевести их в высоковозбужденное ридберговское состояние или вызвать дополнительную искусственную ионизацию атмосферы.

Как показали выполненные в работе [39–41] исследования, высокоэнергичные электроны с $E \approx 100 \text{ кэВ}$ могут появляться на высотах ионосферы за счет их искусственной инжекции из радиационного пояса Земли при нагреве F2-области мощными радиоволнами. Эти электроны, как и в случае солнечной радиации, в результате их многократных столкновений с атомами и молекулами атмосферы могут также переводить их в высоковозбужденное ридберговское состояние. На следующем этапе, как и в рассмотренном выше естественном механизме, происходят их переходы в нижние энергетические состояния с излучением широкого спектра электромагнитных волн.

Исследование характеристик СВЧ-излучения, формирующегося на ионосферных высотах при модификации ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом СУРА, проводилось в 2014–2018 гг. Стенд излучал волны O -поляризации на частотах в диапазоне 4.3–6.8 МГц, как правило, в режиме [10–15 мин – излучение, 10–15 мин – пауза] с эффективной мощностью $P_{ef} = 80–180 \text{ МВт}$, величина которой увеличивается с ростом частоты ВЧ. Ширина диаграммы направленности антенны стенда СУРА, которая имеет размеры 300 м × 300 м составляет $\sim 14^\circ$ на частотах ВЧ $\sim 5 \text{ МГц}$. Как правило, пучок мощных радиоволн в наших экспериментах излучался под углом 12° на юг от вертикали (в область “магнитного зенита”), чтобы увеличить эффективность модификации ионосферы [6, 13]. Следует отметить, что все рассматриваемые в работе измерения выполнялись в спокойных и очень спокойных геомагнитных условиях, когда значения суммарного индекса геомагнитной активности ΣK_p не превышали 20, причем спокойными были не только дни измерений, но и несколько предыдущих дней.

Измерения интенсивности СВЧ-радиоизлучения атмосферы осуществлялись с помощью спектральных радиометрических приемников модуляционного типа (радиометров) дециметрового диа-

Таблица 2. Технические характеристики радиометрического комплекса

Характеристика приемника	Значения	
	$\lambda = 20$ см	$\lambda = 52$ см
Частота приема, МГц	1350–1500	574
Затухание вне полосы приема, дБ	~45	~35
Количество каналов	10	1
Полоса пропускания канала, МГц	15	5
Интервал между каналами, МГц	15	–
Флуктуационная чувствительность, К	0.20	0.15
Частота модуляции, кГц	1	1
Время интегрирования сигнала, с	1	1
Ширина диаграммы направленности приемной антенны	14°	15°

пазона волн на частотах $f_1 = 1\text{--}2$ ГГц и $f_2 = 574$ МГц. Технические характеристики радиометрического комплекса приведены в табл. 2. Комплекс размещался на территории стенда СУРА. Прием радиоизлучения осуществлялся на антенны рупорного и параболического типов. Измерения проводились при условии, что пространственная ориентация диаграмм направленности антенн радиометров и стенда СУРА совпадала. Калибровка принимаемого радиоизлучения в масштабе яркостных температур осуществлялась по двум источникам излучения, находящимся в дальней зоне антенн: температуре неба в зените ($T_{\text{я}} \approx 3$ К) и температуре поверхности земли с растительностью ($T_{\text{я}} \approx T_0$, где T_0 – приземная температура воздуха).

На рис. 3 и 4 представлены примеры регистрации интенсивности радиоизлучения атмосферы (в масштабе яркостных температур) в полосе спектрального канала $f_1 = (1450 \pm 8)$ МГц, которому соответствует частота $\nu_n = 1451.5$ МГц перехода между ридберговскими состояниями $\{m = 166 \rightarrow n = 165\}$. Частота ВН $f_{\text{ВН}}$ была равна 4300 кГц для сеанса на рис. 3 и 5828 кГц для сеанса на рис. 4; в обоих случаях режим работы стенда был [10 мин – излучение, 10 мин – пауза] (или $[\pm 10$ мин]). Здесь и ниже на рисунках время работы стенда СУРА отмечено горизонтальными жирными отрезками линий вдоль оси времени. В первом случае (рис. 3) измерения проводились 8 сентября 2014 г. в послеполуденные часы. Была зарегистрирована минимальная из всех экспериментах пиковая интенсивность ридберговского излучения с $\Delta T_{\text{я}} \approx 9$ К. Во втором случае (рис. 4) эксперимент проводился 28 марта 2014 года в поздние вечерние часы. В этом случае была зарегистрирована максимальная пиковая интенсивность ридберговского излучения с $\Delta T_{\text{я}} \approx 43$ К.

Из рис. 3 и 4 видно, что интенсивность регистрируемого излучения сильно флуктуирует во времени. По данным измерений 28 марта 2014 г.

после включения стенда в режиме $[\pm 10$ мин] микроволновое излучение появляется только в третьем импульсе ВН с задержкой 7 мин относительно его начала, в четвертом импульсе эта задержка уже составляет 2 мин и излучение начинает регистрироваться практически сразу после включения пятого импульса ВН. Похожая динамика развития поглощения низкочастотных участков ветвей ионограмм наблюдалась нами в работах [39, 40].

За период исследований всего было выполнено 11 циклов воздействия мощным радиоизлучением стенда СУРА на ионосферу. Результаты радиометрических измерений интенсивности радиоизлучения ридберговских атомов и молекул верхней атмосферы приведены в табл. 3. В семи циклах зарегистрировано ридберговское излучение атомов и молекул верхней атмосферы в дециметровом диапазоне волн с пиковой интенсивностью $\Delta T_{\text{я}} \approx 10\text{--}26$ К в утренние и послеполуденные часы и до $\Delta T_{\text{я}} \approx 30\text{--}43$ К в поздние вечерние и ночные часы. Эти значения хорошо согласуются с полученными в работах [69, 70] результатами измерения интенсивности естественного спорадического излучения ионосферы во время солнечных вспышек и почти в 20–30 раз превышают результаты измерений интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы в дециметровом диапазоне длин волн, зарегистрированного в работе [76].

