

УДК 533.95+550.348

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В СРЕДНЕШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ И ИХ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

© 2022 г. В. Л. Фролов^{1, 2, *}, А. О. Рябов¹, А. Д. Акчурина²

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

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*frolov@nirfi.unn.ru

Поступила в редакцию 02.07.2021 г.

После доработки 16.11.2021 г.

Принята к публикации 24.11.2021 г.

Приводятся результаты исследований характеристик инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в среднеширотную ионосферу при модификации F_2 -области ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми нагревным стендом СУРА. Обсуждаемые в работе измерения были выполнены в 2019 г. с помощью низкоорбитальных ($h \approx 850$ км) спутников серии *NOAA* в диапазоне энергий электронов 40–612 кэВ. Измерения проводились в различных геофизических условиях как над стендом СУРА, так и в магнитно сопряженной к стенду ионосфере. Выполненные исследования в сравнении с ранее полученными данными с помощью спутника *DEMETER* позволили установить, что в магнитной силовой трубке с $L \approx 2.7$ наиболее эффективная стимуляция инжекции энергичных электронов имеет место в поздние вечерние и ночные часы, а наиболее низкую эффективность — в дневных условиях. Интенсивность инжекции сильно зависит от степени заполнения радиационного пояса энергичными электронами. Дана оценка энергии, вносимой в ионосферу инжектируемыми энергичными электронами. Приведены примеры возможного их влияния на генерацию искусственной ионосферной турбулентности и на атмосферные процессы.

DOI: 10.31857/S0023420622040045

ВВЕДЕНИЕ

Модификация F_2 -области ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (O) поляризации приводит к развитию в ней разного рода нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это вызывает возбуждение вблизи высоты отражения мощной радиоволны высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности и стимулирует развитие различных плазменных возмущений, или другими словами, генерацию искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) [1–4]. Выполненные исследования позволили установить, что нагрев плазмы верхней ионосферы оказывает свое влияние на ионосферно-магнитосферные связи, вызывая, в частности, искусственную инжекцию в ионосферу энергичных электронов из радиационного пояса Земли (в случае стенда СУРА — из оболочек с $L \approx 2.7$, L — параметр Мак-Илвайна). Характеристики такой инжекции в области расположения стенда СУРА и в магнитно сопряженной к нему ионосфере подробно анализировались для электронов с энергиями $E = 70$ кэВ–2.5 МэВ в рабо-

тах [5, 6] на основе данных, полученных в 2005–2010 гг. с помощью французского микроспутника *DEMETER*, измерения на котором проводились в поздние вечерние и ночные часы. В них большое внимание было уделено определению отличительных характеристик естественной и искусственной инжекции в ионосферу энергичных электронов, энергетические и пространственные характеристики такой инжекции, нахождению оптимальных ионосферных условий и параметров волны накачки (ВН), при которых инжекция имеет наибольшую интенсивность. В [5, 6] было показано, что: а) максимальная плотность потока инжектируемых при модификации F_2 -слоя электронов наблюдается для их энергий $E \approx 100$ кэВ; б) интенсивность инжекции зависит от степени заполнения радиационного пояса Земли энергичными электронами; в) в условиях “холодного старта” (после длительной, более 10–15 мин, паузы излучения ВН) характерное время роста интенсивности потока инжектируемых электронов после начала модификации ионосферы равно 3–7 мин, время перехода к естественному их фоно-

вому уровню после выключения ВН составляет от нескольких минут до 10–15 мин, завися от режима излучения мощной радиоволны и ионосферных условий проведения измерений; г) в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы наблюдается более интенсивная инжекция энергичных электронов по сравнению с северным, где расположен стенд СУРА. Последнее определяется влиянием Южно-Атлантической магнитной аномалии, которая характеризуется более низкой напряженностью геомагнитного поля и, следовательно, более слабым удержанием энергичных электронов в магнитной силовой трубке.

Значение рассматриваемых в настоящей работе исследований связано с возможностью изучения с их помощью физики радиационных поясов Земли, определения особенностей взаимодействия между радиационными поясами и ионосферой, изучения характера изменения во время геомагнитных возмущений содержания энергичных электронов в радиационных поясах Земли и др. Эти исследования также важны для решения практических задач, связанных с модификацией ионосферно-магнитосферных связей и нахождения механизмов влияния энергичных электронов на различные процессы, протекающие в ионосфере, мезосфере и в приземной атмосфере. Кроме того, такую искусственно вызванную инжекцию в [7] было предложено использовать для “очистки” в случае необходимости радиационных поясов Земли от высокоэнергичных электронов.

Представленные в [5, 6] измерения на среднеширотном нагревном стенде СУРА проводились в поздние вечерние и ночные часы. При этом оставались совершенно неясными характеристики инжекции высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу в другое время суток, что необходимо знать для правильной интерпретации целого ряда наблюдаемых явлений. Целью настоящей работы является анализ результатов исследований такой инжекции при воздействии на среднеширотный F_2 -слой ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации в дневные и вечерние часы в условиях, когда ионосфера находится под воздействием солнечной радиации. В работе дополнительно представлены результаты измерений характеристик индуцируемых плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы, которые могут генерироваться при наличии потока высокоэнергичных электронов. В заключительном разделе работы подведены итоги выполненных исследований и следующие из них выводы, а также кратко обсуждаются некоторые ранее полученные результаты экспериментов, которые демонстрируют влияние энергичных электронов как на генерацию и свойства ИИТ, так и на атмосферные процессы.

Представленные в настоящей работе результаты исследований во многом базируются на результатах, полученных и детально проанализированных в [5, 6]. Для полноты картины выводы из этих исследований кратко приводятся в статье без их подробного рассмотрения. Важным преимуществом обсуждаемых в работе экспериментов является то, что они выполнялись на среднеширотном нагревном стенде СУРА в условиях существенно более низкого уровня геомагнитных возмущений по сравнению с более северными широтами, в которых расположены два других работающих сегодня нагревных стенда: HAARP (Аляска, США) и EISCAT-heater (Сев. Норвегия) [4]. В тексте статьи, по мере необходимости, приводятся соответствующие ссылки на результаты зарубежных исследований и отмечаются особенности их проведения. Как правило, эксперименты на зарубежных нагревных стендах выполнялись в геофизических условиях во многом отличных от исследований на стенде СУРА с использованием своих специфических методик. В первую очередь здесь следует отметить, что зарубежные исследования по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли проводились с использованием мощной радиоволны с амплитудной модуляцией, в то время как эксперименты на стенде СУРА проводились исключительно с излучением мощной радиоволны в режиме “несущая”.

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

В измерениях на стенде СУРА для создания искусственных плазменных возмущений в среднеширотной ионосфере Земли использовались мощные КВ радиоволны O -поляризации, которые излучались в режиме “несущая” и отражались вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы. Все эксперименты проводились при наклоне диаграммы направленности излучающей антенны стенда на 12° на юг от вертикали с целью увеличения эффективности генерации ИИТ за счет эффекта “магнитного зенита”, когда на высоте верхнегибридного резонанса мощная радиоволна O -поляризации распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля [3, 4, 8]. Стенд включался приблизительно за 15 мин до пролета спутника через возмущенную магнитную силовую трубку, опирающуюся на область интенсивного развития ИИТ вблизи высоты отражения ВН. Такая длительность нагрева является во многих случаях достаточной для развития плазменных возмущений до практически стационарного уровня не только в области отражения ВН, но и на высотах внешней ионосферы. Более длительные времена излучения ВН (до 30–45 мин) использовались при проведении измерений в магнитно сопряженной стенду СУРА ионосфере, чтобы обеспечить более полное развитие искусственных

плазменных возмущений во всей магнитной силовой трубке. Эксперименты проводились в июне, августе и октябре 2019 г. в дневные и вечерние часы, когда спутники пролетали достаточно близко к центру возмущенной магнитной силовой трубки как над стендом СУРА (в северном полушарии), так и в магнитно сопряженной к нему области ионосферы (в южном полушарии). Важно отметить, что обсуждаемые в работе измерения проводились в освещенной Солнцем ионосфере, свойства которой сильно отличаются от свойств ночной ионосферы. Регистрация энергичных электронов осуществлялась с помощью бортовой аппаратуры спутников *NOAA-18* и *19* в диапазоне энергии электронов $E = 40\text{--}612$ кэВ. Проведенные измерения вместе с измерениями в поздние вечерние и ночные часы, полученные ранее с помощью спутника *DEMETER* [5, 6], позволяют сделать определенные выводы о суточных вариациях свойств искусственной инжекции энергичных электронов в ионосферу.

По разным причинам (см. ниже) из более 20 выполненных в 2019 г. сеансов только в 8 из них заведомо наблюдалась вызванная нагревом ионосферы мощными радиоволнами инжекция энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу, из которых 6 сеансов было проведено, когда спутники пролетали над стендом СУРА, и два сеанса – в магнитно сопряженной к стенду области ионосферы. Условия проведения этих сеансов и полученные в них результаты представлены в табл. 1. За исключением двух случаев (сеансы № 4 и 6), измерения выполнялись в спокойных или даже в очень спокойных геомагнитных условиях. Отметим, что на результаты измерений сильное влияние оказывают характеристики излучения мощной радиоволны (ее частота, эффективная мощность и режим излучения), ионосферные условия проведения измерений (величина поглощения мощных радиоволн в нижних слоях ионосферы, критическая частота F_2 -слоя (f_{0F_2}), высота отражения ВН, наличие спорадического слоя E_s), уровень текущей геомагнитной активности и время, прошедшее после последней суббури (через насыщенность радиационного пояса Земли энергичными электронами и состояние ионосферной плазмы), минимальное расстояние от орбиты спутника до центра возмущенной магнитной силовой трубки и др. Совокупное влияние этих причин обуславливает большой разброс полученных результатов. Это потребовало выполнения подробного анализа условий проведения каждого сеанса измерений.

Стенд СУРА (Россия, НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского) расположен в ~ 100 км к востоку от г. Н. Новгорода; его координаты: 56.15° с.ш., 46.1° в.д., параметр Мак-Илвина $L \approx 2.7$. Максимальная эффективная мощность излучения стен-

да в режиме когерентного излучения всех трех его модулей составляет ~ 80 МВт на частоте $f_{\text{ВН}} \approx 4300$ кГц – минимально возможной частоте излучения стенда СУРА, которая всегда использовалась в представленных здесь измерениях из-за низких критических частот F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} во время их проведения. Подробное описание характеристик стенда и развернутой вокруг него диагностической аппаратуры приведено в [9]. Для контроля за ионосферными условиями использовался расположенный на стенде канадский ионозонд *CADI* и размещенные в сети Internet данные о геомагнитной обстановке.

По сравнению с ночными часами измерений, результаты которых приведены в [5, 6], выполнение экспериментов в дневные и вечерние часы сопряжено с дополнительным линейным поглощением мощных радиоволн в нижних (D и E) слоях ионосферы. В спокойных геомагнитных условиях оно наиболее сильно в полуденные часы, что приводит к сильному уменьшению транспортируемой в F_2 -слой энергии мощной радиоволны и, следовательно, к уменьшению эффективности генерации ИИТ [1–3]. В наших измерениях величина линейного поглощения радиоволн не определялась, и в табл. 1 эффективная мощность излучения ВН $P_{\text{эф}}$ приводится без его учета ($P_{\text{эф}} = P_0 G$, где P_0 – ВЧ мощность, генерируемая передатчиками стенда, G – коэффициент усиления излучающей антенны стенда). Следуя обычно используемым оценкам, в спокойных геомагнитных условиях величина поглощения радиоволн в нижней ионосфере на частотах 4–5 МГц составляет примерно 5–10 дБ (более высокое поглощение имеет место в полуденные часы) [10]. Это соответствует уменьшению приведенной мощности ВН ($P_{\text{эф}}^*$) до 10–30 МВт по сравнению с $P_{\text{эф}} \approx 50\text{--}100$ МВт для ночных измерений в отсутствии линейного поглощения. В возмущенных условиях линейное поглощение радиоволн может значительно возрастать, приводя к понижению $P_{\text{эф}}^*$ до значения в несколько мегаватт. 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, 11]. Это может еще больше уменьшить поток энергии ВН вблизи высоты ее отражения и интенсивность генерируемой ИИТ. Кроме того, наличие спорадического слоя E , E_s , может приводить к частичной экранировке верхней ионосферы и уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу энергии ВН. Для плотных слоев E_s возможна полная экранировка верхней ионосферы, когда модификация F_2 -слоя становится невозможной.

Таблица 1.

