

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА СТЕНДЕ АРЕСИБО В 2018 Г. ПРИ КВАЗИНПЕРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.Р. Хашев, С.М. Грач, А.В. Шиндин

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603022, г. Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23

E-mail: unn@unn.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований высокочастотной искусственной ионосферной турбулентности на низкоширотном нагревном стенде в обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико, США) 7-8 ноября 2018 г. с помощью радара некогерентного рассеяния, использовавшегося для измерений плазменной линии (ПЛ), и измерений искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ).

Ключевые слова: мощные радиоволны, радар некогерентного рассеяния, плазменная линия, ИРИ

SPATIO-TEMPORAL BEHAVIOR OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC TURBULENCE IN THE ARECIBO EXPERIMENT IN 2018 UNDER QUASI-CONTINUOUS HF PUMPING

V.R. Khashev, S.M. Grach, A.V. Shindin

Abstract. The article presents the results of studies of high-frequency artificial ionospheric turbulence at the low-latitude heating facility in the Arecibo Observatory (Puerto Rico, USA) on November 7-8, 2018, using an incoherent scatter radar used to measure the plasma line (PL) and stimulated electromagnetic emission of the ionosphere (SEE).

Keywords: powerful radio waves, incoherent scatter radar, plasma line, artificial ionospheric radio emission

Введение

С начала 70-х годов XX века на специализированных нагревных стендах проводятся эксперименты по исследованию возмущений ионосферной плазмы, возникающих в поле мощных коротких волн.

Один из способов диагностики искусственных возмущений ионосферной плазмы – это исследования с помощью радаров некогерентного рассеяния. Исследования плазменных волн проводятся с частотами, близкими к частоте мощной волны (волны накачки, ВН) f_0 с помощью измерений рассеянных на них сигналов радара, т.н. плазменной линии (ПЛ). В радарных экспериментах на стендах Аресибо (Пуэрто-Рико), Тромсё (Норвегия), HAARP (Аляска). накоплен огромный материал, который в большинстве получил достаточно адекватную интерпретацию (см., например, обзор [1] и ссылки там).

Наряду с радарами некогерентного рассеяния для диагностики возмущенной области используются измерения искусственного радиоизлучения (ИРИ) – малой шумовой составляющей в спектре отраженных от ионосферы радиоволн с частотами, близкими к частоте мощной радиоволны f_0 . ИРИ обладает богатой спектральной структурой. Различные спектральные компоненты ИРИ обладают различной характерной динамикой поведения и позволяет исследовать процессы, приводящие к генерации искусственной плазменной турбулентности ([2,3] и ссылки там).

7–9 ноября 2018 г. на стенде Аресибо (Пуэрто-Рико, 18.33° с.ш., 66.45° з.д. магнитное наклонение 43.135°) группой сотрудников ННГУ была проведена серия экспериментов по одновременному исследованию сигналов ИРИ и сигналов радара некогерентного рассеяния. Результаты кратко представлены в настоящей работе.

Постановка эксперимента

В ходе эксперимента воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной (О) поляризации с эффективной мощностью излучения $P_s \approx 100$ МВт

вертикально вверх на частоте ВН $f_0 = 5095$ кГц. Излучение ВН осуществлялось в различных режимах для исследования формирования искусственной ионосферной турбулентности на разных стадиях её развития: короткие импульсы с большой скважностью (длительность импульса $\tau_u = 5\text{--}100$ мс, период следования $T_u = 2\text{--}20$ с, режим «холодного старта») для исследования процессов формирования ленгмюровской турбулентности и квазинепрерывный нагрев ($\tau_u = 165$ мс, $T_u = 200$ мс) с длительностью посылок 1-150 секунд и одновременным зондированием диагностическими импульсами ($\tau_u = 0.2\text{--}10$ мс, $T_u = 0.2\text{--}1$ с) для исследования процессов перехода от ленгмюровской к верхнегибридной турбулентности плазмы. Радар некогерентного рассеяния излучал импульсы длительностью $\tau_p=440$ мкс с нулевой секунды каждой минуты, модулированные псевдослучайной последовательностью, с периодом следования $T_p=10$ мс на частоте $f_p = 430$ МГц. Задержки импульсов радара относительно включения волны накачки (ВН) варьировались от 2,2 мс до 7,8 мс, что позволило исследовать эволюцию рассеянного на плазменной турбулентности сигнала на разных стадиях ее развития.

