

УДК 533.951

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА НАГРЕВНОМ СТЕНДЕ АРЕСИБО В 2018 Г.

В.Р. Хашев<sup>1</sup>, С.М. Грач<sup>1</sup>, А.В. Шиндин<sup>1</sup>, Е. Носса<sup>2</sup>, М.П. Сулзер<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ), Нижний Новгород, Россия  
xashev2013@gmail.com

<sup>2</sup>Naval Research Laboratory, Wash., DC, USA

<sup>3</sup>National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo, USA

## SPATIO-TEMPORAL EVOLUTION OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC TURBULENCE ACCORDING TO THE ARECIBO HEATING EXPERIMENT IN 2018

V.R. Hashev<sup>1</sup>, S.M. Grach<sup>1</sup>, A.V. Shindin<sup>1</sup>, E. Nossa<sup>2</sup>, M.P. Sulzer<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russia  
xashev2013@gmail.com

<sup>2</sup>Naval Research Laboratory, Wash., DC, USA

<sup>3</sup>National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo, USA.

**Аннотация.** Представлен анализ данных экспериментов, выполненных при различных режимах воздействия КВ-радиоизлучения нагревного стенда Аресибо (Пуэрто-Рико, США) на F-слой ионосферы. В экспериментах исследовались сигналы некогерентного радара, рассеянные на ленгмюровских волнах (плазменная линия), и сигналы искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ).

**Ключевые слова:** Аресибо, радар некогерентного рассеяния, плазменная линия

**Abstract.** Data analysis of the experiments on the HF-pumping of the ionosphere at the Arecibo heating facility (Puerto Rico, USA) for different pumping modes is presented. In the experiments, the signals of an incoherent radar scattered on Langmuir waves (plasma line) and signals of stimulated electromagnetic emission were studied.

**Keywords:** Arecibo, incoherent scatter radar, plasma line

### ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены результаты исследований искусственной ионосферной турбулентности на низкоширотном нагревном стенде (угол наклона геомагнитного поля к вертикали  $\approx 40^\circ$ ) в обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико, США) 7–8 ноября 2018 г. с помощью радара некогерентного рассеяния. Одновременно проводились измерения искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной (О) поляризации с эффективной мощностью излучения  $P_e \approx 100$  МВт вертикально вверх на частоте волны накачки (ВН)  $f_{\text{ВН}} = 5095$  кГц. Излучение ВН осуществлялось в различных режимах для исследования формирования искусственной ионосферной турбулентности на разных стадиях ее развития: короткие импульсы с большой скважностью ( $\tau_n = 5\text{--}100$  мс,  $T_n = 2\text{--}20$  с, режим «холодного старта») для исследования процессов формирования ленгмюровской турбулентности; квазинепрерывный нагрев ( $\tau_n = 165$  мс,  $T_n = 200$  мс) с длительностью посылок 15 и 150 с. Для диагностики динамики искусственной плазменной линии радар некогерентного рассеяния излучал импульсы длительностью 440 мкс с нулевой секунды каждой минуты, модулированные псевдослучайной последовательностью, с периодом следования 10 мс на частоте  $f_p = 430$  МГц. Методика проведения эксперимента и анализа данных описана в работах [Sulzer, 1986; Hashev et al., 2020].

### Короткие импульсы, режим «холодного старта»

На стадии развития искусственной плазменной турбулентности обнаружено, что максимальная ин-

тенсивность в спектре плазменной линии и, соответственно, плазменных волн наблюдается на нулевых отстройках от  $f_{\text{ВН}}$  уже ко 2–6-й мс воздействия, а сами спектры имеют форму типа continuum в области отрицательных отстроек от  $f_{\text{ВН}}$  на высотах вблизи уровня отражения ВН.

С увеличением длительности нагрева до 12–20 мс на более низких высотах, а затем и на высотах вблизи уровня отражения ВН, для плазменной линии начинают наблюдаться спектры распадного типа с выраженными максимумами интенсивности (спутниками) на отстройках  $\Delta f = f_{\text{пл}} - f_{\text{ВН}} \approx -(2.5 \dots 12)$  кГц, а интервал высот, занимаемый областью генерации плазменных волн, возрастает от 1 км для 5–10 мс воздействия до 2.5 км для 100 мс воздействия.

### Квазинепрерывный нагрев

При дальнейшем увеличении длительности нагрева до секунд и минут область плазменной турбулентности расширяется вниз от уровня отражения ВН ( $h_0$ ) вплоть до высот верхнегибридного резонанса ( $h_{\text{ВГР}}$ ) и ниже. Обработка ионограмм, полученных перед сеансом нагрева, показывает, что  $h_{\text{ВГР}}$ , где локальная плазменная частота на  $\sim 80$  кГц ниже частоты ВН, лежит на 3–4 км ниже  $h_0$ .

При этом область генерации плазменных волн вблизи  $h_0$  к 30-й секунде нагрева практически полностью экранируется. С увеличением длительности нагрева более 40 с наблюдалось дальнейшее расширение высотной области генерации плазменных волн до 3–5 км (вплоть до 10 км при воздействии вблизи критической частоты слоя F2) и ее стратификация.