№	Дата. Время T*(УТ), время нагрева Частота ВН Мощность ВН	f_{0F2} $h_{отр}$ ΣK_p и AE Дата последнего сильного возмущения, значение K_p для него Генерация F_{spread} при нагреве Присутствие E_s	Значение максимального потока высыпавшихся электронов $F(1)$ с энергиями $E = 40-130$ кэВ и интервал широт их высыпаний с указанием широты Φ_{max} , на которой регистрировался максимальный поток Величина максимального потока $F(2)$ для электронов с энергиями 130–287 кэВ
Высыпания над стандом СУРА			
1	3.VI.2019 T* = 12:57:20 T _н = 12:16–12:59 4300 кГц 25 МВт	4.4 МГц 210 км $\Sigma K_p = 6$; $AE \leq 50$ нТ Возмущения 27.V с K_p до 3 Воздействия на F-слой нет E_s до 3.5–4.0 МГц; на нем разви- вается spread	$F(1) \approx 3 \cdot 10^3$ $\Phi = 53^\circ-62^\circ$ с.ш.; $\Phi_{max} = 56^\circ$ с.ш. $F(2) \approx 2 \cdot 10^2$
2	27.VIII.2019 T* = 13:12 T _н = 12:50–13:15 4300 кГц 50 МВт	4.5 МГц 205 км $\Sigma K_p = 19^-$; $AE = 300$ нТ Возмущения 27.VIII с K_p до 3 Небольшой F_{spread}	$F(1) \approx 2 \cdot 10^4$ $\Phi = 50^\circ-58^\circ$ с.ш.; $\Phi_{max} = 53^\circ$ с.ш. $F(2) \approx 7 \cdot 10^3$
3	29.VIII.2019 T* = 06:41 T _н = 06:20–06:40 4300 кГц 50 МВт	5.1 МГц 200 км $\Sigma K_p = 5^+$; $AE \leq 50$ нТ Возмущения 27.VIII с K_p до 3 Средний F_{spread} E_s до 4.0 МГц; на нем развива- ется spread	$F(1) \approx 5 \cdot 10^3$ $\Phi = 52^\circ-60^\circ$ с.ш.; $\Phi_{max} = 54^\circ$ с.ш. $F(2) \approx 10^3$
4	9.X.2019 T* = 13:14 T _н = 13:01–13:15 4300 кГц 45 МВт	4.5 МГц 205 км $\Sigma K_p = 15^-$; $AE = 500$ нТ Возмущения 27.IX с K_p до 4 Очень сильный F_{spread}	$F(1) \approx 10^4$ $\Phi = 52^\circ-59^\circ$ с.ш.; $\Phi_{max} = 55^\circ$ с.ш. $F(2) \approx 2 \cdot 10^3$
5	17.X.2019 T* 13:21 T _н = 13:05–13:22 4300 кГц 50 МВт	4.5 МГц 190 км $\Sigma K_p = 10$; $AE = 200$ нТ Возмущения 10.X с K_p до 4 Средний F_{spread}	$F(1) \approx 5 \cdot 10^3$ $\Phi = 55^\circ-59^\circ$ с.ш.; $\Phi_{max} = 57^\circ$ с.ш. $F(2) \approx 3 \cdot 10^2$
6	26.X.2019 T* 13:16:30 T _н = 13:01–13:17 4300 кГц 50 МВт	4.0 МГц – $\Sigma K_p = 30^-$; $AE = 900$ нТ Возмущения 24.X с K_p до 5 Влияния на ионограммы нет	$F(1) \approx 3 \cdot 10^4$. $\Phi = 49^\circ-57^\circ$ с.ш.; $\Phi_{max} = 54^\circ$ с.ш. $F(2) \approx 4 \cdot 10^3$
Высыпания в магнитно сопряженную ионосферу			
7	7.VI.2019 T* = 13:25 T _н = 12:46–13:26 4300 кГц 20 МВт	4.6 МГц 190 км $\Sigma K_p = 11$; $AE \leq 50$ нТ Возмущения 29.V с K_p до 3 ⁺ Сильный F_{spread}	$F(1) \approx 4 \cdot 10^4$ $\Phi = -(33^\circ-51^\circ)$ ю.ш.; $\Phi_{max} = -41^\circ$ ю.ш. $F(2) \approx 9 \cdot 10^3$
8	30.X.2019 T* 13:44 T _н = 13:31–13:45 4300 кГц 55 МВт	4.2 → 4.0 МГц 230 км $\Sigma K_p = 14^-$; $AE \leq 50$ нТ Возмущения 24.X с K_p до 3 Слабый F_{spread}	$F(1) \approx 2 \cdot 10^3$ $\Phi = -(30^\circ-33^\circ)$ ю.ш.; $\Phi_{max} = -31^\circ$ ю.ш. $F(2) \approx 10^2$

Принимая во внимание все вышесказанное, при описании конкретного эксперимента в тексте статьи дана оценка приведенной эффективной мощности излучения ВН $P_{эф}^*$, учитывающая разные причины возможного ее ослабления на пути до высоты отражения мощной радиоволны.

Для определения характеристик энергичных электронов на высотах внешней ионосферы использовались метеоспутники США *NOAA-18* и *19*, летающие на высотах 850–860 км на солнцесинхронных орбитах с их наклоном $\sim 99^\circ$. Подробное описание бортовой аппаратуры спутников серии *NOAA* можно найти по ссылке [12]. Над стендом СУРА спутники пролетали через возмущенную магнитную силовую трубку с координатами ее центра на высоте их орбиты $\varphi_{тр} = 54.05^\circ$ с.ш., $\lambda_{тр} = 45.87^\circ$ в.д. около 07:00 UT ($T_{мск} = T_{UT} + 3^h \approx 10:00$ Мск) и 13:00 UT (около 16:00 Мск), т.е. в близко к полуденным, в ранние вечерние или вечерние часы по местному времени в зависимости от сезона проведения измерений. В магнитно сопряженной к стенду ионосфере спутники пролетали через возмущенную магнитную силовую трубку с координатами ее центра $\varphi_{тр_сопр} \approx 41.1^\circ$ ю.ш., $\lambda_{тр_сопр} \approx 61.2^\circ$ в.д. около 13:30 UT (около 16:30 Мск), что соответствует дневным условиям нагрева ионосферы мощными радиоволнами для сеанса № 7 и вечерним — для сеанса № 8. Заметим, что $T_{мск}$ для стенда СУРА практически совпадает с астрономическим временем для его местоположения.

При обработке полученных спутниковых данных использовались результаты измерений потоков энергичных электронов в четырех диапазонах их энергий E : (1) 40–130 кэВ, (2) 130–287 кэВ, (3) 287–612 кэВ и (4) ≥ 612 кэВ, размещенных на сайте <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>. Выполненные измерения показали, что в возмущенной магнитной силовой трубке плотность потока энергичных электронов с $E \geq 287$ кэВ всегда была ниже порогового уровня ее обнаружения $F_{пор} \approx 10^2$ эл/(см² · с · ср). Поэтому в работе приводятся результаты измерений плотности потока электронов $F(1)$ и $F(2)$ только для двух самых низких диапазонов E .

Данные о характеристиках энергичных электронов брались с двух детекторов, размещенных на борту спутников *NOAA*. 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 электронов, а детектор-90° (Д-90) — вне его, что отвечает электронам, захваченным (“запертым”) в магнитной силовой трубке. Следуя [13–16], “запертые” электроны, которые опускаются вдоль силовых линий геомагнитного

поля до ионосферных высот, на экваторе возмущенной трубки лишь немного выходят за конус потерь. Как будет видно из представленных в статье результатов, измеренные потоки высыпавшихся электронов были на два порядка и больше слабее потоков “запертых” электронов, оставаясь в большинстве случаев ниже порога их регистрации аппаратурой спутников. Аналогичная ситуация обычно имеет место и при измерении естественных потоков высыпавшихся и “запертых” электронов на средних широтах в условиях низкой геомагнитной активности [14, 15], что соответствует условиям проводимых на стенде СУРА измерений. Такая анизотропия спектра энергичных электронов на средних широтах связывается с медленным их переходом в конус потерь в условиях слабой пич-угловой диффузии [15]; кроме того, имеет место непрерывное высыпание таких энергичных электронов в ионосферу с последующим их поглощением, что препятствует их накоплению в магнитной силовой трубке.

По сути, измеренное на высоте $h \approx 850$ км детектором Д-90 увеличение потока энергичных электронов может рассматриваться как их искусственная инжекция (или их высыпание) из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты, стимулированная модификацией F_2 -области ионосферы мощными КВ радиоволнами. В наших измерениях энергия таких инжектируемых электронов измерялась в диапазоне $E = 40$ –287 кэВ. Отметим, что для естественных высыпаний спектральный максимум энергичных электронов наблюдается для их энергий $E \approx 20$ кэВ [17]. Согласно [18, 19], электроны с $E \approx 20$ –200 кэВ поглощаются на высотах нижней ионосферы 60–100 км (электроны с большей энергией проникают на более низкие высоты), изменяя ее состояние. В результате в ней наблюдается увеличение концентрации плазмы и, как следствие этого, рост поглощения радиоволн ДВ, СВ и КВ диапазонов [20–22]. В естественных условиях эффект воздействия на ионосферу потоков энергичных частиц во время увеличения уровня солнечной активности легко регистрируется на ионограммах вертикального зондирования по поглощению низкочастотной части ветвей первого отражения и по ослаблению интенсивности сигналов кратных отражений. Аналогичный эффект наблюдался и при искусственной инжекции энергичных электронов при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами [5, 6].

Сделанное замечание относительно свойств измеряемых энергичных электронов в полной мере относится и к результатам, полученным на спутнике *DEMETER* с помощью прибора IDP [5], который в силу своей ориентации также измерял на высоте его орбиты $h \approx 660$ км потоки “запертых” электронов, которые, как и выше, могут рассматриваться как инжектируемые (высыпавшие-

ся) энергичные электроны из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты.

Отметим следующие 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 разделяются 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. Однако, 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 (см., например, [16]). Поэтому в нашем случае можно говорить о едином радиационном поясе Земли без разделения его на внутренний и внешний пояса.

2) Существует лишь ограниченное количество прямых исследований свойств высыпающихся энергичных электронов, выполненных на средних широтах в естественных условиях, результаты которых представляют интерес с точки зрения проводимых нами исследований. Среди них следует отметить результаты измерений характеристик энергичных электронов с $E = 20-150$ кэВ, проведенных для $L = 2.0-2.8$ с помощью бортовой аппаратуры спутника *Космос-348*, выведенного на эллиптическую орбиту 212/680 км [17]. В них 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, при этом с ростом активности возрастает и степень зависимости интенсивности высыпаний от величины L ;

в) наблюдается эффект последствия геомагнитных бурь в ионосфере, когда повышенный уровень высыпаний регистрируется в течение недели и больше после бури уже в спокойных, если судить по величине индекса K_p , геомагнитных условиях.

Этим данным хорошо соответствуют результатам более поздних измерений [13] и нашим измерениям, выполненным с помощью спутника *DE-METER* в естественных условиях [5]. Многочисленные измерения, проведенные в авроральных широтах, имеют свои специфические особенно-

сти. Поэтому их прямое сопоставление с нашими данными, полученными в средних широтах, вряд ли уместно без подробного их анализа; в любом случае, эта задача выходит за рамки настоящей работы.

Как было отмечено ранее, полученные экспериментальные данные сильно варьировались от сеанса к сеансу, завися от многих причин. Поэтому их обработка выполнялась отдельно для каждого проведенного сеанса и включала в себя анализ пространственных, энергетических и спектральных характеристик энергичных электронов, инжектируемых в ионосферу при работе станда СУРА. Для всех используемых в работе сеансов измерений в табл. 1 во второй колонке приведены сведения о работе нагревного станда, включая время T^* наибольшего сближения спутника с центром возмущенной магнитной силовой трубки, интервал времени нагрева ионосферы T_n мощной радиоволной, частота и эффективная мощность излучения ВН. В третьей колонке приведены данные, касающиеся геофизических условий проведения измерений: значение критической частоты F_2 -слоя ионосферы f_{oF_2} во время измерений и высота отражения ВН, значения индекса ΣK_p (K_p – планетарный индекс магнитной активности, характеризующий вариации горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, ΣK_p – его суммарное суточное значение) и индекса AE , который является количественной мерой геомагнитной активности в авроральной зоне, отражающий усиление токов в ионосфере в области аврорального овала и учитывающий вариации горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Дополнительно в третьей колонке указана дата начала развития последней суббури, поскольку, как показано в работах [5, 16, 17], прошедшее после нее время имеет принципиальное значение при анализе результатов измерений по причине изменения во времени уровня геомагнитной активности и содержания энергичных электронов в радиационном поясе Земли. В третьей колонке также указывается интенсивность искусственного F_{spread} (или F -рассеяния) на ионограммах вертикального зондирования, появление которого определяется генерацией искусственных неоднородностей плотности плазмы с размерами $l_{\perp} \approx 0.5-2$ км поперек линий геомагнитного поля и может служить мерой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой [1-3]. Кроме того, здесь же отмечено присутствие во время измерений спорадического слоя E_s , который может сильно повлиять на величину потока мощности радиоизлучения, проходящего на высоту отражения ВН и, следовательно, на уровень возбуждаемой здесь ИИТ. В четвертой колонке приведена максимальная величина плотности потока высыпающихся элект-

тронов $F(1)$ в $\{\text{эл}/\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}\}$ для диапазона энергий $E = 40\text{--}130$ кэВ, в котором она всегда имела более высокое значение по сравнению с другими диапазонами, интервал широт Φ , где регистрировались энергичные электроны, плотность потока которых превышал величину 10^3 , и широта Φ_{max} , на которой величина F была максимальной. В тексте статьи мы в дальнейшем для краткости будем опускать размерность величины плотности потока F . В четвертой колонке также приведено максимальное значение потока выпадающих электронов $F(2)$ для второго диапазона энергий $E = 130\text{--}287$ кэВ. Значения величин $F(1)$ и $F(2)$ позволяют оценить форму энергетического спектра инжектированных в ионосферу электронов $F(E)$.