Режим холодного старта

Анализ режима холодного старта был рассмотрен в работе [4]. Однако проведенный нами более детальный анализ выявил существенную динамику ионосферы в течение всего цикла нагрева для 10- и 20-минутных программ, что потребовало дополнительной обработки экспериментальных данных. В результате получены следующие принципиально важные результаты [5]: 1) Установлено, что область генерации плазменных волн расширяется вниз от уровня отражения волны накачки (ВН), причем масштаб расширения составляет от 600 м для 2.2 мс воздействия до 1500 м для 100 мс 2) Обнаружено, что спектры распадного типа формируются уже на 2 мс воздействия, локализуясь на 450–600 м ниже точки отражения с первым максимумом на $\Delta f \approx -2,5$ кГц. При этом в области отражения в этот же момент наблюдаются спектры типа continuum. К 4 мс воздействия распадный спектр плазменной линии становится доминирующим практически на всех высотах её генерации. 3) Зафиксирована нелинейная динамика интенсивности: максимальные значения интенсивности ПЛ наблюдаются на 2 мс воздействия при переходе от спектров типа continuum к каскадным. После первоначального снижения интенсивности ПЛ отмечается её рост до 2-3 с воздействия с последующим постепенным уменьшением.

Режим квазинепрерывного воздействия

Начиная с $t \geq 0.1$ с в спектре ПЛ заметно выделяется второй максимум на отстройке $\Delta f \approx -(10\text{--}12)$ кГц, область генерации которого может протягиваться ниже генерации первого максимума на $\Delta f \approx -2,5$ кГц. Ширина спектра ПЛ растет на высотах максимальной интенсивности от 20 – 25 кГц (при 4,2 мс) до ~40 кГц.

При дальнейшем увеличении длительности нагрева до секунд и минут область плазменной турбулентности расширяется вниз от области отражения ВН h_0 вплоть до высот верхнегибридного резонанса $h_{\text{ВГР}}$ и ниже.

Исследования пространственно-временной динамики DPL в течение 15 секунд квазинепрерывного нагрева для 30-ти минутных циклов воздействия показали, что для каждой секунды нагрева (усреднение по 80-ти импульсам радара) на первой секунде наблюдается генерация самого интенсивного спектра плазменных волн распадного типа с максимумом на отстройке $\Delta f_{\text{pl}} = f_{\text{pl}} - f_0 = -4$ кГц в области отражения ВН (h_0). Затем, на 2-15 секундах воздействия, интенсивность спектров вблизи h_0 уменьшается, но наблюдается генерация всё более интенсивных широкополосных спектров плазменной линии с максимумом на отстройках $\Delta f_{\text{pl}} = f_{\text{pl}} - f_0 = -10$ кГц на высотах, близких к высотам верхнегибридного резонанса $h_{\text{ВГР}}$, на 3-4 км ниже области отражения ВН h_0 . Подобная картина качественно повторялась для всех тридцати циклов воздействия в течение времени 17:15-17:45 LT, пример спектрограмм для первого цикла нагрева приведен на рис. 1. От сеанса к сеансу наблюдался рост абсолютных значений высот области отражения ВН от $h_0 = 208$ км (рис. 1) до $h_0 = 214$ км, связанный с суточным ростом высот ионосферы при переходе к более поздним часам наблюдений. Примеры спектров DPL для последнего минутного цикла воздействия приведены на рис. 2 для 1-й, 10-й и 29-й секундах излучения ВН (верхние панели). На нижних панелях приведены зарегистрированные одновременно спектры ИРИ.