На рис. 5 приведен нормированный спектр интенсивности радиоизлучения атмосферы в диапазоне частот 1350–1500 МГц с разрешением 15 МГц, полученный 02.04.2015 г. при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА на частоте волны накачки $f_{\text{ВН}} = 6720$ кГц. В спектре хорошо различаются два спектральных максимума, совпадающие с частотами переходов между ридберговскими состояниями $\{m = 169 \rightarrow n = 168\}$ с $\nu_n = 1375.35$ МГц и $\{m = 166 \rightarrow n = 165\}$ с $\nu_n = 1451.5$ МГц. Отметим, что в исследуемом

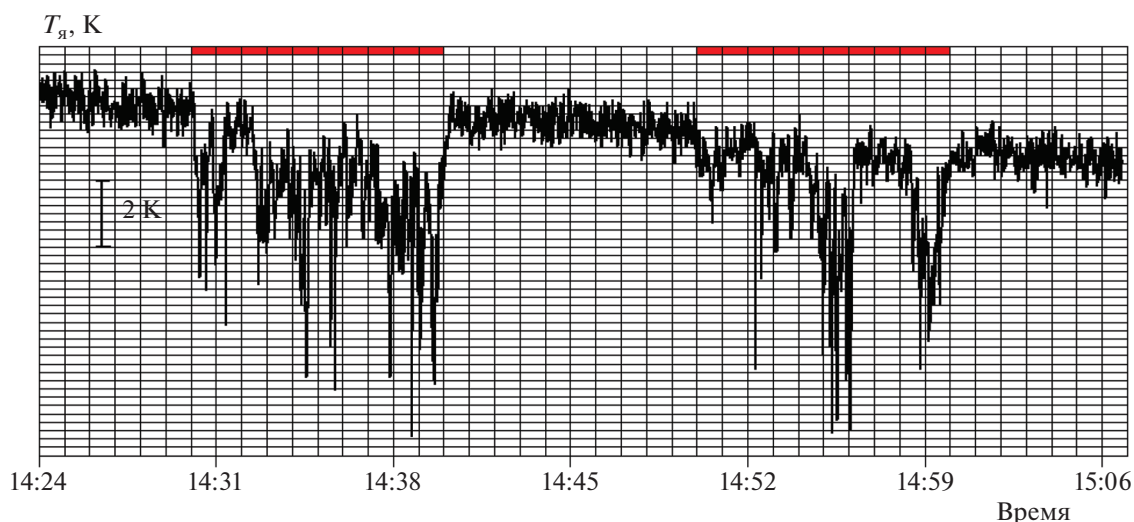


Рис. 3. Интенсивность микроволнового радиоизлучения атмосферы в полосе спектрального канала $f = (1450 \pm 8)$ МГц 08.09.2014 г. (на рис. 3 и 4 увеличение яркостной температуры отвечает направлению вниз).

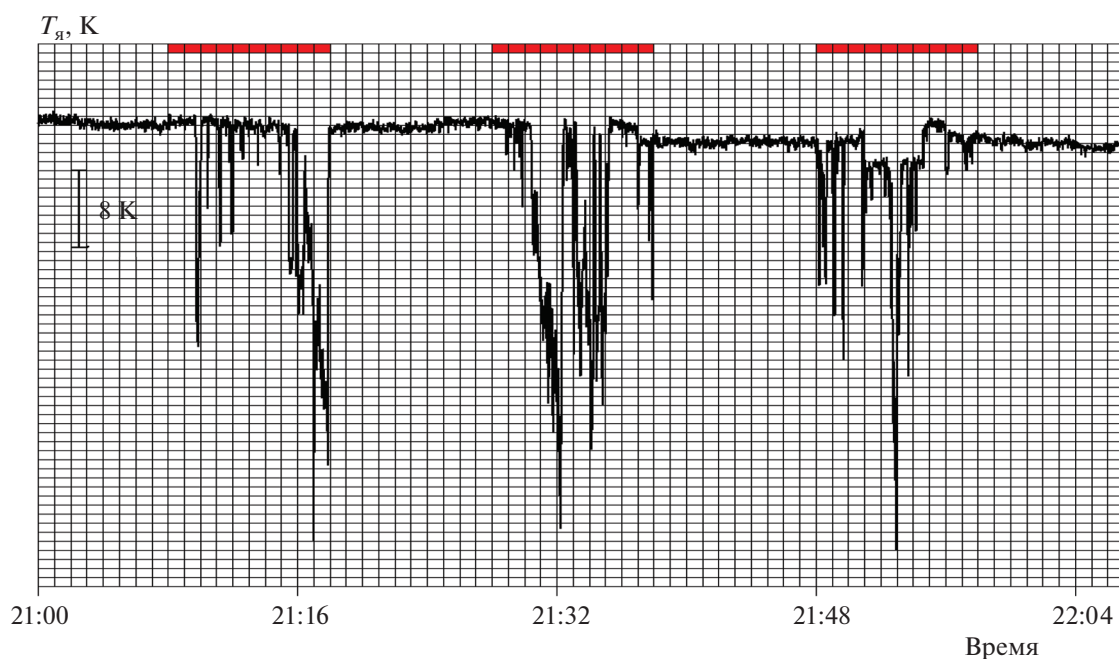


Рис. 4. Интенсивность микроволнового радиоизлучения атмосферы в полосе спектрального канала $f = (1450 \pm 8)$ МГц 28.03.2014 г.