Для выявления отличительных характеристик искусственной инъекции энергичных электронов при модификации ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми нагревным стендом СУРА, нами был выполнен анализ характеристик естественных высыпаний в различных геофизических условиях. В целом, его результаты хорошо соответствуют ранее полученным в работах [5, 6] выводам, показывающим, что граница авроральных высыпаний в спокойных и слабо возмущенных условиях находится севернее (южнее) возмущенной магнитной силовой трубки для измерений в северном (южном) полушарии; при этом естественная авроральная активность не мешает проводить измерения характеристик искусственно инжектируемых в ионосферу энергичных электронов. Проводилось также непосредственное сравнение характеристик искусственной инъекции на витке, пересекающем возмущенную магнитную силовую трубку во время работы стенда, с измерениями на предыдущем и следующем витках орбиты спутника, когда стенд не работал, а также на одном и том же витке в возмущенной магнитной силовой трубке над стендом СУРА и в магнитно сопряженной к ней области ионосферы. Эти тестовые измерения совместно с результатами измерений в [5, 6] позволили определить отличительные признаки присутствия искусственной инъекции энергичных электронов на ионосферные высоты применительно к условиям проводимых измерений и использовать их для селекции получаемых экспериментальных данных.

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Проанализируем сначала результаты измерений, которые были выполнены над стендом СУРА (в северном полушарии, сеансы № 1–6). Рассмотрим начнем с сеанса № 2, который достаточно полно иллюстрирует свойства вызванной модификацией ионосферы инъекции энергичных электронов на ионосферные высоты (или

другими словами, высыпания энергичных электронов на ионосферные высоты). Этот сеанс был проведен 27.VIII.2019 в условиях поздних дневных часов в еще хорошо освещенной Солнцем ионосфере ($T^* = 13:12:00$ UT или $16:12:00$ Мск), когда регулярное поглощение радиоволн в ее нижних слоях (в D и E областях) уже заметно уменьшилось по сравнению с полуденными часами. Эффективная мощность излучения ВН в нем составляла $P_{\text{эф}} \approx 50$ МВт; с учетом линейного поглощения энергии ВН в нижней ионосфере приведенная эффективная мощность может быть оценена как $P_{\text{эф}}^* \approx 15$ МВт, которая была недостаточно высокой для формирования дефокусирующей линзы на высотах $130\text{--}170$ км [11]. Частота ВН $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц была на 200 кГц ниже критической частоты f_{0F_2} . В этом сеансе на ионограммах вертикального зондирования расположенного на стенде СУРА ионозонда обнаруживается возбуждение искусственного F_{spread} небольшой величины с уширением ветвей ионограмм по частоте не больше 200 кГц для $f \approx f_{\text{ВН}}$. Это свидетельствует о низком уровне генерации в возмущенной области ионосферы ответственных за F_{spread} искусственных ионосферных неоднородностей с размерами поперек линий геомагнитного поля $l_{\perp} \approx 0.5\text{--}2$ км, которые возбуждаются при нагреве верхней ионосферы мощной радиоволной при развитии ее самофокусировочной неустойчивости [1–4]. Анализ ионограмм также показал, что во время работы стенда СУРА имеет место подавление ее O -ветви на частотах порядка и выше частоты ВН; это свидетельствует о развитии эффекта аномального ослабления при генерации тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости, которая сопровождается генерацией мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 1\text{--}50$ м [1–4]. Наблюдается также частичное ослабление X -ветви ионограммы за счет рассеяния волн X -поляризации в свою моду на искусственных неоднородностях плотности плазмы с $l_{\perp} \approx 0.2\text{--}1$ км [3].

Сеанс № 2 выполнялся при несколько повышенном уровне геомагнитной активности, если судить по значению индекса $AE \approx 300$ нТ; в этом случае в радиационном поясе Земли для $L \approx 2.7$ обычно наблюдается достаточно высокое содержание энергичных электронов [5]. В таких условиях (см. рис. 1) детектор Д-90 регистрирует энергичные электроны с $E = 40\text{--}130$ кэВ с высокой плотностью потока $F(1) \approx 2 \cdot 10^4$ (верхняя панель), имеющего почти максимальную для данной серии измерений величину, и энергичные электроны с $E = 130\text{--}287$ кэВ с высоким уровнем потока (средняя панель). На рис. 1 эти электроны хорошо обнаруживаются в виде максимумов интенсивности потоков $F(1)$ и $F(2)$ для $T^* \approx 13:12:00$ UT на широте $\Phi_{\text{max}} = 53^\circ$ с.ш.,

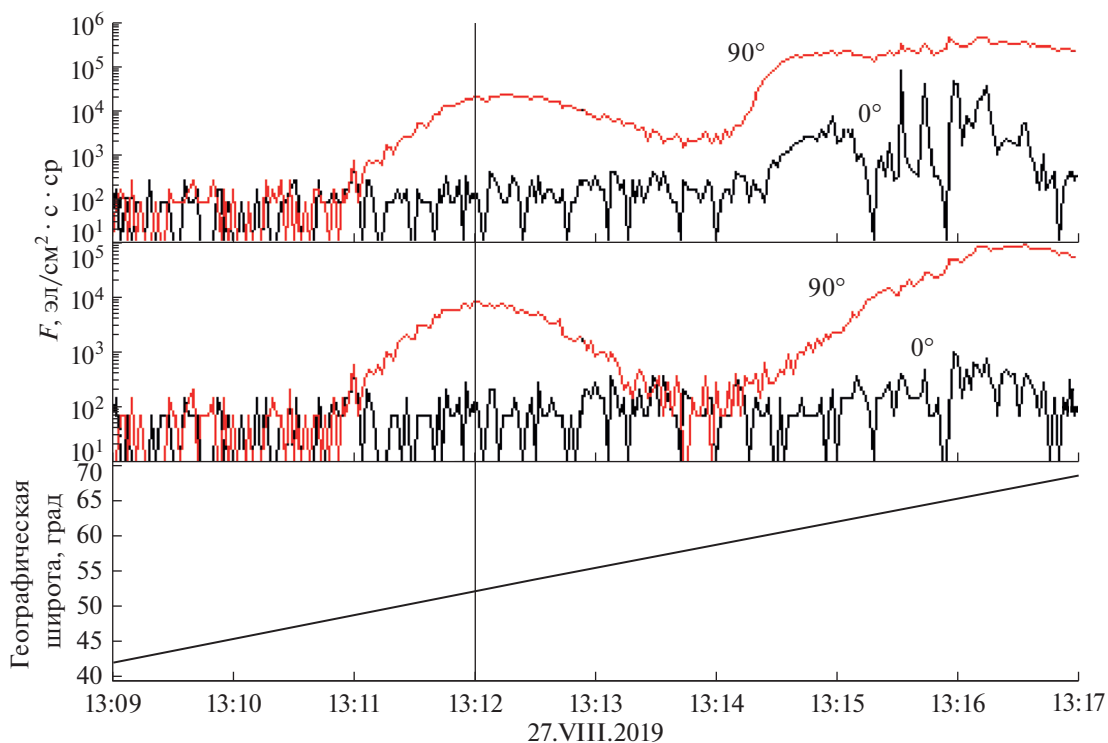


Рис. 1. Пример измерений плотности потока высыпаний энергичных электронов, измеренные детекторами Д-0 (обозначение 0° на рисунке) и Д-90 (обозначение 90° на рисунке) в диапазоне энергий 40–130 кэВ с потоками $F(1)$ (верхняя панель) и в диапазоне 130–287 кэВ с потоками $F(2)$ (средняя панель). На нижней панели показано изменение во времени широты спутника. Тонкая вертикальная линия, отвечающая времени $T^* = 13:12:00$ UT, показывает время наибольшего сближения траектории спутника с центром возмущенной магнитной силовой трубки. Аналогичные обозначения используются для рис. 2–4.

на один градус южнее расчетных координат центра возмущенной магнитной силовой трубки. Такое смещение к югу может быть связано с влиянием эффекта “магнитного зенита” на генерацию ИИТ [3, 4, 8]. Время T^* отмечено на рис. 1 тонкой вертикальной линией (соответствующие времена T^* также отмечены и на рис. 2–4 для других сеансов измерений). Зона высыпаний энергичных электронов на ионосферные высоты захватывает широтный интервал $\Phi \approx 50^\circ\text{--}58^\circ$ с.ш. (~900 км вдоль орбиты спутника, которая лежит в плоскости, близкой к магнитному меридиану) и находится южнее границы авроральных высыпаний, опускающейся в этом сеансе измерений до широт $\Phi \approx 60^\circ$ с.ш. В этом эксперименте при степенной аппроксимации зависимости $F(E) \propto (E)^{-\alpha}$ величина показателя степени $\alpha \approx 0.9$.

Представленные на рис. 1 результаты измерений детектором Д-0 показывают, что в северном полушарии над стендом СУРА интенсивность потока высыпавшихся энергичных электронов в диапазоне их энергий $E \approx 40\text{--}130$ кэВ составляет $F(1) \approx 2 \cdot 10^2$, превышая приблизительно в 2 раза порог их обнаружения и оставаясь на два порядка ниже плотности потока, регистрируемого детек-

тором Д-90. Величина плотности потока $F(2)$ была ниже порога обнаружения высыпавшихся энергичных электронов ($F(2) \leq 10^2$), т.е. была более чем на два порядка ниже плотности потока энергичных электронов, регистрируемого детектором Д-90. Заметим, что в этом сеансе в авроральной области на широтах выше 60° с.ш., где для обоих диапазонов энергий регистрируются энергичные электроны естественного происхождения, плотность потока “запертых” электронов, измеряемая детектором Д-90, также превышает приблизительно на два порядка плотность потока высыпавшихся электронов, измеряемого детектором Д-0.

На нижней панели рис. 1 показана траектория спутника как зависимость его широты от времени.

Рассмотрим сеанс № 1 ($T^* = 12:57:20$ UT; 15:57:20 Мск), который был выполнен 3.VI.2019 в спокойных геомагнитных условиях в дневной ионосфере, когда имело место достаточно высокое линейное поглощение мощной радиоволны в ее нижних слоях. Особенностью этого сеанса является низкая эффективная мощность излучения ВН, $P_{\text{эф}} = 25$ МВт. Это дает оценку $P_{\text{эф}}^* \leq 5$ МВт.