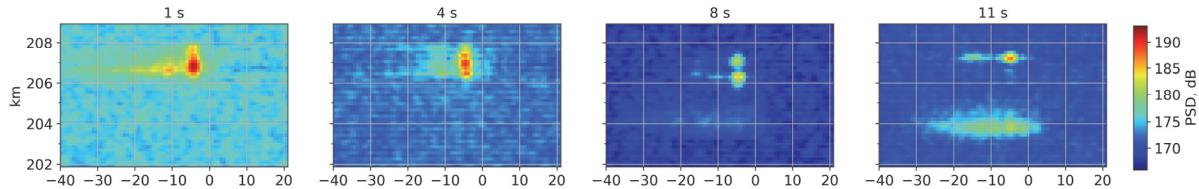


Рис. 1. Пространственно-временная динамика сдвинутой вниз искусственной плазменной линии (DPL) в течение 15 секунд 1-го цикла воздействия. Данные усреднены по 80 импульсам радара в течение каждой секунды нагрева. Ось ординат – высотный интервал 202–209 км

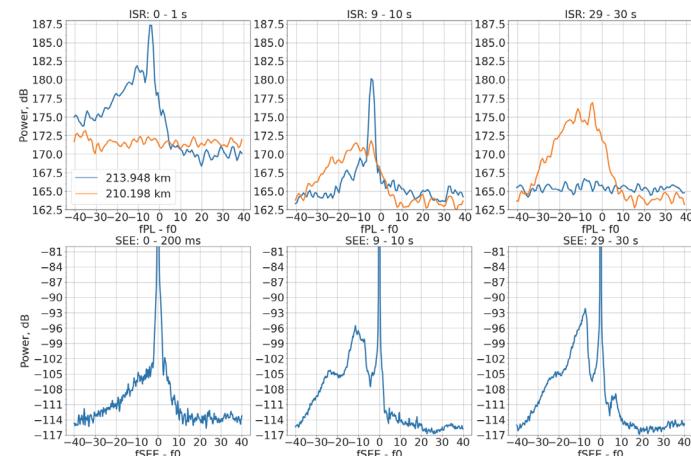


Рис. 2. Пример пространственно-временной динамики развития спектров сдвинутой вниз ПЛ (верхний ряд) и динамика спектров ИРИ (SEE) на 0-1, 9-10 и 29-30 секундах (нижний ряд) квазинепрерывного нагрева, для квазинепрерывного режима излучения. Видно последовательное развитие DM ($\Delta f = -11$ кГц), 2DM и, через 10-20 с, IDM ($\Delta f = -8$ кГц) и UM ($\Delta f = +8$ кГц) компонент ИРИ

Отметим, что область генерации плазменных волн в области отражения ВН к 30-й секунде воздействия экранируется генерацией плазменных волн в области более низких высот (рис. 2, верхняя правая панель). В нижней части области турбулентности (в области высот верхнегибридного резонанса и ниже) наблюдалось усиление ПЛ к 10-15 секунде нагрева и дальнейший рост интенсивности ПЛ к 30 секунде. Спектры при этом приобретали вид широкополосных максимумов в полосе $(-40\dots+10)$ кГц с пиковой интенсивностью на отстройке $\Delta f \approx - (10\dots12)$ кГц, оранжевые линии рис. 2, и более слабым максимумом на $\Delta f \approx - (21\dots25)$ кГц (рис. 2, верхняя средняя панель). При этом, в первые секунды воздействия сигнал с высоты $h \sim 210.2$ км $\sim h_{\text{ВГР}}$ не наблюдался.

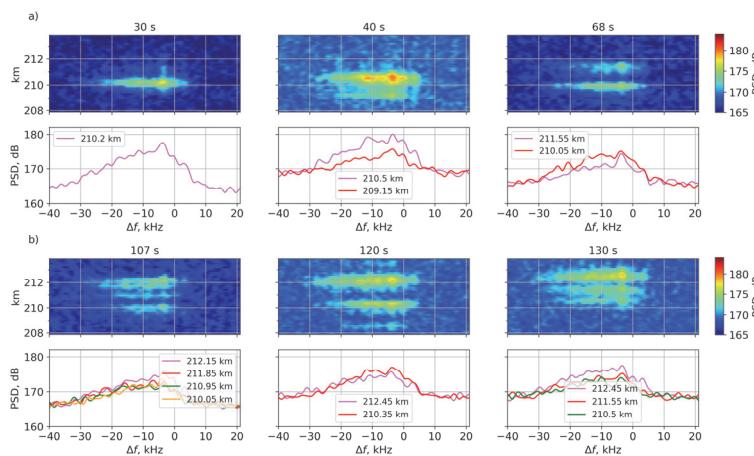


Рис. 3

На рис. 3 представлены спектры ПЛ на 30–130 с воздействия, усреднение производилось за 1 секунду нагрева. Наблюдается подъём верхнего слоя генерации ПЛ, что связано с восходящим движением профиля электронной концентрации.