диапазоне частот расположены пять ридберговских линий. Отсутствие выраженных спектральных особенностей для трех других линий можно объяснить меньшим количеством ридберговских атомов и молекул на данных уровнях, а также вероятностью переходов не только на соседний уровень, но и на любой другой нижележащий уровень с излучением на более высокой частоте, не попадающей в полосу приемника.

Подводя итоги выполненным исследованиям можно заключить, что обнаружен новый канал воздействия на нейтральную атмосферу Земли через генерацию микроволнового излучения, которое является результатом высвечивания возбужденных до ридберговских состояний нейтральных атомов и молекул энергичными электронами, инжекция которых на ионосферные высоты стимулируется модификацией ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона. Определены

Таблица 3. Результаты измерений радиоизлучения атмосферы на частотах $f_1 = (1450 \pm 8)$ МГц ($N = 1-5$) и $f_2 = (574 \pm 3)$ МГц ($N = 6,7$)

Дата, время	$f_{\text{ВН}}$, кГц ($f\phi F2$, МГц) [режим работы]	Высота отражения волны накачки $h_{\text{отр}}$, км	Интенсивность радиоизлучения (пиковая) $\Delta T_{\text{я}}$, К
27.03.2014, 21:21–22:11	5828 (7.2 → 6.4) [+9 мин, –1 мин]	240 → 270	~30
28.03.2014, 20:28–22:23	5828 (8.4 → 6.5) [±10 мин]	220 → 255	~43
29.03.2014, 00:50–01:10	4300 (5.6) [несущая]	260	~38
08.09.2014, 14:10–15:20	4300 (–) [±10 мин]	155 → 185	~9
02.04.2015, 17:53–20:33	6720 (8.2 → 6.9) [+10 мин, –5мин]	220 → 285	~23
29.08.2018, 10:01–12:50	4300 (4.5) [14 мин в режиме (±30 с), –16 мин]	195	~20
30.08.2018, 09:30–12:00	4300 (4.9) [+14 мин, –16 мин]	175	~26

характеристики микроволнового радиоизлучения верхней атмосферы, обусловленного излучением ридберговских атомов и молекул с главным квантовым числом $n = 163-169$ и $n = 225$ (дециметровый диапазон длин волн). Интенсивность радиоизлучения составила 10–45 К с большими ее значениями в поздние вечерние и ночные часы, когда имеет место наиболее эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F2-области ионосферы,

приводящее к ускорению электронов до сверхтепловых энергий [6, 13] и к высыпанию энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты [39–41]. Интенсивность обнаруженного микроволнового радиоизлучения сравнима с интенсивностью такого радиоизлучения, генерируемого при солнечных вспышках.

Важно отметить, что микроволновая составляющая ридберговского излучения практически без потерь (за исключением нескольких выделенных полос поглощения в атмосфере) распространяется вниз до земной поверхности, оказывая свое влияние на проходящие в ионосфере, мезосфере и тропосфере процессы. Отметим, что на тропосферных высотах микроволновое излучение может влиять на погодно-климатические процессы через трехступенчатый триггерный механизм солнечно-магнитосферных – погодно-климатических связей, который включает в себя [77–80]:

1) трансформацию в ионосфере потока энергичных электронов радиационного пояса Земли (как фактора влияния солнечной и геомагнитной активности) через возбуждение и высвечивание ридберговских состояний всех ионосферных компонентов в поток микроволновом диапазоне, которые легко доходят до Земной поверхности, и являются триггером для развития ряда тропосферных процессов;

2) рост концентрации водных кластеров на тропосферных высотах, образующихся из паров воды под воздействием микроволнового излучения;

3) образование облачности в присутствии кластеров, которая пропускает солнечное излучение в тропосферу и препятствует уходу теплового из-

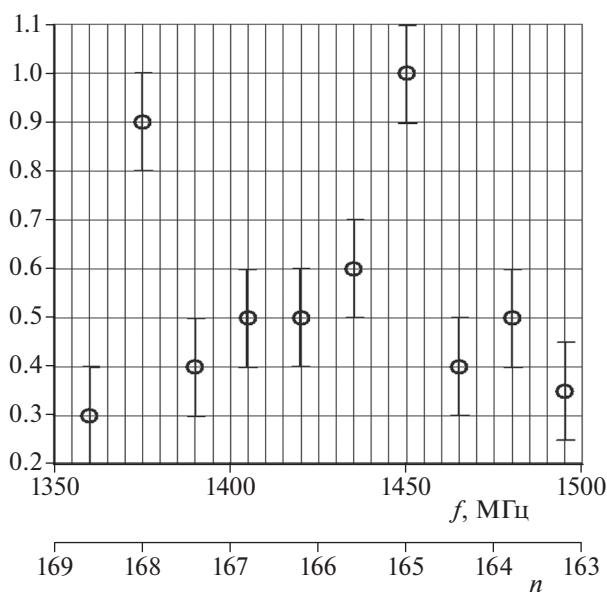


Рис. 5. Зависимость нормированной спектральной интенсивности микроволнового излучения в диапазоне 1350–1500 МГц.

лучения подстилающей земной поверхности в космос, оказывая тем самым влияние на тепловой баланс тропосферы.

Этот механизм эффективно работает как в условиях естественной солнечной активности и геомагнитной возмущенности околоземного космического пространства, где каждая его ступень была подтверждена экспериментально, так и при антропогенном характере возмущений, включая и модификацию ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона. Существование такого физического механизма воздействия факторов солнечной и геомагнитной активности на свойства тропосферы и приземного слоя атмосферы обобщается, например, в работах [81–85].