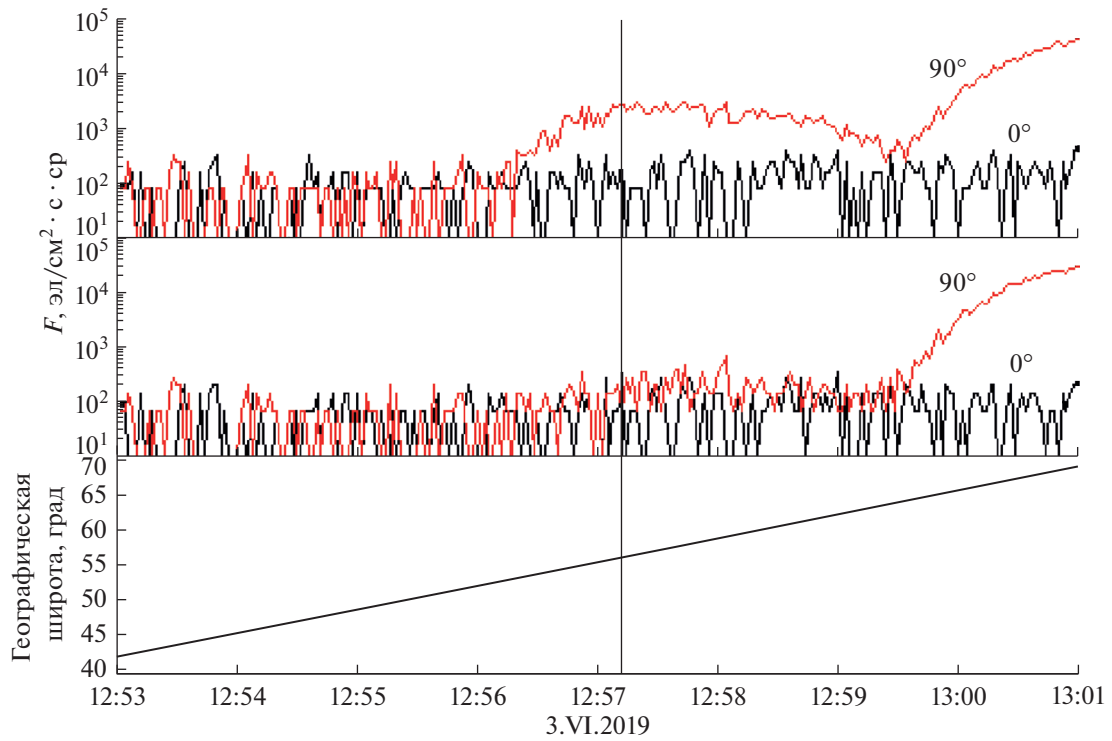


Рис. 2

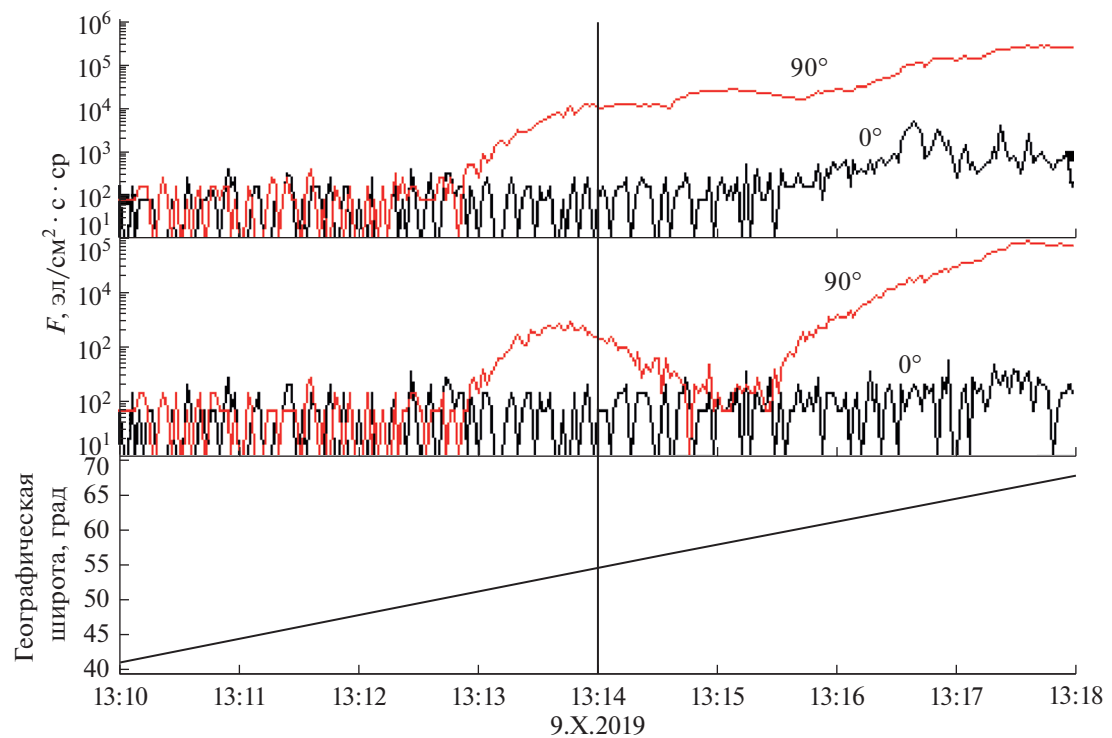


Рис. 3

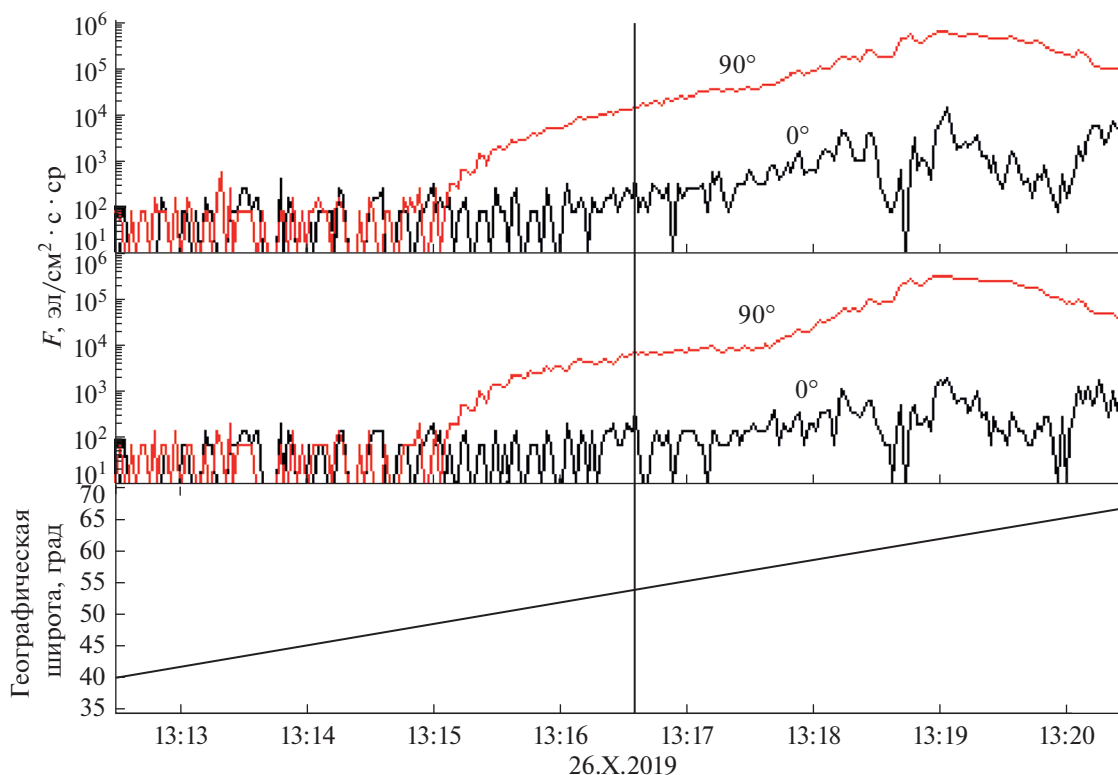


Рис. 4

На еще большее уменьшение мощности проходящего в верхнюю ионосферу излучения ВН влияет присутствие во время измерений спорадического слоя E_s с критической частотой до 4 МГц. Судя по ионограммам вертикального зондирования, после включения ВН в нем наблюдалось развитие E_{spread} , что указывает на генерацию в слое E_s искусственных ионосферных неоднородностей с l_{\perp} порядка нескольких сотен метров. Из этого можно сделать заключение, что, помимо эффекта частичной экранировки, здесь имеет место нелинейное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой E_s -слоя и связанное с ним дополнительное нелинейное поглощение энергии ВН. Как результат низкого уровня мощности ВН, дневных условий проведения эксперимента и наличия слоя E_s , здесь не было обнаружено генерации искусственного F_{spread} на ионограммах вертикального зондирования, а также развития эффекта аномального ослабления в возмущенной области ионосферы. Это свидетельствует о низкой эффективности как генерации интенсивных среднemasштабных искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 0.5\text{--}2$ км в результате развития самофокусировочной неустойчивости мощной радиоволны, так и генерации мелкомасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \leq 50$ м при развитии тепловой (резонансной) параметриче-

ской неустойчивости [1]. С учетом всего вышесказанного можно оценить приведенную эффективную мощность излучения ВН $P_{\text{эф}}^*$ как не выше 3 МВт. Однако, как следует из рис. 2, даже в условиях такого слабого взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой (с развитием ИИТ низкого уровня) детектором Д-90 регистрировалась искусственная инжекция энергичных электронов с $E = 40\text{--}130$ кэВ с плотностью их потока $F(1) \approx 3 \cdot 10^3$; лишь немного выше порога обнаружения регистрировались электроны с энергиями $E = 130\text{--}287$ кэВ, для которых $F(2) \approx 2 \cdot 10^2$. Для этого сеанса рассчитанное значение показателя степени α было ~ 2.3 , свидетельствующее о быстром уменьшении потока F с ростом энергии электронов E . Из рис. 2 можно также заключить, что в этом сеансе зона инжекции электронов с $E = 40\text{--}130$ кэВ была практически целиком расположена к северу от центра возмущенной магнитной силовой трубки, где магнитные силовые трубки более насыщены энергичными электронами, и что на протяжении ~ 1000 км регистрируется широкий максимум для $F(1)$ с $\Phi_{\text{max}} \approx 56^\circ$ с.ш. при координатах центра трубки $\Phi_{\text{тр}} \approx 54^\circ$ с.ш. Южная граница регистрации естественных авральных высыпаний здесь находилась на широте $\sim 62^\circ$ с.ш., вблизи которой все еще можно обнару-

жить присутствие инжектируемых в ионосферу энергичных электронов.

Полученные данные ясно демонстрируют, что стимулированная нагревом ионосферной плазмы искусственная инжекция энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ может наблюдаться даже в дневных условиях при низких ($P_{эф}^* \leq 3$ МВт) значениях приведенной эффективной мощности излучения ВН, когда ИИТ имеет настолько низкий уровень своего развития, что не обнаруживается на ионограммах вертикального зондирования в виде F_{spread} и аномального ослабления зондирующих ионосферу радиоволн.

Из представленных на рис. 2 данных можно заключить, что детектор Д-0 регистрирует энергичные электроны с величиной потоков $F(1) \leq 2 \cdot 10^2$ и $F(2) \approx 10^2$. Однако во втором случае трудно однозначно определить искусственный или естественный характер носят эти высыпания.

Сеанс № 3 ($T^* = 06:41:00$ UT; $09:41:00$ Мск) был выполнен 29.VIII.2019 при $P_{эф} = 50$ МВт практически в условиях уже дневной ионосферы. В целом, ионосферные условия были близки к условиям в сеансе № 1, включая присутствие спорадического слоя E_s . Однако во время сеанса № 3 мощность излучения ВН составляла 50 МВт (с $P_{эф}^* \approx 10$ МВт) и наблюдалось развитие искусственного F_{spread} средней величины на ионограммах вертикального зондирования с уширением их ветвей по частоте до 400 кГц, свидетельствующее о достаточно сильном взаимодействии мощной радиоволны с ионосферной плазмой. В таких условиях детектором Д-90 регистрировались энергичные электроны с почти такими же характеристиками, как и в сеансе № 1, но с несколько более высокими значениями их потоков $F(1) \approx 5 \cdot 10^3$ и $F(2) \approx 10^3$ ($\alpha \approx 1.4$), что можно связать с более высокой мощностью излучения ВН. Детектор Д-0 не регистрировал как естественные высыпания энергичных электронов в области авроральных широт, так и искусственные высыпания в возмущенной магнитной силовой трубке, поскольку их потоки не превышали порога обнаружения регистрирующей аппаратуры.

Измерения во время сеанса № 3 сопровождалась работой казанского цифрового ионозонда в минутном режиме съема ионограмм. Было получено, что после включения ВН развитие ослабления интенсивности ветвей ионограмм, которое определяется связанным с высыпанием энергичных электронов дополнительным поглощением радиоволн в нижней ионосфере, продолжалось в течение 8 мин, приблизительно вдвое дольше по сравнению с ночными измерениями [5]; их восстановление, как и в ночных условиях, продолжалось около 5 мин после окончания нагрева.

Сеанс № 4 ($T^* = 13:14:00$ UT; $16:14:00$ Мск) был выполнен 9.X.2019 (см. рис. 3) в условиях вечерних часов, когда регулярное поглощение радиоволн в нижней ионосфере уже заметно уменьшилось по сравнению с дневными условиями; эффективная мощность излучения ВН в этом сеансе составляла $P_{эф} = 45$ МВт ($P_{эф}^* \approx 15-20$ МВт). Его отличительной особенностью является большое значение индекса $AE \approx 500$ нТ, отвечающее сильной суббуревой активности и высокому содержанию высокоэнергичных электронов в магнитной силовой трубке с $L \approx 2.7$. Отметим, что суббуревая активность началась 27.IX, т.е. еще за 12 дней до рассматриваемого эксперимента. В этом сеансе во время нагрева ионосферы обнаруживались подавление O -моды на ионограммах вертикального зондирования в результате развития эффекта аномального ослабления и возбуждение искусственного F_{spread} средней величины (с уширением ветвей ионограммы до ~ 300 кГц), что свидетельствует о развитии достаточно интенсивной ИИТ. В таких условиях по данным детектора Д-90 наблюдалась искусственная инжекция энергичных электронов высокого уровня с $F(1) \approx 10^4$ ($\Phi_{max} = 55^\circ$ с.ш.) для электронов с $E = 40-130$ кэВ и с $F(2) \approx 2 \cdot 10^3$ ($\Phi_{max} = 53^\circ$ с.ш.) для электронов с энергиями $E = 130-287$ кэВ. Южная граница области естественных авроральных высыпаний здесь находилась на широте $\sim 59^\circ$ с.ш. для электронов с $E = 130-287$ кэВ и несколько южнее для электронов с $E = 40-130$ кэВ, для которых плотность потока энергичных электронов в своем максимуме оказалась лишь на порядок меньше интенсивности естественных авроральных высыпаний. Для этих измерений значение индекса $\alpha \approx 1.4$. В этом сеансе по измерениям детектором Д-0 плотность потока высыпаний оказывается для обоих энергетических диапазонов ниже порога их обнаружения.