При увеличении длительности воздействия свыше 40 секунд наблюдается качественное изменение пространственной структуры возмущенной области, которое характеризуется:

1) Расширением высотного диапазона генерации плазменных волн с выраженной стратификацией в области верхнегибридного резонанса (ВГР). Пространственная структура характеризуется: а) формированием дискретных слоев генерации ПЛ, б) межслойным расстоянием 1-1.5 км, в) прогрессирующим увеличением межслойных промежутков с течением времени; 2) Изменением спектральных характеристик: а) снижение интенсивности спектральных компонент ПЛ при стратификации, б) размытие характерного максимума в спектре ПЛ при отстройке $\Delta f \approx -(10-12)$ кГц, в) сохранение стационарного характера спектров ИРИ; 3) Отсутствие явной корреляционной связи между динамикой спектральных характеристик ИРИ и ПЛ.

Сопоставление результатов измерений плазменной линии и искусственного радиоизлучения ионосферы

Следует отметить, что прямого совпадения спектров ИРИ и спектров плазменной линии ожидать не следует, поскольку плазменная линия является продуктом рассеяния сигнала радара на плазменных волнах с единственным выделенным волновым вектором (условие синхронизма, $\mathbf{k}_{sc} = \mathbf{k}_r \pm \mathbf{k}_{pl}$) с определённого интервала высот, определяемого выбранным временем задержки. Спектральная плотность ИРИ, в свою очередь, представляет собой интенсивность сигнала, проинтегрированную по всем волновым векторам и высотам, где возбуждаются плазменные волны на определённой частоте. Тем не менее наши измерения плазменной линии и ИРИ показывают подобие основных характеристик спектров плазменной линии и ИРИ вплоть до 40 секунды воздействия: 1) приблизительно одинаковая ширина спектров плазменной линии и ИРИ (до 30–40 кГц) и форма спектров типа «continuum» на начальной стадии воздействия; 2) формирование в спектре ИРИ основных его «верхнегибридных» компонент, таких, как главный спектральный максимум (Downshifted Maximum, DM) на отстройках $\Delta f_{DM} = f_{DM} - f_0 \approx (8 \dots 11)$ кГц и компоненты 2DM на отстройках $\Delta f_{2DM} \approx -(21 \dots 27)$ кГц [2,3], со 2-й до 10-й секунды воздействия коррелирует с наблюдаемыми характеристиками развития широкополосного максимума плазменной линии в нижней части области плазменной турбулентности вплоть до положения спектральный максимумов; 3) Появление промежуточного спектрального максимума ИРИ (Intermediate Downshifted Maximum, IDM) на $\Delta f_{IDM} \approx -7$ кГц [3] и увеличение его интенсивности со временем (с 15-й по 30-ю секунды) не показывает явной корреляции со свойствами максимумов в спектре плазменной линии. Здесь требуется более детальный анализ данных эксперимента.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-72-20019)

Список литературы

1. Djuth F.T., DuBois D.F. Temporal Development of HF-Excited Langmuir and Ion Turbulence at Arecibo // Earth Moon Planets. – 2015. – Vol. 116. – P. 19. <https://doi.org/10.1007/s11038-015-9458-x>.
2. Leyser Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma // Space Sci. Rev. – 2001. – Vol. 98. – 223–328. <https://doi.org/10.1023/A:1013875603938>.
3. Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В., Шиндин А.В., Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – № 11. – С. 1189–1227. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037868>.
4. Hashev V.R., Shindin A.V., Sergeev E.N., Grach S.M., Nossa E., Sulzer M.P. Results of Artificial Ionospheric Turbulence Studies Using the ISR and SEE Techniques at the Arecibo

- Low-Latitude Heating Facility // IEEE Xplore: 2020 XXXIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. Publisher: IEEE, 2020. – Р. 9232319.
5. Хашев В.Р., Грач С.М., Шиндин А.В., Сергеев Е.Н., Пространственно-временное поведение плазменной линии и временной ход искусственного радиоизлучения ионосферы в эксперименте 2018 года на нагревном стенде аресибо. 1. Первые пять секунд воздействия // Радиофизика. – 2025. – Т. 68. – № 1. – С. 1–17.