3.4. Влияние нагрева ионосферной плазмы мощными радиоволнами на содержание озона на мезосферных высотах

Мезосфера Земли, расположенная на высотах 50–90 км, до сих пор остается наименее исследованной частью средней атмосферы. Отличительные особенности этой области – большая плотность нейтральных частиц и наличие слабоионизированной плазмы, в которой присутствуют различного рода положительные и отрицательные ионы и ионы-связки, образующиеся в результате сложных ионизационных и рекомбинационных физико-химических процессов (см., например, работы [9, 35, 86] и цитируемую в них литературу). При существующей сложности этих процессов количество возможных методов ее исследования весьма ограничено. Поэтому поиск новых подходов к изучению ее свойств и характеристик остается и сегодня актуальной задачей.

В настоящем разделе работы рассматриваются результаты изучения влияния контролируемого нагрева ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазон на характеристики микроволнового излучения в линии озона на частоте 110836.04 МГц. В данном случае озон выступает в качестве индикатора, показывающего влияние КВ-нагрева на состояние атмосферы Земли на высотах 50–60 км. Эти эксперименты проводились на среднеширотном нагревом стенде СУРА в 2008–2016 гг. Уже в первых экспериментах было обнаружено сильное влияние нагрева на измеряемую интенсивность микроволнового излучения на частотах вблизи максимума спектральной линии озона, которое формируется на этих высотах [87–90].

Представленные ниже результаты измерений вариаций интенсивности излучения в линии озона из верхней атмосфере были получены методом наземной микроволновой радиометрии и основаны на регистрации интенсивности теплового излучения атмосферы в линии вращательного перехода озона с последующим анализом формы его

спектра. Согласно существующим на время проведения экспериментов представлениям, измерения были организованы таким образом, чтобы обеспечить наиболее сильное возмущение ионосферы на высотах ее D-области. Нагревный стенд излучал под углом 12° от зенита на юг мощную радиоволну, как правило, на минимально возможной для стенда частоте $f_0 = 4.3$ МГц; эффективная мощность излучения составляла $P_{ef} = 80$ МВт. Для нагрева ионосферы использовались радиоволны как X-, так и O-поляризации. Включение стенда осуществлялось в периодическом режиме [± 15 мин] или [± 30 мин]. В одном сеансе измерений излучалось от 3 до 6 таких импульсов ВН. Такой режим был выбран, исходя из возможностей микроволнового озонметра, когда за время 15 мин можно было получить с необходимым разрешением один спектр атмосферной линии озона.

В направлении пучка мощных радиоволн (иногда и в сторону от него) была ориентирована антенна мобильного микроволнового озонметра для приема теплового излучения средней атмосферы на частоте 110.83604 ГГц. Описание озонметра и его характеристик приведено в работах [87, 90]. Ширина диаграммы направленности его рупорной антенны по уровню -3 дБ составляет 5.4° . При этом диаметр области атмосферы, из которой регистрировалось микроволновое излучение, составляет ~ 6 км на высоте 60 км, что приблизительно в 3 раза меньше размеров возмущенной мощной радиоволной D-области (~ 16 км по уровню половинной мощности излучения пучка мощных радиоволн). В наблюдениях был использован метод абсолютной калибровки по двум эталонам излучения, один из которых находился при температуре окружающего воздуха, а другой – при температуре кипения жидкого азота.

Параметры прибора позволяют измерять спектр линии излучения с точностью $\sim 2\%$. По измеренному единичному спектру можно восстановить вертикальное распределение озона в интервале высот 20–60 км с точностью не хуже чем 5%.

Результаты выполненных измерений показали, что во время нагрева обнаруживается уменьшение интенсивности теплового излучения атмосферы в линии озона на частоте 110.83604 ГГц [69, 72]. На рис. 6 приведены результаты измерений интенсивности атмосферной линии озона, приведенных 14 марта 2009 г., которые продолжались с 10:00 до 24:00 мск. Во время этих измерений с 11:30 до 15:00 мск (в часы, близкие к полуденным) осуществлялась модификация ионосферы в режиме [± 30 мин]. Мощная волна X-поляризации излучалась на частоте 4300 кГц с эффективной мощностью $P_{ef} \approx 80$ МВт. Измерения интенсивности линии озона, усредненные за время нагрева ионосферы мощным КВ-радиоизлучением, показаны на рисунке черными прямоугольниками.