Сеанс № 5 ($T^* = 13:21:00$ UT; $16:21:00$ Мск) был выполнен 17.X.2019 при $P_{эф} = 50$ МВт в условиях вечерней ионосферы в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 10$) с лишь несколько повышенным до 200 нТ значением индекса AE . Последнее геомагнитное возмущение среднего уровня с K_p до 4 началось 9.X. Все это позволяет полагать, что данный сеанс модификации ионосферы проводился в условиях достаточно высокого насыщения радиационного пояса Земли энергичными электронами при низком уровне регулярного поглощения радиоволн в ее нижних слоях, с $P_{эф}^* \approx 20$ МВт. При этом регистрировались подавление O -моды на ионограммах и возбуждение искусственного F_{spread} средней интенсивности (частотное уширение следа на ионограмме составляло 300 кГц), свидетельствующие о развитии ИИТ среднего уровня. Следует отметить, эти измерения выпол-

нялись при низкой высоте отражения ВН $h_{\text{отр}} \approx 190$ км, что не отвечает оптимальным условиям генерации плазменных возмущений в верхней ионосфере, для которых $h_{\text{отр}}$ должна быть больше 200 км [1, 3, 5]. В таких условиях искусственная инжекция энергичных электронов с $E = 40\text{--}130$ кэВ характеризовалась достаточно высоким значением плотности их потока $F(1) \approx 5 \cdot 10^3$ и низкой плотностью потока $F(2) \approx 3 \cdot 10^2$ ($\alpha \approx 2.4$) для электронов с $E = 130\text{--}287$ кэВ. Наблюдалось также смещение области высыпаний в сторону более северных широт с максимумом потока для $\Phi_{\text{max}} = 57^\circ$ с.ш. На основании полученных экспериментальных данных можно заключить, что при высоте отражения ВН ниже 200 км эффективность стимуляции высыпаний энергичных электронов уменьшается и более сильно – в области их более высоких энергий $E = 130\text{--}287$ кэВ.

Данные с детектора Д-0 показали, что энергичные электроны для $E = 40\text{--}130$ кэВ, если и регистрировались, то на пороге их обнаружения с $F(1) \approx 10^2$, поэтому трудно заключить имели ли они естественный или искусственный характер.

Наконец, рассмотрим сеанс № 6 (см. рис. 4), который был выполнен 26.X.2019 ($T^* = 13:16:30$ UT; 16:16:30 Мск) при $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц и $P_{\text{эф}} \approx 50$ МВт в фазу максимального развития суббури с K_p до 5 и с $AE \approx 900$ нТ, что отвечало присутствию сильных геомагнитных возмущений и, следовательно, высокому содержанию энергичных электронов в радиационном поясе Земли. В таких условиях южная граница естественных авроральных высыпаний опускалась до широты $\sim 57^\circ$ с.ш., фактически до широты расположения стенда СУРА. Другой важной особенностью этих измерений явилось то, что они проводились при значениях критической частоты $f_{0F_2} \approx 3.9\text{--}4.1$ МГц, которые были несколько ниже частоты ВН $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц. Однако, как было установлено в [23], более слабое (по сравнению со случаем, когда частота ВН немного ниже f_{0F_2}) взаимодействие мощной электромагнитной волны с ионосферной плазмой имеет место и в этом случае, если выполняется условие, что верхнегибридная частота для ВН $f_{\text{ВГР}} = (f_{\text{ВН}}^2 - f_{\text{eH}}^2)^{1/2}$ ($f_{\text{eH}} \approx 1.35$ МГц – значение гирочастоты электронов в области взаимодействия ВН с плазмой) остается ниже критической частоты f_{0F_2} . На высоте $h \approx 220$ км для $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц $f_{\text{ВГР}} \approx 4.0$ МГц. В этом эксперименте не обнаруживалось проявление какого-либо влияния модификации ионосферы на ионограммах вертикального зондирования. Это определяется как низкой эффективностью генерации ИИТ при режиме “нагрева на просвет” с уменьшением ее интенсивности на 10–15 дБ, так и высоким поглощением радиоволн в нижних слоях ионосферы во время геомагнит-

ных возмущений. В таких условиях $P_{\text{эф}}^*$ не превышала величины 5 МВт. Тем не менее, в этом сеансе регистрировались сильные потоки инжектируемых в ионосферу энергичных электронов в обоих измеряемых энергетических диапазонах (т.е. от 40 до 287 кэВ) в большом интервале широт $49^\circ\text{--}57^\circ$ с.ш. (на самом деле, возможно, и на более высоких широтах, но там они маскировались сильными естественными авроральными высыпаниями). Максимум величины их плотности потока регистрировался в центре возмущенной магнитной силовой трубки $\Phi_{\text{max}} = 54^\circ$ с.ш., где $F(1) \approx 4 \cdot 10^4$ для $E = 40\text{--}130$ кэВ и $F(2) \approx 8 \cdot 10^3$ для $E = 130\text{--}287$ кэВ ($\alpha \approx 1.4$). Из рис. 4 можно видеть, что величины этих плотностей потоков оказываются только приблизительно в 50 раз слабее плотностей потоков энергичных электронов, регистрируемых детектором Д-90 в области авроральных высыпаний. Основываясь на условиях проведения измерений, естественно допускать, что в этом сеансе высокая плотность потоков инжектируемых в ионосферу энергичных электронов определялась, главным образом, высоким их содержанием в радиационном поясе Земли и в меньшей степени – интенсивностью возбуждаемой ИИТ.

Из рис. 4 для энергичных электронов с $E \approx 40\text{--}130$ кэВ хорошо видно, что измеренные детектором Д-90 плотность их потока приблизительно на два порядка выше плотности потока выпадающих электронов, измеренных детектором Д-0. Близкое к этому соотношение плотностей потоков имеет место и в авроральных широтах $\Phi \geq 60^\circ$ с.ш. для естественных энергичных электронов. Это объясняет, почему при низком уровне высыпаний плотность потока выпадающих электронов, измеряемая детектором Д-0, оказывается, как правило, ниже порогового уровня $F_{\text{пор}} \approx 10^2$ их обнаружения.

Рассмотрим теперь данные, касающиеся стимулирования инжекции энергичных электронов на ионосферные высоты в магнитно сопряженной к стенду СУРА ионосфере.

Такие измерения в ночных условиях ранее выполнялись нами с помощью спутника *DEMETER* [6]. Они показали, что искусственные высыпания энергичных электронов в обеих сопряженных областях имеют схожие характеристики с более интенсивными высыпаниями в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы вследствие влияния Южно-атлантической магнитной аномалии, которая характеризуется пониженным в ней значением напряженности геомагнитного поля по сравнению с обычными его значениями [24]. Рассматриваемые в настоящей работе измерения ограничиваются только двумя сеансами, выполненными в различных условиях, что не дает возможность сделать какие-либо об-

щие выводы. Однако на основании полученных в них результатов можно заключить, что: а) в сеансе № 7 даже при низкой мощности излучения ВН $P_{эф} \approx 20$ МВт и неоптимальных условиях взаимодействия ВН с плазмой длительный нагрев дневной ионосферы в течение 40 мин приводил к возбуждению ИИТ заметной интенсивности и вызывал сильную искусственную инжекцию энергичных электронов в ионосферу и б) в сеансе № 8 в условиях модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами, когда частота ВН немного превышала критическую частоту f_{0F_2} , но еще выполнялось условие $f_{ВГР} < f_{0F_2}$ и имело место возбуждение слабой ИИТ, наблюдалась стимулированная нагревом ионосферы инжекция энергичных электронов, хотя и невысокого уровня. Эти выводы, естественно, относятся и к параллельно идущей стимулированной инжекции энергичных электронов в северном полушарии, где расположен стенд СУРА, подтверждая и дополняя полученные выше результаты. Чтобы получить надежные сравнительные характеристики высыпаний энергичных электронов для северного и южного полушарий, необходимо проведение более полномасштабных измерений в магнитно сопряженной ионосфере.

Подводя итоги выполненным исследованиям, следует заключить: экспериментально доказано, что инжекцию (высыпание) энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты при модификации ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами можно вызывать не только в ночное время, когда наблюдается развитие наиболее интенсивной ИИТ, но и в ранние вечерние и даже в дневные часы, когда при низком уровне приведенной мощности ВН $P_{эф}^* \approx 3-5$ МВт в условиях генерации слабой ИИТ не наблюдается развития явлений F_{spread} и аномального ослабления на ионограммах вертикального зондирования. При этом уровень таких высыпающихся энергичных электронов в большей степени определяется насыщенностью ими радиационного пояса Земли, чем интенсивностью ИИТ. Результаты выполненных исследований имеют большое значение для интерпретации ряда полученных ранее результатов исследований генерации ИИТ и модификации ионосферно-магнитосферных связей. Они открывают новые возможности объяснения природы некоторых обнаруженных в них эффектов, часть из которых обсуждается в заключительном четвертом разделе работы.

3. ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МАГНИТНО СОПРЯЖЕННОЙ СТЕНДУ СУРА ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Измерения свойств и характеристик плазменных возмущений в возмущенной магнитной си-

ловой трубке в магнитно сопряженной нагревному стенду СУРА области ионосферы до сих пор носили лишь эпизодический характер. Можно указать только несколько публикаций, в которых приведены результаты таких исследований.

В экспериментах [25] пункт регистрации ОНЧ сигналов на частотах $f \leq 10$ кГц располагался в 30 км от нагревного стенда СУРА, который излучал на частоте 4785 кГц в режиме [2 мин – излучение, 8 мин – пауза]. Контроль за состоянием возмущенной магнитной силовой трубки осуществлялся по прохождению через нее “свистящих атмосфериков” (ОНЧ волн). Эти исследования показали, что при возмущении F_2 -слоя ионосферы полем мощной КВ радиоволны имеет место возникновение каналов (дактов), ответственных за распространение ОНЧ-волн вдоль силовых линий геомагнитного поля между магнитно сопряженными областями ионосферы. Измеренные характерные времена развития и релаксации этих каналов составляли ~ 1 мин и 2–4 мин соответственно. Столь короткие времена исключают возможность их формирования за счет термодиффузионных процессов распространения плазменных возмущений от области взаимодействия ВН с плазмой верхней ионосферы до магнитно сопряженной области. Для объяснения свойств наблюдаемого явления в [25] предполагалось, что развитие таких каналов должно быть связано с воздействием на плазму пучками сверхтепловых электронов, ускоренных в областях развития плазменной турбулентности при взаимодействии мощной радиоволны O -поляризации с плазмой F_2 -слоя ионосферы. Формирование дактов с увеличенной плотностью плазмы при модификации F_2 -области ионосферы несколько позднее было подтверждено в экспериментах [26].

Появление плазменных возмущений и КНЧ-ОНЧ-излучений, а также вариаций плотности и температуры электронов плазмы во внешней ионосфере и в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы проводилось в 1991 г. с помощью аппаратуры, размещенной на борту спутника *Космос-1809* [27]. Было установлено, 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 соответствует размерам зоны высыпаний энергичных электронов на ионосферные высоты. В этих областях наблюдалось 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 выполненных нами экспериментах только в нескольких сеансах удалось зарегистрировать вариации плотности и температуры плазмы в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы, которые можно отнести к искусственным. Часто полученные в этих измерениях данные нельзя было с уверенностью отнести к ним из-за высокого фонового уровня естественных вариаций регистрируемого сигнала, интенсивность которых в случае стенда СУРА в возмущенной магнитной силовой трубке в южном полушарии заметно выше по сравнению с северным.

Наибольшее число измерений в магнитно сопряженной стенду СУРА области ионосферы нами было проведено с использованием бортовой аппаратуры спутника *DEMETER* [5, 6, 28]. Анализ результатов этих экспериментов приводится ниже. Важно, что бортовая аппаратура этого спутника позволяла одновременно измерять как вариации плотности и температуры плазмы, так и потоки высыпающихся энергичных электронов. В этих измерениях длительность нагрева ионосферной плазмы, за исключением выполненных в 2010 г. экспериментов, обычно составляла 10–15 мин; в 2010 г. при проведении измерений часто использовались нагревы с увеличенной до 30–45 мин длительностью излучения ВН для обеспечения более полной генерации искусственных плазменных возмущений во всей магнитной силовой трубке. Заметим, что, согласно [29], для уверенного создания таких возмущений за счет термодиффузионных процессов длительность нагрева должна быть не меньше 60–80 мин даже в оптимальных условиях проведения экспериментов.

Ниже представлены данные измерений в магнитно сопряженной области ионосферы, полученные в двух сеансах, сильно различающихся по условиям их проведения.

Рис. 5 демонстрирует результаты измерений, выполненных 19.V.2008. Они проводились около $T \approx 18:00$ UT (около 22:00 Мск) в ночные часы практически сразу после захода Солнца в области взаимодействия ВН с плазмой. В этом сеансе модификация ионосферы продолжалась около 10 мин перед пролетом спутника через возмущенную магнитную силовую трубку. На верхней и средней панелях показаны результаты измерений соответственно плотности (N_e) и температуры (T_e) электронов плазмы, на нижней панели приведены результаты измерений характеристик стимулированной инъекции энергичных электронов в ионосферу при развитии ИИТ. Этот сеанс характеризовался несколько повышенной геомагнитной возмущенностью с вариациями индекса AE в течение дня до 500 нТ при $\Sigma K_p = 13^+$. Как оказалось, измерения проводились в самом начале развития геомагнитной суббури в условиях, когда еще не наблюдалось сильных естественных высы-

паний энергичных электронов в авроральной зоне и, следовательно, не должно было наблюдаться связанного с суббуровой активностью сильного увеличения линейного поглощения мощной радиоволны в нижней ионосфере. Максимум развита геомагнитной возмущенности пришелся на 21.V через 2 дня после проведения измерений. ВН излучалась на частоте 4300 кГц с эффективной

мощностью $P_{эф} \approx 60$ МВт (с $P_{эф}^* \approx 30\text{--}40$ МВт). Высота ее отражения составляла ~ 225 км. Критическая частота f_{0F_2} была около 5.8 МГц, на 1.5 МГц выше $f_{ВН}$, т.е. ВН отражалась достаточно далеко от максимума F_2 -слоя ионосферы, что, как показано в [5, 28], не является оптимальным для генерации плазменных возмущений.

