

УДК: 533.951+537.868+551.510.535

DOI: 10.26907/rwp29.2025.640-644

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА СТЕНДЕ АРЕСИБО В 2018 Г. ПРИ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОМ 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 радарными 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  $P_e \approx 100$  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  $\tau_{\text{и}} = 5-100$  мс, период следования  $T_{\text{и}} = 2-20$  с, режим «холодного старта») для исследования процессов формирования ленгмюровской турбулентности и квазинепрерывный нагрев ( $\tau_{\text{и}} = 165$  мс,  $T_{\text{и}} = 200$  мс) с длительностью посылок 1-150 секунд и одновременным зондированием диагностическими импульсами ( $\tau_{\text{и}} = 0.2-10$  мс,  $T_{\text{и}} = 0.2-1$  с) для исследования процессов перехода от ленгмюровской к верхнегибридной турбулентности плазмы. Радар некогерентного рассеяния излучал импульсы длительностью  $\tau_{\text{р}}=440$  мкс с нулевой секунды каждой минуты, модулированные псевдослучайной последовательностью, с периодом следования  $T_{\text{р}}=10$  мс на частоте  $f_{\text{р}} = 430$  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  $\Delta f \approx -(10-12)$  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  $\Delta f_{\text{р1}} = f_{\text{р1}} - f_0 = -4$  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  $\Delta f_{\text{р1}} = f_{\text{р1}} - f_0 = -10$  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.

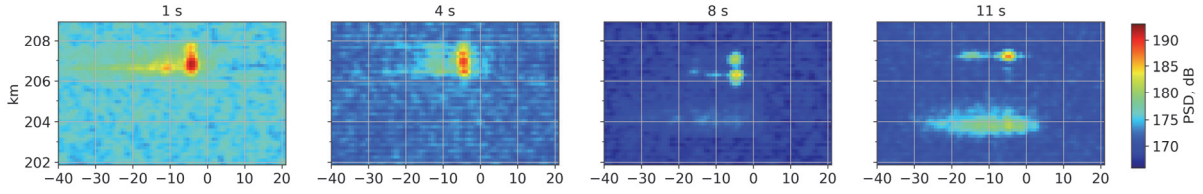


Рис. 1. Пространственно-временная динамика сдвинутой вниз искусственной плазменной линии (DPL) в течение 15 секунд 1-го цикла воздействия. Данные усреднены по 80 импульсам радара в течение каждой секунды нагрева. Ось ординат – высотный интервал 202–209 км

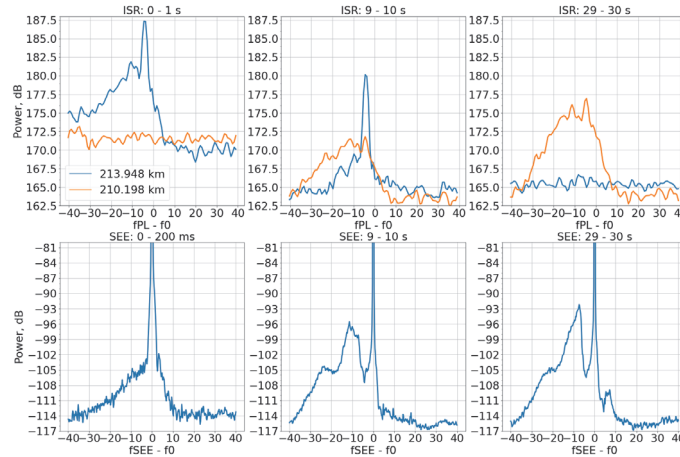


Рис. 2. Пример пространственно-временной динамики развития спектров сдвинутой вниз ПЛ (верхний ряд) и динамика спектров ИРИ (SEE) на 0-1, 9-10 и 29-30 секундах (нижний ряд) квазинепрерывного нагрева, для квазинепрерывного режима излучения. Видно последовательное развитие DM ( $\Delta f = -11$  кГц), 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  $(-40...+10)$  кГц с пиковой интенсивностью на отстройке  $\Delta f \approx - (10-12)$  кГц, оранжевые линии рис. 2, и более слабым максимумом на  $\Delta f \approx - (21-25)$  кГц (рис. 2, верхняя средняя панель). При этом, в первые секунды воздействия сигнал с высоты  $h \sim 210.2$  км  $\sim h_{ВГР}$  не наблюдался.

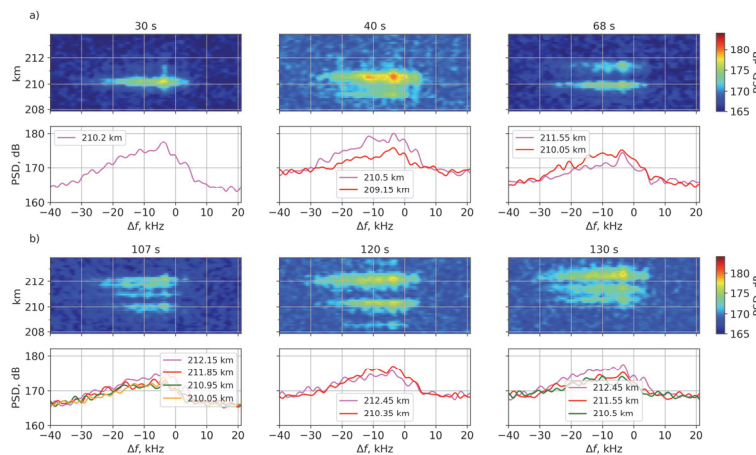


Рис. 3

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 секунд 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 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. Publisher: IEEE, 2020. – P. 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.