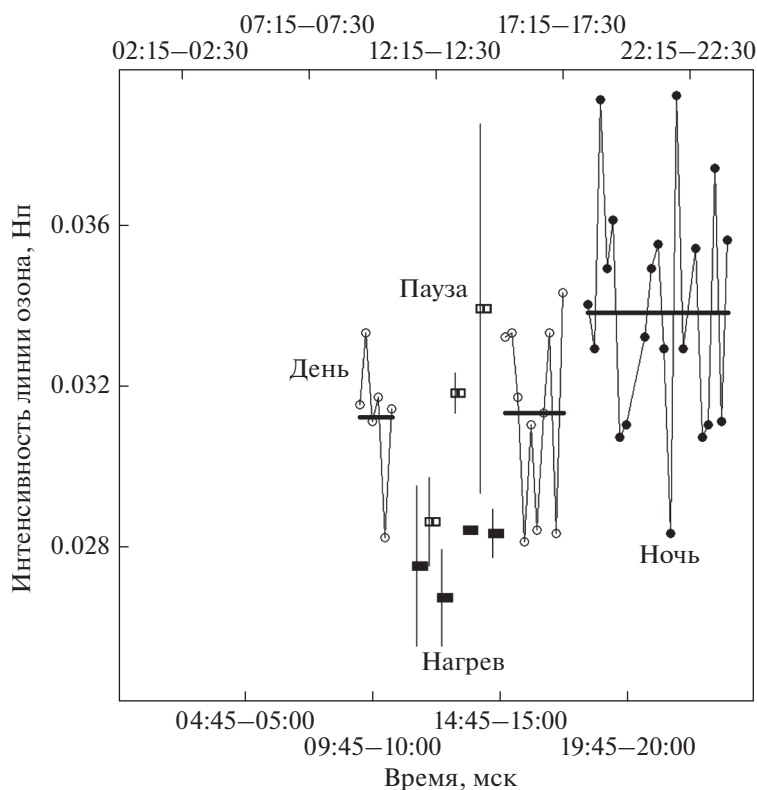


Рис. 6. Результаты измерений интенсивности теплового излучения атмосферы в линии озона, выполненные 14 марта 2009 г. Интенсивность выражена в неперах (Нп) по отношению к интенсивности солнечного излучения на высоте верхней границы нейтральной атмосферы.

ми, а за время паузы излучения ВН — белыми прямоугольниками. Величина уменьшения интенсивности излучения сильно изменяется от импульса к импульсу ВН. Из полученных в этих измерениях спектральных данных следует, что нагрев ионосферы приводит к заметному понижению интенсивности излучения в линии озона на малых отстройках ($\Delta f \leq 40$ МГц) относительно центральной частоты линии и тем больше, чем меньше величина отстройки (см. [90]). Отметим, что именно излучение мезосферного озона дает наибольший вклад в эту часть спектральной линии. Было получено, что после выключения ВН интенсивность излучения восстанавливается за время, меньшее 15 мин, и даже до немного больших величин, чем его значения в отсутствие нагрева. Среднее по всем сеансам измерений уменьшение интегральной интенсивности микроволнового излучения в линии озона составляло $\sim 10\%$ (при точности ее измерения 2%).

Дополнительно на рис. 6 сплошными горизонтальными линиями показаны средние значения интенсивности линии озона для дня и ночи в отсутствие нагрева ионосферы мощными радиоволнами. Видно, что средние ночные величины измеренного содержания озона на высоте ~ 60 км превышают его дневные значения, отражая обыч-

но наблюдаемые его суточные вариации. Средняя амплитуда суточного изменения рассчитанного содержания мезосферного озона в этом случае составила 42%, что близко к обычно наблюдаемому его значению и является подтверждением правильности проводимых озонметрических измерений.

В проведенных в марте 2011 г. измерениях было установлено, что в диапазоне мощностей ВН $P_{ef} = 40\text{--}80$ МВт величина уменьшения интенсивности излучения возрастает пропорционально P_{ef} . Также было показано, что указанный эффект наблюдается не только в модифицированной области мезосферы, но и на расстоянии ~ 110 км к югу от нее (для этого были проведены измерения с наклоном диаграммы направленности озонометра на 70° от вертикали на юг).

В сентябре 2016 г. на стенде СУРА были выполнены измерения интенсивности излучения атмосферы в линии озона, которые сопровождались диагностикой состояния нижней ионосферы в интервале высот 50–130 км с помощью метода резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы [88]. Уменьшение интенсивности во время нагрева составляло до 9%, что соответ-

ствовало уменьшению концентрации озона на высотах ~60 км в среднем на 19%. Диагностика нижней ионосферы методом ИПН показала, что в день измерений содержания озона, когда возмущение ионосферы проводилось в режиме [± 30 мин], на высотах ~55 км и выше наблюдались рост интенсивности неоднородностей электронной концентрации при воздействии мощной радиоволной КВ-диапазона на ионосферу и общее увеличение возмущенности нижней ионосферы. Также на этих высотах регистрировались значительные вариации скорости вертикального движения среды. Все это указывает на наблюдающееся сильное возмущение нижней ионосферы во время длительного, 30-минутного ее нагрева мощными радиоволнами.

При интерпретации наблюдаемого уменьшения интенсивности излучения в линии озона следует принимать во внимание, что крайне низкое содержание электронов в D-области по сравнению с концентрацией нейтральных компонент (степень ионизации здесь составляет $\sim 10^{-9}$) считается маловероятным прямым влиянием увеличения температуры электронов в поле мощной радиоволны на свойства нейтральной компоненты атмосферы. Кроме того, важным обстоятельством является то, что этот эффект обнаруживается и на 110 км южнее области модификации нижней ионосферы пучком мощных радиоволн (эксперименты с наклоном диаграммы направленности озонометра на 70° на юг). Из этого следует, что непосредственный нагрев D- и E-слоев ионосферы пучком мощных радиоволн не является его причиной. Поэтому возникает задача выяснения механизма воздействия модифицированной мощной радиоволной ионосферы на нейтральную компоненту атмосферы (в нашем случае – на мезосферный озон).

В качестве возможного объяснения изменения интенсивности микроволнового излучения в линии озона при начале излучения мощных радиоволн нагревным стендом СУРА в работе [89] был предложен механизм, основанный на изменении плотности и температуры атмосферы при распространении внутренних гравитационных волн (ВГВ), возбуждаемых (усиливаемых) при нагреве ионосферы мощной радиоволной КВ-диапазона. Факт возбуждения (усиления) ВГВ при работе стенда СУРА был установлен экспериментально [55, 57]. Независимо от способа возбуждения ВГВ при их распространении в атмосфере изменяются ее плотность ρ , давление p и температура T . В работе [90] дана оценка величины возмущения давления Δp атмосферы при эффективной мощности излучения стенда $P_{ef} = 80$ МВт. На высоте 110 км оно может достигать регистрируемых значений $\Delta p \approx 10^{-2} p_0$. Оценка относительного изменения интенсивности излучения в этом случае в макси-

муме линии озона может составлять от одного до нескольких процентов, что соответствует результатам измерений. Однако предложенную интерпретацию наблюдаемого уменьшения интенсивности излучения в линии озона при облучении ионосферы мощным КВ-радиоизлучением сегодня еще нельзя считать полностью разработанной и удовлетворяющей всем особенностям наблюдаемого явления.