Обработка полученных экспериментальных данных показала, что в магнитно сопряженной стенду СУРА области ионосферы обнаруживались вариации N_e и T_e со следующими значениями их относительных величин: $\delta N \approx 10\%$ и $\delta T \approx 2\text{--}3\%$ с размером флуктуаций вдоль орбиты спутника ~ 90 км, которые регистрировались на расстоянии ~ 370 км вдоль его орбиты. Прибор IDP спутника *DEMETER* зарегистрировал в этой области сильную искусственную инъекцию энергичных электронов на ионосферные высоты с максимумом их плотности потока до 800 эл/($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr} \cdot \text{кэВ}$) для $E \approx 115$ кэВ; энергия инжектируемых электронов доходила до ~ 300 кэВ.

На рис. 6 приведены результаты выполненных 28.VI.2010 измерений, которые проводились около $T \approx 05:16$ UT (около 08:16 Мск) в утренние часы уже в сильно освещенной Солнцем ионосфере. Этот день характеризовался несколько повышенной геомагнитной возмущенностью с вариациями индекса AE до 200 нТ при $\Sigma K_p = 13^+$. Суббуровая активность с максимальными значениями K_p до 3 началась 25.VI, 28.VI регистрировались интенсивные естественные высыпания энергичных электронов в области авроральных широт. ВН излучалась на частоте $f_{ВН} = 4300$ кГц при $f_{0F_2} \approx 4.6$ МГц с эффективной мощностью $P_{эф} = 50$ МВт (с $P_{эф}^* \approx 15\text{--}20$ МВт); высота ее отражения составляла ~ 225 км.

Хотя условия генерации искусственных плазменных возмущений в условиях освещенной ионосферы не являются оптимальными, обработка полученных экспериментальных данных показала, что в магнитно сопряженной стенду СУРА ионосфере регистрируются сильные высыпания энергичных электронов с максимумом их плотности потока до 500 эл/($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr} \cdot \text{кэВ}$) для $E \approx 120$ кэВ (величина максимальной энергии инжектируемых в ионосферу электронов доходила до 250 кэВ) и наблюдалось появление вариаций N_e и T_e с $\delta N_e \approx 9\%$ и $\delta T_e \approx 3\%$, которые имели про-

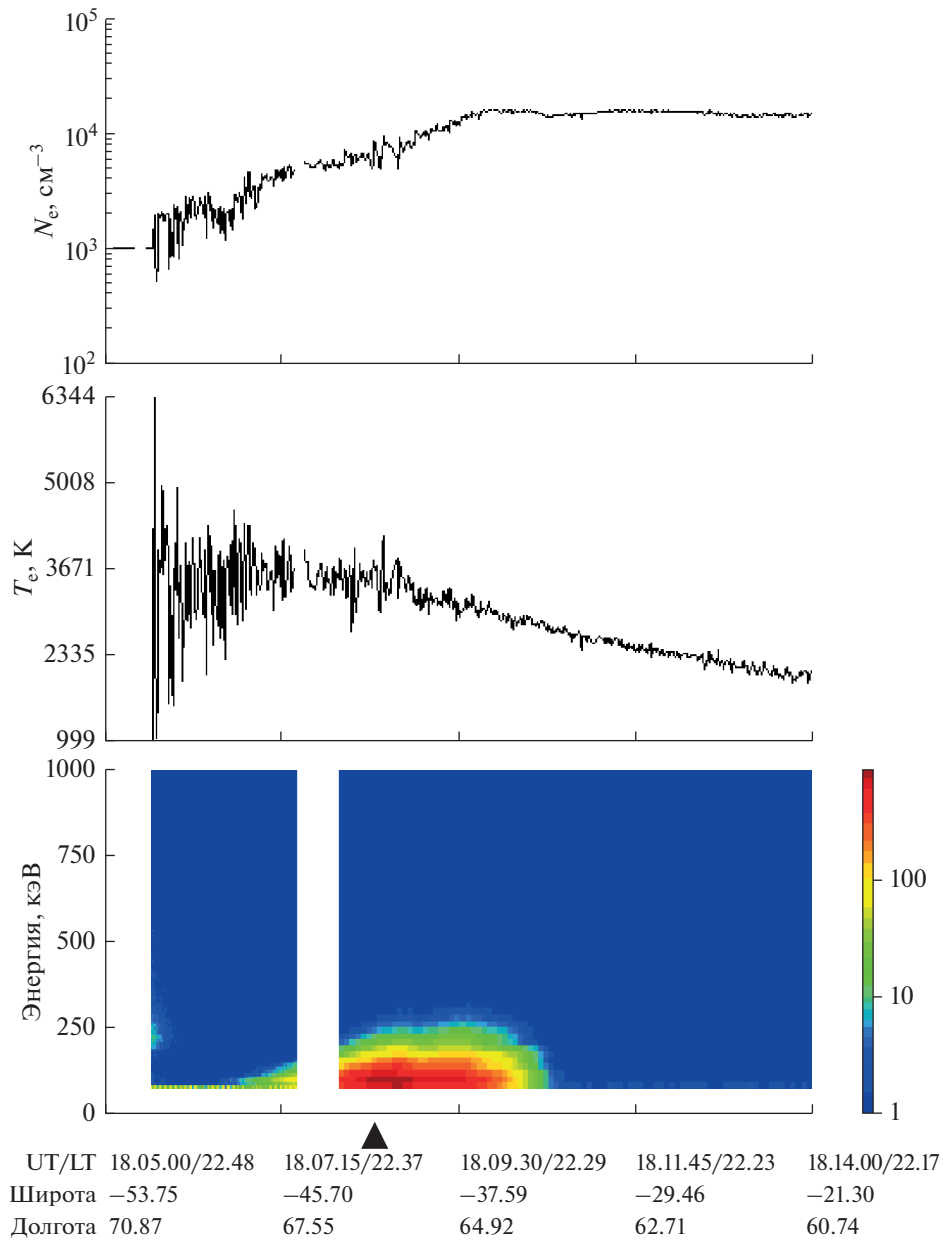


Рис. 5. Результаты выполненных 19.V.2008 с помощью спутника *DEMETER* измерений величин концентрации и температуры электронов (верхняя и средняя панели соответственно). Для этого же сеанса на нижней панели приведены результаты измерений энергии электронов, плотность потока электронов дана на рисунке в цветовой гамме справа.

пространственные размеры ~ 450 км вдоль орбиты спутника и регистрировались на протяжении ~ 1500 км. Видно, что по сравнению сеансом, выполненным 19.V.2008 в поздние вечерние часы в условиях повышенного уровня геомагнитной возмущенности, в условиях измерений в утренние часы при высоком уровне искусственной инжекции энергичных электронов в ионосферу вариации плотности и температуры электронов плазмы регистрировались с в пять раз большими пространственными масштабами (450 км против 90 км) и на большем расстоянии вдоль орбиты

спутника (~ 1500 км по сравнению ~ 370 км) при близких величинах для δN_e и δT_e . Полученные в этом сеансе результаты можно рассматривать также как свидетельство достаточно высокой эффективности стимуляции высыпаний энергичных электронов в утренние часы.

Анализ результатов всех измерений, выполненных в магнитно сопряженной к стану СУРА области ионосферы, позволяет сделать следующий вывод: искусственные вариации электронной плотности и температуры плазмы, если и ре-

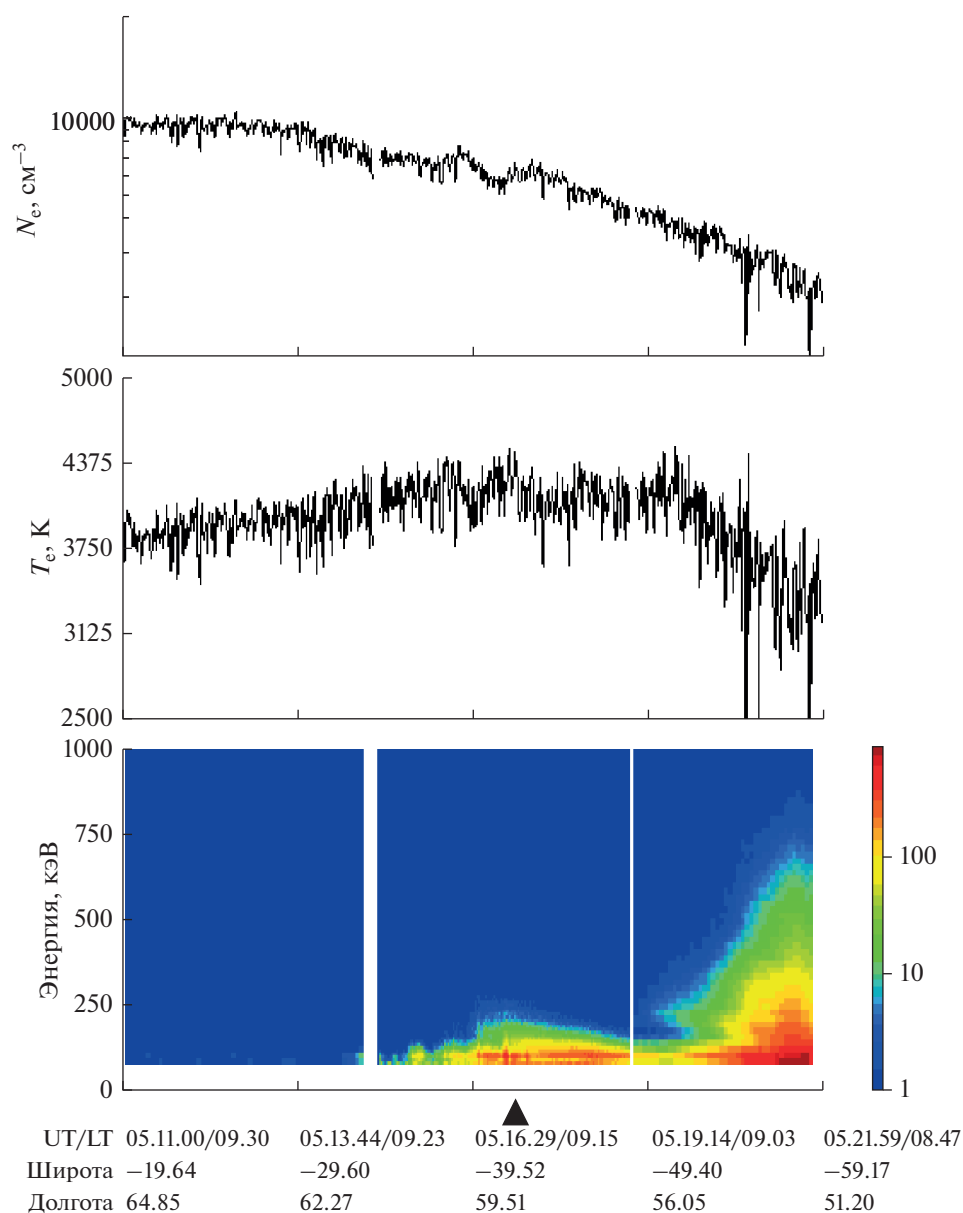


Рис. 6. Результаты выполненных 28.VI.2010 с помощью спутника *DEMETER* измерений величин концентрации и температуры электронов (верхняя и средняя панели соответственно).

гистрировались на фоне естественных вариаций N_e и T_e , то только в тех сеансах, когда имело место интенсивное высыпание энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу. Это позволяет предположить, что генерация возмущений N_e и T_e , регистрируемых в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы, определяется интенсивной инжекцией энергичных электронов. Важно отметить, что размеры области генерации возмущений N_e и T_e намного превышают поперечные размеры возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с сильно развитой ИИТ вблизи высоты отражения ВН и более соответствуют размерам об-

ласти высыпаний энергичных электронов. Поскольку энергичные электроны одновременно высыпаются и в ионосферу северного полушария, естественно допускать, что они могут и там вызывать развитие аналогичных возмущений плотности и температуры плазмы. Не исключено, что именно такого рода вариации плотности плазмы регистрировались в рассматриваемых в [25–27] экспериментах.

По ряду причин, измерения свойств искусственных возмущений плотности и температуры плазмы в магнитно сопряженной стенду СУРА области ионосферы до сих пор продолжают носить ограниченный характер. В первую очередь,

это связано со сложностью выделения слабых искусственных плазменных возмущений на фоне их естественной составляющей, имеющей более высокую интенсивность в южном полушарии в магнитно сопряженной к стенду СУРА области из-за влияния Южно-атлантической магнитной аномалии. Ограниченность полученных сведений не позволяет сегодня дать ответы на многие возникающие здесь вопросы, и нужны дополнительные исследования, чтобы получить более полное представление о свойствах и характеристиках возбуждаемой на другом конце возмущенной магнитной силовой трубки искусственной плазменной турбулентности. Из-за более слабой естественной возмущенности ионосферной плазмы в средних широтах и более низкого здесь уровня естественных высыпаний энергичных электронов такие исследования на стенде СУРА имеют, как это отмечалось ранее, явные преимущества по сравнению с измерениями на более высокоширотных нагревных стендах HAARP (Аляска, США) и EISCAT-heater (Тромсе, Сев. Норвегия).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Анализ рассмотренных выше результатов исследований свойств инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли во внешнюю среднеширотную ионосферу, вызванной модификацией ее F_2 -области мощными радиоволнами, позволяет сделать следующие выводы.

1) Искусственная инжекция (высыпание) энергичных электронов обнаруживается и при модификации дневного F_2 -слоя ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации, когда приведенная эффективная мощность излучения ВН $P_{эф}^*$, определенная с учетом регулярного поглощения мощной радиоволны в нижних слоях ионосферы и влияния других факторов, не превышает 3–5 МВт и на ионограммах вертикального зондирования могут даже не обнаруживаться такие обычно наблюдаемые в вечернее и ночное время суток эффекты, как генерация F_{spread} , подавление O -ветви за счет ее аномального ослабления и уменьшение интенсивности X -ветви за счет ее рассеяния в свою моду, которые являются признаками развития неустойчивостей в магнитоактивной плазме и высокого уровня генерации ИИТ [1–3]. В таких условиях вызванная нагревом ионосферы инжекция энергичных электронов на ионосферные высоты регистрировалась, только когда имело место высокое их содержание в радиационном поясе Земли. Полученные данные позволяют заключить, что интенсивность искусственной инжекции более определяется степенью за-

полнения радиационного пояса энергичными электронами, чем интенсивностью ИИТ.

2) При пролете спутников вблизи центра возмущенной магнитной силовой трубки искусственная инжекция энергичных электронов обнаруживается до 100–200 км к югу и до 500–700 км к северу от нее, намного превышая горизонтальные размеры трубки. Механизм такого большого уширения зоны искусственных высыпаний еще нуждается в своем изучении. Отметим, что область регистрации высыпаний, стимулированных нагревом ионосферы и развитием в ней ИИТ, в представленных в работе результатах измерений на спутниках NOAA в дневные и вечерние часы имела меньшие размеры вдоль их орбиты по сравнению с ночными измерениями на спутнике DEMETER, которые, отметим, были выполнены при более высоких приведенных мощностях $P_{эф}^*$ излучения ВН в условиях существенно более интенсивного развития ИИТ.

3) Результаты измерений показали, что уровень геомагнитных возмущений сильно влияет на величину инжекции энергичных электронов в ионосферу, в первую очередь, за счет изменения их содержания в радиационном поясе Земли. Геомагнитная возмущенность также увеличивает величину линейного поглощения мощной радиоволны в нижней ионосфере и вызывает изменение критической частоты f_{0F_2} . Влияние этих факторов объясняет наблюдающийся большой разброс результатов измерений, полученных в разных геофизических условиях.

4) Оценки, выполненные по данным спутников NOAA, показывают, что в ранние вечерние часы в спокойных геомагнитных условиях и при оптимальных условиях взаимодействия ВН с ионосферной плазмой плотность потока инжектируемых электронов с энергиями $E \approx 40$ кэВ может достигать значений $(3-5) \cdot 10^3$ эл/(см² · с · ср); он уменьшается, по крайней мере, на порядок в полуденные часы вместе с увеличением от ~ 1 до ~ 2.4 показателя степени α зависимости величины потока от энергии электронов. В возмущенных геомагнитных условиях, когда величина индекса $AE \geq 500$ нТл и наблюдается высокая степень насыщения радиационного пояса Земли энергичными электронами, плотность потока инжектируемых электронов может составлять $4 \cdot 10^4$ эл/(см² · с · ср), т.е. увеличиваться приблизительно на порядок по сравнению со спокойными геомагнитными условиями.

5) Выполненные измерения продемонстрировали, что высыпание энергичных электронов продолжает регистрироваться и в условиях, когда частота ВН немного превышает критическую частоту f_{0F_2} (в режиме “нагрева на просвет”), если при этом верхнегибридная частота ВН остается

ниже критической частоты f_{0F_2} . Этот факт является прямым доказательством того, что тепловая (резонансная) параметрическая неустойчивость через развитие тепловых компонент ИИТ и генерацию верхнегибридных и нижнегибридных плазменных колебаний лежит в основе механизма стимуляции инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на высоты ионосферы [1, 3, 4].

б) Принимая во внимание результаты исследований характеристик искусственных высыпаний энергичных электронов по их влиянию на ионограммы вертикального зондирования [5, 6], время развития их инъекции составляет 1–7 мин, завися от ионосферных условий проведения измерений, геомагнитной возмущенности, режима излучения ВН и ее эффективной мощности. Так в условиях “холодного” старта в дневных условиях (в еще сильно освещенной Солнцем ионосфере) требуется более длительное время модификации ионосферной плазмы по сравнению с измерениями в вечерние и ночные часы, чтобы обеспечить необходимый уровень развития ИИТ и высокий уровень инъекции энергичных электронов. После окончания нагрева ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами уменьшение инъекции электронов до ее естественного уровня продолжается от нескольких минут до 10–15 мин в зависимости от ионосферных условий, причем более короткие времена восстановления наблюдаются в сеансах с длительными временами их развития, отвечающих неоптимальным условиям развития ИИТ.

При использовании для модификации ионосферы мощных радиоволн, излучаемых в режиме “несущая” встает вопрос о механизме, приводящем к искусственной инъекции энергичных электронов радиационного пояса Земли на ионосферные высоты. Считается, что нижнегибридные плазменные колебания, возбуждаемые в области взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой, трансформируются в ОНЧ волны на искусственных ионосферных неоднородностях, которые также генерируются при развитии тепловой параметрической неустойчивости. При этом ОНЧ волны 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 [4, 30–33]. Такая схема генерации ОНЧ волн при модификации ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами, помимо прямой их генерации за счет излучения наземными СДВ передатчиками [7, 13, 34–37] или за счет нелинейной демодуляции модулированной по амплитуде мощной КВ радиоволны (эффект Гетманцева) [38–41], дает возможность использовать излуче-

ние ВН в режиме “несущая” для стимуляции высыпания энергичных электронов.

При рассмотрении предложенного выше механизма инъекции необходимо учитывать следующее. Согласно [7, 34], время затухания естественных ОНЧ излучений не превышает 5–30 с, что намного быстрее времени уменьшения потока энергичных электронов при их искусственной инъекции до естественного уровня после выключения ВН, которое составляет несколько минут. Такое сильное отличие в значениях времен релаксации ОНЧ излучений и уменьшения потоков энергичных электронов требует включения специального механизма поддержания высыпаний в отсутствие искусственной генерации ОНЧ излучений. Можно предположить, что развивающиеся при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами дакты с увеличенной плотностью плазмы захватывают естественные ОНЧ излучения, как это наблюдалось, например, в [28], поддерживая высокий уровень высыпаний после выключения ВН. Время релаксации дактов составляет от нескольких минут до 10–20 мин, завися от ионосферных условий, что соответствует измеренному времени уменьшения интенсивности инъекции до ее невозмущенного уровня. Это предположение требует, однако, дальнейшего своего изучения и всесторонней проверки.

Полученные в работе результаты позволяют оценить полную мощность, вносимую в ионосферу Земли обоих полушарий высыпающимися энергичными электронами с энергиями $E \geq 20$ кэВ (согласно [16, 17], максимум их спектральной плотности наблюдается при $E \approx 20$ кэВ). Зная энергетический спектр энергичных электронов, инжектируемых в результате модификации ионосферы мощными радиоволнами, и размеры области высыпаний, можно оценить мощность, вносимую в ионосферу этими электронами. При модификации вечерней ионосферы мощными КВ радиоволнами в спокойных геомагнитных условиях при выполнении оптимальных условий взаимодействия мощной радиоволны с плазмой верхней ионосферы (при развитии интенсивной ИИТ) эта мощность по измерениям с помощью спутников *NOAA* составляет около 1 кВт, она может достигать величины до 10 кВт в возмущенных геомагнитных условиях; в полуденные часы она, как правило, не превышает 0.1 кВт. Отметим, 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 $P_{эф}^*$ не превышает 3–10 МВт и имеет место развитие ИИТ слабого уровня [1–3]. В этом случае большая интенсивность потока высыпающихся энергичных электронов может достигаться только при высокой степени насыщенности ими радиацион-

ного пояса Земли. Принимая во внимание результаты экспериментов, следует ожидать, что в утренние часы инжекция энергичных электронов будет приблизительно такого же уровня, как и в ранние вечерние часы.

Учитывая полученные в [5, 6] результаты измерений спектральных характеристик высыпаний и принимая во внимание геометрические размеры зоны высыпаний, оценка полной мощности высокоэнергичных электронов, инжектируемых в ионосферу обоих полушарий из радиационного пояса Земли в ночное время суток в спокойных геомагнитных условиях при выполнении оптимальных условий взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой, может достигать значений 100–200 кВт для электронов с $E \geq 20$ кэВ. В возмущенных геомагнитных условиях мощность высыпаний может быть в несколько раз больше (до ~500 кВт и даже больше), величина которой для условий проводимых измерений сравнима с генерируемой передатчиками стенда ВЧ мощностью 450–550 кВт. Полученная такая большая величина мощности, инжектируемой в ионосферу Земли энергичными электронами, является прямым подтверждением ранее сделанного многими авторами предположения о сильном влиянии модификации верхней ионосферы мощными КВ радиоволнами на ионосферно-магнитосферные связи.

Полученные в работе результаты исследований свойств и характеристик искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты в различное время суток позволяют предложить новые подходы к интерпретации некоторых необъясненных до сих пор явлений.

В работах [42–44] было обнаружено уменьшение приблизительно на 10% интенсивности микроволнового излучения в линии озона вблизи ее спектрального максимума на частоте ~110.8 ГГц при нагреве ионосферы мощными КВ радиоволнами. Эта часть спектра излучения формируется на мезосферных высотах $h \approx 60$ км. В пересчете на содержание озона такое падение интенсивности дает уменьшение его концентрации на 15–20%. Важным свойством наблюдаемого эффекта является то, что характерные времена уменьшения интенсивности спектрального максимума в линии озона при включении ВЧ и ее восстановления после окончания воздействия оказываются заведомо меньше 15 мин и что такое уменьшение сохраняется в измерениях с наклоном диаграммы направленности озонометра на 70° от вертикали на юг, когда область локации озона на высоте ~60 км находится в 110 км южнее области модификации нижней ионосферы пучком мощных радиоволн. Из последнего следует, что не прямой нагрев

мощной радиоволной D и E слоев ионосферы является его причиной.

До сих пор этот эффект связывался с влиянием внутренних гравитационных волн, генерируемых при серии периодических включений ВЧ для нагрева ионосферной плазмы [43]. Однако можно предложить иную связанную с нагревом ионосферы схему подавления интенсивности генерации микроволнового излучения в линии озона на мезосферных высотах. Следуя [18, 45–49], при высыпаниях энергичные электроны с $E \approx 100$ –200 кэВ 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, [45, 49]). В нашем случае потоки энергичных электронов с энергиями E до 100–150 кэВ появляются на мезосферных высотах за счет их искусственной инжекции из радиационного пояса Земли при модификации F_2 -слоя ионосферы мощными КВ радиоволнами. Исходя из измеренного времени вариаций содержания озона при нагреве ионосферной плазмы, которое меньше 15 мин, главное влияние должны оказывать молекулы HO, которые доминируют на высотах 40–60 км [48] и имеют здесь время жизни секунды-минуты [47].

Для разработки детальной модели влияния модификации ионосферной плазмы мощными радиоволнами на содержание озона на мезосферных высотах требуется дальнейшее проведение экспериментальных и теоретических исследований, чтобы более подробно изучить свойства наблюдаемого явления и построить его эмпирическую модель.

Еще одним новым направлением проводимых в последние годы на стенде СУРА работ является изучение характеристик обнаруженной генерации микроволнового излучения на частотах 0.5–2 ГГц при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами [50]. По своим характеристикам (спектру, вариациям интенсивности СВЧ излучения во времени) это излучение полностью соответствует естественному микроволновому излучению, обнаруженному в [51] как результат реакции атмосферы на ее облучение энергичными частицами солнечного происхождения. В результате этого атмосферные атомы и молекулы

возбуждаются до ридберговских уровней энергии с последующим их спонтанным переходом в состояния с меньшей энергией, сопровождающимся излучением электромагнитных волн в широком диапазоне частот от радиоволн вплоть до ультрафиолетового излучения [52]. Как показано в настоящей работе, нагрев ионосферы мощными радиоволнами даже в дневных условиях стимулирует инжекцию энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ, которые, как и в случае естественной солнечной радиации, при столкновении с атомами и молекулами атмосферы будут переводить их в высоковозбужденные ридберговские состояния с последующим излучением широкого спектра электромагнитных волн.

Согласно измерениям [50], интенсивность вызванного нагревом ионосферы микроволнового излучения составляет величину 10–45 К с более высокими ее значениями в поздние вечерние и ночные часы, когда имеет место более эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2 -области ионосферы и, следовательно, стимулируется более интенсивная инжекция высокоэнергичных электронов в ионосферу по сравнению с дневными часами. Такая интенсивность микроволнового излучения сравнима с излучением, генерируемым при солнечных вспышках [53]. Важно, что микроволновая составляющая ридберговского излучения практически без потерь достигает тропосферы, где она может оказывать влияние на погодно-климатические процессы через конденсационно-кластерный механизм, как это рассматривалось в [50, 53].