Выполненные в последние годы экспериментальные исследования позволили предложить иную, связанную с нагревом ионосферы схему подавления интенсивности генерации микроволнового излучения в линии озона на мезосферных высотах. Следуя результатам работ [91–95], энергичные электроны с $E \approx 100–200$ кэВ при их высыпании на ионосферные высоты проникают на высоты мезосферы $h \approx 60–80$ км, где они через соударения с нейтральными атомами и молекулами приводят к образованию молекул окиси азота NO и гидроксила HO. Эти молекулы, вступая в реакцию с молекулами озона, разрушают их, уменьшая тем самым его содержание на мезосферных высотах. Уменьшение содержания озона может при этом достигать десятков процентов в широкой области пространства, подверженной влиянию высыпающихся энергичных электронов. Такой процесс хорошо известен в полярной ионосфере как азотный и водородный циклы физико-химических реакций, влияющих на содержание озона на мезосферных высотах (см., например, [91, 95]). В нашем случае энергичные электроны с энергиями E до 100–150 кэВ появляются на мезосферных высотах за счет их искусственной инъекции из радиационного пояса Земли при модификации F2-слоя ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона. Поскольку измеренное время вариаций содержания озона при нагреве ионосферной плазмы меньше 15 мин, главное влияние должны оказывать молекулы HO, которые доминируют на высотах 40–60 км и имеют на высотах 50–60 км короткое время жизни: секунды–минуты, в сравнении с намного более долгоживущими молекулами NO [93, 94].

Можно также рассматривать и другие схемы, объясняющие уменьшение интенсивности излучения вращательной спектральной линии озона. Как указывалось выше, при воздействии на ионосферу мощным КВ-радиоизлучением реализуется два механизма образования высокоэнергичных электронов: 1) ускорение электронов в областях с интенсивной плазменной турбулентностью с образованием сверхтепловых электронов с энергиями до 5–30 эВ; 2) механизм высыпания высокоэнергичных электронов из радиационных поясов с энергиями до 100 кэВ и выше. При соударении этих энергичных электронов с нейтральными атомами и молекулами, в том числе и с озоном, происходит их возбуждение вплоть до иониза-

ции, а в случае соударений с молекулами возможна еще и их диссоциация с энергией диссоциации около 1 эВ, в результате которой молекула озона O_3 распадается на O_2 и O . Естественно, что после диссоциации молекулы озона ее вклад в спектр излучения исчезает. Интенсивность коллективного излучения мезосферного озона во всех спектральных линиях при этом уменьшится.

Для разработки детальной модели влияния модификации ионосферной плазмы мощными радиоволнами на содержание озона на мезосферных высотах требуется дальнейшее проведение экспериментальных и теоретических исследований. В экспериментальном плане для получения требуемой информации в первую очередь, необходимо выполнить измерения при различных поляризациях ВЧ, поскольку эффект уменьшения содержания озона на мезосферных высотах наблюдается при модификации ионосферы мощными радиоволнами обеих поляризаций, в то время как высыпание энергичных электронов и ускорение электронов до сверхтепловых энергий сегодня надежно установлены и изучены только при нагреве ионосферы волнами O -поляризации. Необходимо также определить характеристики эффекта уменьшения содержания озона в разное время суток, при различном уровне геомагнитной активности и при разных режимах импульсного излучения мощной радиоволны. Важно также измерить, по возможности как можно точнее, характерные времена уменьшения и восстановления интенсивности излучения в линии озона после включения и выключения ВЧ. Все это позволит более подробно изучить свойства наблюдаемого явления уменьшения содержания озона на высотах ~60 км во время модификации ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона, построить более полную его эмпирическую модель, обосновать теоретические представления наблюдаемого явления и в конечном итоге развить новые методы диагностики мезосферы Земли. Здесь, например, стоит задача исследования возможного влияния на рекомбинационные процессы в D-области ионосферы малых составляющих ионосферы, в частности озона. Необходимо более детально изучить влияние изменения температуры электронов и нейтральной компоненты на фотохимические и рекомбинационные процессы, а также на характеристики турбулентной диффузии, определяющие свойства нижней ионосферы, включая излучательную способность различных атомов и молекул. Нагревные эксперименты благодаря своей хорошей повторяемости и дозируемости вносимых в атмосферу определенных возмущений могут сыграть здесь определяющую роль.

В заключение отметим, что при анализе данных по искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу необходимо принимать во внимание

результаты исследований свойств их естественной инжекции (см., например, [96–99]), поскольку в них порой содержится очень важная дополнительная информация для понимания наблюдающихся в нагревных экспериментах явлений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе результаты показывают, что искусственная инжекция энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты, вызванная модификацией F2-слоя ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона, имеет сильное и легкообнаружимое свое влияние на генерацию и характеристики различных компонент ИИТ и может рассматриваться как вторичный источник модификации атмосферы Земли для генерации искусственных возмущений ее ионизированной и нейтральной компонент на больших расстояниях от нагревного стенда. Это обуславливает интерес к такому роду исследованиям и необходимость их дальнейшего продолжения и развития, поскольку здесь открываются широкие возможности для изучения влияния энергичных электронов на характеристики приземного слоя атмосферы Земли, изучение характеристик которого еще далеко от завершения. Как было продемонстрировано в работе, агентами такого влияния могут служить:

1) ионизация атомов и молекул атмосферы на высотах 60–120 км, которая приводит к увеличению поглощения радиоволн НЧ–СВ–КВ-диапазонов, проходящих через эту область, и влияет на характеристики физико-химических процессов на мезосферных высотах;

2) изменение содержания озона в мезосфере, что влияет на высотные характеристики распределения ультрафиолетового излучения в атмосфере и приводит к изменению ее теплового баланса;

3) генерация микроволнового излучения, которое оказывает влияние на механизмы конденсации водяного пара в приземной атмосфере и образование водных кластеров (конденсационно-кластерный механизм);

4) возмущение глобальной электрической цепи за счет генерации электрических токов на ионосферных высотах, что может иметь различные проявления.