Помимо указанных выше механизмов влияния, наблюдается дополнительная ионизация атмосферы высокоэнергичными электронами и другие эффекты (см., например, [45]). Как было показано при анализе результатов измерений сеанса № 3, ослабление интенсивности ветвей ионограмм продолжалось в течение 8 мин после включения ВН, приблизительно вдвое дольше по сравнению с ночными измерениями [5]; их восстановление, как и в ночных условиях, продолжалось около 5 мин после окончания нагрева. В [20, 54] было также установлено, что дополнительная искусственная ионизация атмосферы на высотах $h \leq 120$ км высокоэнергичными 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 плотность потока электронов с энергиями $E \approx 100$ кэВ должна составлять величину не менее 10^7 эл/($m^2 \cdot c$), что дает оценку полной мощности выпадающих энергичных электронов больше, чем 240 кВт, которая хорошо соответствует полученным нами результатам спутниковых измерений.

Возможны и другие проявления выпадающих энергичных электронов, например, такие как их воздействие на E и E_s слои ионосферы, приводящее к генерации в них искусственных ионосферных неоднородностей и к появлению E_{spread} на ионограммах, а также к генерации спорадического слоя E_s , как это было обнаружено еще в [21, 55] в экспериментах на среднеширотном нагревном стенде Платтевилль (Колорадо, США). В [55] также была обнаружена очень длительная (~ 10 мин) релаксация ослабления пробных радиоволн в E -слое, которая наблюдалась только после долгой (~ 10 мин) модификации дневной ионосферы мощными КВ радиоволнами. При короткой (меньше 5 с) длительности нагревного импульса имела место обычно наблюдаемая в E -слое их релаксация с характерным временем ~ 40 мс. Такая длительная релаксация поглощения радиоволн в E -области ионосферы долгое время оставалась необъясненной. Как это теперь ясно, этот эффект может быть связан с увеличением поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы под влиянием стимулированного нагревом выпадания на высоты ионосферы энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ.

Много других примеров возможного влияния стимулированных нагревом ионосферы выпаданий высокоэнергичных электронов на различные ее области можно найти в [18, 20, 22, 56–58].

Подводя итоги выполненным исследованиям, следует констатировать, что искусственная стимуляция инжекции (выпадания) энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты, появляющаяся при модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми нагревным стендом СУРА, открывает широкие возможности для изучения влияния таких электронов на характеристики тропосферы, мезосферы и ионосферы. Как отмечалось выше, такое влияние возможно через изменение содержания озона в мезосфере, через ионизацию атомов и молекул атмосферы, что влияет на характеристики физико-химических процессов на мезосферных высотах, через генерацию микроволнового излучения, через возмущение глобальной электрической цепи за счет генерации электрических токов на ионосферных высотах и через другие физико-химические процессы в атмосфере Земли. Это обуславливает интерес к такого рода исследованиям и необходимость их дальнейшего развития.

Авторы благодарят сотрудников стенда СУРА за помощь в организации и проведении экспериментов. Рассматриваемые в работе исследования искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты были выполнены В.Л. Фроловым на стенде СУРА при финансовой поддержке РФФИ

в рамках научного проекта № 20-05-00166. Исследования В.Л. Фролова в части влияния высыпаний на генерацию ИИТ и на атмосферные процессы выполнялись в рамках научного проекта РНФ № 21-12-00385. Исследования А.О. Рябова выполнялись при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-52-15007. Работа в части использования казанского ионозонда “Циклон” выполнялась А.Д. Акчуриным и В.Л. Фроловым за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. N.Y.: Springer, 1978.
- Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 2. С. 208–225.
- Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: ННГУ, 2017.
- Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A. et al. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // Space Science Review. 2018. V. 214. Article number 118. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
- Фролов В.Л., Акчурин А.Д., Болотин И.А. и др. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 9. С. 641–663.
- Рябов А.О., Фролов В.Л., Акчурин А.Д. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопряженной относительно стелла СУРА области ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 4. С. 285–296.
- Inan U.S., Bell T.F., Bortnik J., Albert J.M. Controlled precipitation of radiation belt electrons // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № A5. P. 1186. <https://doi.org/10.1029/2002JA009580>
- Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С. Эффект магнитного зенита // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 9. С. 772–787.
- Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н. и др. Стенд СУРА: исследование атмосферы и космического пространства // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 7. С. 545–576.
- Скребкова Л.А. Влияние различных слоев ионосферы на интегральное поглощение радиоволн // Геомагнетизм и Аэрномия. 1975. Т. 15. № 4. С. 664–671.
- Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др. Искусственная дефокусирующая линза в ионосфере // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. Вып. 11. С. 533–536.
- The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) www.noaa.gov/
- Hayosh M., Pasmanik D.L., Demekhov A.G. et al. Simultaneous observations of quasi-periodic ELF/VLF wave emissions and electron precipitation by DEMETER satellite: A case study // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 1–11. <https://doi.org/10.1002/jgra.50179>
- Yanin A.G., Yanina T.A., Semenova N.E., Gvozdevsky B.B. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES. Physics of auroral phenomena // Proc. XXXVII annual seminar, Apatity. 2014. P. 46–50.
- Lam M.M., Horne R.B., Meredith N.P. et al. Origin of energetic electron precipitation >30 keV into atmosphere // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. A00F08. <https://doi.org/10.1029/2009JA014619>
- Ковтюх А.С., Панасюк М.И. Радиационные пояса Земли. Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Зеленого Л.М., Веселовского И.С. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2008.
- Лаштовичка Я. Высыпания жестких электронов ($E = 20\text{--}150$ кэВ) на средних широтах // Геомагнетизм и Аэрномия. 1980. Т. 20. № 5. С. 880–883.
- Кривоуцкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009.
- Marshall R.F., Cully C.M. Atmospheric effects and signatures of high-energy electron precipitation. The dynamic loss of Earth's radiation belts. Amsterdam: Elsevier, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813371-2.00007-X>
- Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2014.
- Wright J.W. Evidence for precipitation of energetic particles by ionospheric “heating” transmissions // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 31. P. 4383–4386.
- Potemra T.A., Zmuda A.J. Precipitating energetic electrons as an ionization source in the mid-latitude nighttime D region // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 34. P. 7161–7167.
- Leyser T.B., Thide B., Derblom H. et al. Dependence of stimulated electromagnetic emission on the ionosphere and pump wave // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. № A10. P. 17233–17244.
- Horne R.B., Lam M.M., Green J.C. Energetic electron precipitation from the outer radiation belt during electromagnetic storms // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Is. 19. <https://doi.org/10.1029/2009GL040236>
- Васьков В.В., Беляев П.П., Бутько Н.И. и др. Формирование ОНЧ-каналов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы // Геомагнетизм и Аэрномия. 1993. Т. 33. № 6. С. 91–96.
- Васьков В.В., Бутько Н.И., Гдалевич Г.Л. и др. Обнаружение на спутнике “Интеркосмос-24” ОНЧ- и КНЧ-волн, возбуждаемых в ионосфере мощным КВ-радиоизлучением стелла СУРА // Геомагнетизм и Аэрномия. 1995. Т. 35. № 1. С. 98–106.
- Костин В.М., Романовский Ю.А., Чмырев В.М. и др. Спутниковые исследования возмущений внешней ионосферы при воздействии мощных КВ-радиоволн на F-область ионосферы // Космич. исслед. 1993. Т. 31. № 1. С. 84–92.
- Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионо-

- сферы Земли при модификации F_2 -области мощным КВ радиоизлучением стелла СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 3. С. 198–222.
29. Вассков В.В., Комраков Г.П., Рябова Н.А. Тепловые возмущения околоземной плазмы, создаваемые мощным радиоизлучением комплекса СУРА // Геомагнетизм и Аэронавигация. 1995. Т. 35. № 5. С. 75–82.
 30. Borisov N.D. Transformation of VLF electrostatic waves into whistlers under the action of strong HF radio waves // Phys. Lett. 1995. V. 206. Is. 3–4. P. 240–246.
 31. Eliasson B., Papadopoulos K. Numerical study of mode conversion between lower hybrid and whistler waves on short-scale density striations // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A093315. <https://doi.org/10.1029/2008JA013261>
 32. Vartanyan A., Milikh G.M., Eliasson B. et al. Generation of whistler waves by continuous HF heating of the upper ionosphere // Radio Sci. 2016. V. 51. P. 1188–1198. <https://doi.org/10.1002/2015RS005892>
 33. Camporeale E., Delzanno G.L., Colestock P. Lower hybrid to whistler mode conversion on a density striation // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. A10315. <https://doi.org/10.1029/2012JA017726>
 34. Helliwell R.A. Controlled VLF wave injection experiments in the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1974. V. 15. P. 781–802.
 35. Imhof W.L., Reagan J.B., Voss H.D. et al. Direct observation of radiation belt electrons precipitated by the controlled injection of VLF signals from a ground-based transmitter // Geophys. Res. Lett. 1983. V. 10. № 4. P. 361–364.
 36. Gamble R.J., Rodger C.J., Clilverd M.A. et al. Radiation belt electron precipitation by man-made VLF transmissions // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № A10. P. A10211. <https://doi.org/10.1029/2008JA013369>
 37. Kulkarni P., Inan U.S., Bell T.F., Bortnik J. Precipitation signatures of ground-based VLF transmitters // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A07214. <https://doi.org/10.1029/2007JA012569>
 38. Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С. и др. Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. № 4. С. 229–232.
 39. Беляев П.П., Котик Д.С., Мутяков С.Н. и др. Генерация электромагнитных сигналов комбинационных частот в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 2. С. 248–267.
 40. Stubbe P. Review of ionospheric modification experiments at Tromsø // J. Atmosph. Terrest. Phys. 1996. V. 58. № 1–4. P. 349–368.
 41. Platino M., Inan U.S., Bell T.F. et al. DEMETER observations of ELF waves injected with the HAARP HF transmitter // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L16101. <https://doi.org/10.1029/2006GL026462>
 42. Куликов Ю.Ю., Григорьев Г.И., Красильников А.А., Фролов В.Л. Вариации микроволнового излучения мезосферы при нагреве ионосферы мощными короткими радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 4. С. 57–65.
 43. Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И. и др. Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2013. Т. 53. № 1. С. 102–109.
 44. Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л. Влияние искусственно возмущенной ионосферы на мезосферный озон // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 11. С. 26–30.
 45. Sinnhuber M., Funke B. Energetic electron precipitation into the atmosphere. The dynamic Loss of Earth's radiation Belts. Amsterdam: Elsevier, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813371-2/00009-3/>
 46. Andersson M.E., Verronen P.T., Rodger C.J. et al. Missing driver in the Sun-Earth connection from energetic electron precipitation impacts mesospheric ozone // Nature Communications. 2014. V. 5. Article number 5197. <https://doi.org/10.1038/ncomms6197>
 47. Pickett H.M., Read W.G., Lee K.K., Yung Y.L. Observation of night OH in the mesosphere. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L19808. <https://doi.org/10.1029/2006GL026910>
 48. Pickett H.M., Drouin B.J., Canty T. et al. Validation of Aurora microwave limb sounder OH and H₂O measurements // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. D16S30. <https://doi.org/10.1029/2007JD008775>
 49. Verronen P.T., Rodger C.J., Clilverd M.A., Wang S. First evidence of mesospheric hydroxyl response to electron precipitation from the radiation belts // JGR. 2011. V. 116. P. D07307. <https://doi.org/10.1029/2010JD014965>
 50. Троицкий А.В., Фролов В.Л., Востоков А.В., Ракуть И.В. Радиоизлучение ридберговских атомов верхней атмосферы при ее модификации мощными КВ радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 10. С. 759–768.
 51. Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стародубцев А.М. Спорадическое радиоизлучение околоземной среды на сантиметровых и дециметровых волнах // ДАН СССР. 1973. Т. 212. № 3. С. 607–610.
 52. Авакян С.В., Серова А.Е., Воронин Н.А. Роль ридберговских атомов и молекул в верхней атмосфере // Геомагнетизм и Аэронавигация. 1997. Т. 37. № 3. С. 99–106.
 53. Авакян С.В., Воронин Н.А. О возможном физическом механизме воздействия солнечной и геомагнитной активности на явления в нижней атмосфере // Исследование Земли из космоса. 2007. № 2. С. 28–33.
 54. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Барабаш В.В. Аперриодические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере. Результаты ионозондовых наблюдений // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 2. С. 110–128.
 55. Utlaut W.F., Violette E.J. A summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modification // Radio Sci. 1974. V. 9. № 1. P. 895–903.
 56. Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A. et al. Anthropogenic Space Weather // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. P. 985–1039. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0357-5>
 57. Leyser T.B., Wong A.Y. Powerful electromagnetic waves for active environmental research in geospace // Reviews of geophysics. 2009. V. 47. P. RG1001. <https://doi.org/10.1029/2007RG000235>
 58. Parrot M., Zaslavski Y. Physical mechanisms of man-made influences on the magnetosphere // Surveys in Geophysics. 1996. V. 17. P. 67–100.