В дополнение к вышесказанному в работах [29, 81] рассматривается возможность использования искусственного высыпания энергичных электронов, стимулированного работой нагревного стенда, для очистки в случае необходимости от них радиационного пояса Земли.

Много других примеров возможного влияния стимулированных нагревом ионосферы высыпаний энергичных электронов на различные обла-

сти атмосферы Земли, включая воздействие на химико-физические процессы и на климат, можно найти в публикациях [8, 16, 35, 55, 83–85]. Все они демонстрируют существование воздействия солнечной и геомагнитной активности на погодно-климатические характеристики. Многие аспекты этой проблемы еще только предстоит исследовать. Эксперименты, связанные с модификацией ионосферы Земли мощными радиоволнами КВ-диапазона, могут внести значительный вклад в эти исследования.

Авторы благодарят сотрудников стенда СУРА (НИРФИ, ННГУ) за помощь в организации и проведении экспериментов и КазФУ – за возможность использования данных казанского цифрового ионозонда.

Рассматриваемые в работе исследования искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты и их влияние на атмосферные процессы были выполнены В.Л. Фроловым на стенде СУРА при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00166. Исследования А.В. Троицкого выполнялись в рамках базовой части госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (проект 0729–2020–0057). Исследования Ю.Ю. Куликова выполнялись при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-45-520009. Работа в части использования казанского ионозонда “Циклон” выполнялась А.Д. Акчуриным (КазФУ, Казань) и В.Л. Фроловым за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (“ПРИОРИТЕТ-2030”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gurevich A.V.* Nonlinear phenomena in the ionosphere. N.Y.: Springer, 1978.
2. *Duncan L.M., Gordon W.E.* // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44. № 12. P. 1009.
3. *Stubbe P., Kopka H., Lauche H. et al.* // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44. № 12. P. 1025.
4. *Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др.* // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 330.
5. *Фролов В.Л.* Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2017.
6. *Streltsov A.V., Berthelier J.J., Chernyshov A.A. et al.* // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. 118.
7. *Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y., Mogilevsky M.M. et al.* // Adv. Space Res. 2003. V. 32. № 3. P. 355.
8. *Parrot M., Zaslavski Y.* // Surv. Geophys. 1996. V. 17. № 1. P. 67.
9. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
10. *Дёмин М.Г.* Ионосфера Земли. Плазменная гелиогеофизика. Т. 2. М.: Физматлит, 2008.
11. *Ратклифф Дж.* Введение в физику ионосферы и магнитосферы. М.: Мир, 1975.
12. *Blaunstein N., Plohotniuc E.* Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar. Boca Raton: CRC Press, 2008.
13. *Гуревич А.В.* Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145.
14. *Ерухимов Л.М., Генкин Л.Г.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 11–12. С. 863.
15. *Stubbe P., Hagfors T.* // Surv. Geophys. 1997. V. 18. № 1. P. 57.
16. *Leyser T.B., Wong A.Y.* // Rev. Geophys. 2009. V. 47. № 1. RG1001.
17. *Гуревич А.В., Шлюгер И.С.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 9. С. 1237.
18. *Ютло У., Коэн Р.* // УФН. 1973. Т. 109. № 2. С. 371.
19. Special issue // Radio Sci. 1974. V. 9. № 11.
20. *Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 2. С. 208.
21. *Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 3. С. 198.
22. *Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E. et al.* // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № A10. A10307.
23. *Lukianova R.Y., Frolov V.L., Ryabov A.O.* // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. № 22. P. 12731.
24. *Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Рябов А.О. и др.* // Космич. исслед. 2021. Т. 59. № 4. С. 275.
25. *Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н. и др.* // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 7. С. 545.
26. *Gamble R.J., Rodger C.J., Clilverd M.A. et al.* // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № A10. A10211.
27. *Helliwell R.A.* // Space Sci. Rev. 1974. V. 15. № 6. P. 781.
28. *Kulkarni P., Inan U.S., Bell T.F. et al.* // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № A7. A07214.
29. *Inan U.S., Golkovski M., Carpenter D.L. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № 24. L24805.
30. *Platino M., Inan U.S., Bell T.F. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № 16. L16101.
31. *Piddyachiy D., Bell T.F., Berthelier J.J. et al.* // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. № A6. A06304.
32. *Благовещенская Н.Ф.* Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. СПб: Гидрометеоздат, 2002.
33. *Blagoveshchenskaya N.F.* // Radio Sci. Bull. 2020. V. 2020. № 373. P. 40.
34. *Sauvaud J.A., Moreau T., Maggiolo R. et al.* // Planet. Space. Sci. 2006. V. 54. № 5. P. 502.
35. *Криволицкий А.А., Репнев А.И.* Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009.
36. *Lam M.M., Horne R.B., Meredith N.P. et al.* // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. № A4. A00F08.

37. The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); www.noaa.gov
38. Ластовичка Я. // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20. № 5. С. 880.
39. Фролов В.Л., Акчуринов А.Д., Болотин И.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 9. С. 641.
40. Рябов А.О., Фролов В.Л., Акчуринов А.Д. // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 4. С. 285.
41. Фролов В.Л., Рябов А.О., Акчуринов А.Д. // Космич. исслед. 2022. Т. 60. № 4. С. 285.
42. Horne R.B., Lam M.M., Green J.C. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. № 19. L19104.
43. Скребкова Л.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1975. Т. 15. № 4. С. 664.
44. Leyser T.B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98. № 3–4. P. 223.
45. Borisov N.D. // Phys. Lett. A. 1995. V. 206. № 3–4. P. 240.
46. Camporeale E., Delzanno G.L., Colestock P. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № A10. A10315.
47. Eliasson B., Papadopoulos K. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № A9. A093315.
48. James H.G., Inan U.S., Rietveld M.T. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. № A8. P. 187.
49. Беляев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 2. С. 248.
50. Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. № 1–4. P. 349.
51. Беспалов В.А., Трахтенгерц В.Ю. // Вопр. теории плазмы. 1980. № 10. С. 88.
52. Мишин Е.В., Ружин Ю.А., Телегин В.А. Взаимодействие электронных потоков с плазмой. Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
53. Raporort V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V. et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. № A10. A10322.
54. Pasmanirk D.L., Demekhov A.G. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. № 8. P.8124.
55. Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2014.
56. Potemra T.A., Zmuda A.J. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 34. P. 7161.
57. Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Фролов В.Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 6. С. 440.
58. Utlaut W.F., Violette E.J. // Radio Sci. 1974. V. 9. № 11. P. 895.
59. Milikh G.M., Demekhov A., Vartanyan A. et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. № 10. L10102.
60. Демехов А.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 2.
61. Васьков В.В., Беляев П.П., Будько Н.И. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33. № 6. С. 91.
62. Костин В.М., Романовский Ю.А., Чмырев В.М. и др. // Космич. исслед. 1993. Т. 31. № 1. С. 84.
63. Vaskov V.V., Budko N.I., Kapustina O.V. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60. № 12. P. 1261.
64. Фролов В.Л., Рябов А.О., Болотин И.А. // Тез. докл. XVII ежегодн. конф. “Физика плазмы в солнечной системе”. М.: ИКИ, 2022. С. 178.
65. Basu Sun., MacKenzie E., Basu Sant. et al. // Radio Sci. 1983. V. 18. № 6. P. 1151.
66. Wright J.W. // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 31. P. 4383.
67. Бенедиктов Е.А., Коробков Ю.С., Митяков Н.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3. № 6. С. 957.
68. Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F. et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № A4. P. 1141.
69. Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стародубцев А.М. // ДАН СССР. 1973. Т. 212. № 3. С. 719.
70. Троицкий В.С., Стародубцев А.М., Бондарь Л.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 3. С. 323.
71. Бондарь Л.Н., Стрежнева К.М., Троицкий В.С. // Астрон. вестн. 1975. Т. 9. № 4. С. 210.
72. Мусатенко С.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20. № 5. С. 884.
73. Авакян С.В. // Тез. докл. Междунар. конф. по физике солнечно-земных связей. Алматы: Наука, 1994. С. 3.
74. Авакян С.В., Серова А.Е., Воронин Н.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. № 3. С. 99.
75. Сороченко Р.Л. // Физика космоса. М.: Физматлит, 2003.
76. Grach S.M., Fridman V.M., Lifshits L.M. et al. // Ann. Geophys. 2002. V. 20. № 10. P. 1687.
77. Авакян С.В., Воронин Н.А. // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 28.
78. Авакян С.В., Воронин Н.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 4. С. 435.
79. Авакян С.В., Воронин Н.А. // Оптич. журн. 2008. Т. 75. № 10. С. 95.
80. Roberts W.O. // Proc. Sympos./Workshop on Solar-Terrestrial Influences on Weather and Climate / Eds. McCormac B.M., Seliga T.A. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1979. P. 29.
81. Marshall R.F., Cully C.M. // The Dynamic Loss of Earth’s Radiation Belts. Ch. 7 / Eds. Jaynes A.N., Usanova M.E. Amsterdam: Elsevier, 2020. P. 199.
82. Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A. et al. // Space Sci. Rev. 2017. № 212. P. 985.
83. Rozanov E., Calisto M., Egorova T. et al. // Surv. Geophys. 2012. V. 33. № 3–4. P. 483.
84. Semeniuk K., Fomichev V.I., McConnel J.C. et al. // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. № 10. P. 5045.
85. Arsenovic P., Rozanov E., Stenke A. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 149. P. 180.
86. Данилов А.Д. Популярная аэрономия. Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
87. Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 11. С. 26.
88. Андрианов А.Ф., Бахметьева Н.В., Вяхирев В.Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 5. С. 366.
89. Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 1. С. 102.

90. Куликов Ю.Ю., Григорьев Г.И., Красильников А.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 4. С. 57.
91. Sinnhuber M., Funke B. // The Dynamic Loss of Earth's Radiation Belts. Ch. 9 / Eds. Jaynes A.N., Usanova M.E. Amsterdam: Elsevier, 2020. P. 279.
92. Andersson M.E., Verronen P.T., Rodger C.J. et al. // Nat. Commun. 2014. V. 5. 5197.
93. Pickett H.M., Read W.G., Lee K.K. et al. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № 19. L19808.
94. Pickett H.M., Drouin B.J., Canty T. et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № D16. D16S30.
95. Verronen P.T., Rodger C.J., Clilverd M.A. et al. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. № D7. D07307.
96. Голубков Г.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 72.
97. Голубков М.Г., Суворова А.В., Дмитриев А.В. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 10. С. 69.
98. Голубков М.Г., Дмитриев А.В., Суворова А.В. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 5. С. 84.
99. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Ghosh S. et al. // Atmosphere. 2022. V. 13. № 2. 322.