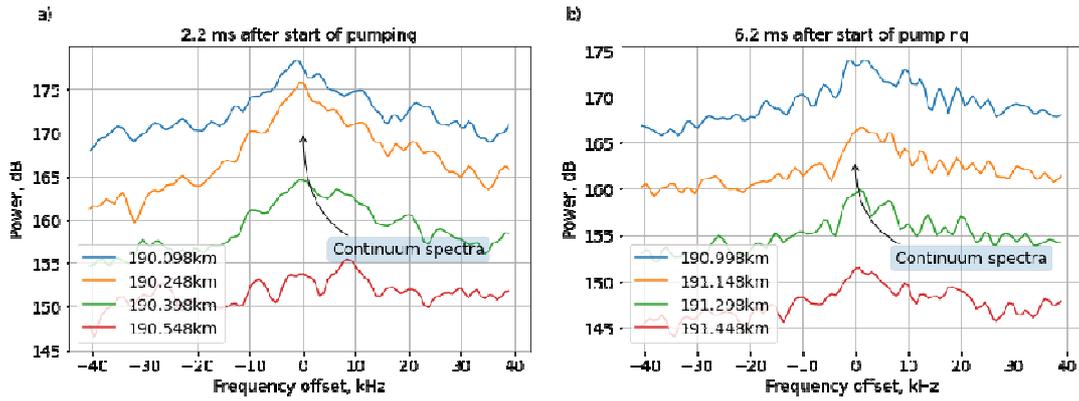


Рис. 1. Спектры сдвинутой вниз плазменной линии на высотах вблизи точки отражения ВН на 2.2 мс (панель *a*) и на 6.2 мс (панель *b*) после начала воздействия. Проведено усреднение по 50–55 импульсам ВН. Для построения использован дополнительный сдвиг на 7 дБ каждого из спектров

Высотно-временная динамика развития наиболее интенсивных спектров сдвинутой вниз плазменной линии на первых 30 секундах квазинепрерывного нагрева приведена на рис. 2 (верхний ряд). В демонстрируемых измерениях наблюдалось две области генерации плазменной турбулентности с максимальной интенсивностью плазменной линии на высотах  $h \sim 214$  и  $\sim 210.2$  км. В верхней части области турбулентности вблизи области отражения ВН наблюдались спектры распадного типа с максимальной интенсивностью на 1–2 секунды нагрева и уменьшающиеся по интенсивности к 10–15 секундам воздействия. В нижней части области турбулентности (в области высот верхнегибридного резонанса и ниже) наблюдалось усиление плазменной линии к 10–15 секундам нагрева и дальнейший рост

интенсивности плазменной линии к 30-й секунде. Спектры при этом приобретали вид широкополосных максимумов в полосе  $(-40 \dots +10)$  кГц с пиковой интенсивностью на отстройке  $\Delta f \approx -10$  кГц и более слабым максимумом на  $\Delta f \approx -(21 \dots 25)$  кГц. При этом в первые секунды воздействия сигнал с высоты  $h \sim 210.2$  км не наблюдался, а к 30-й секунде пропал сигнал с высоты отражения  $h_0$ .

При анализе данных зондирования плазменной турбулентности с помощью радара некогерентного рассеяния проводилось их сопоставление с результатами измерений искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Примеры спектров ИРИ на начальной стадии воздействия и при длинном нагреве приведены на рис. 2 (нижний ряд).

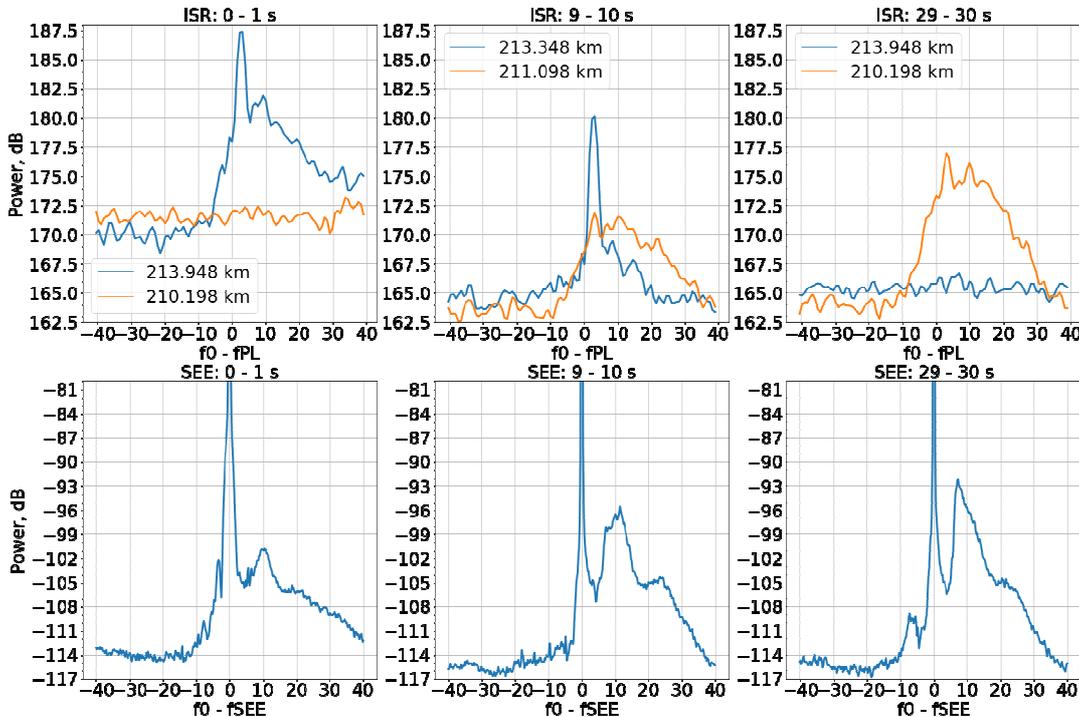


Рис. 2. Пространственно-временная динамика наиболее интенсивных спектров сдвинутой вниз плазменной линии на 0–1, 9–10 и 29–30 секундах квазинепрерывного нагрева (верхний ряд панелей), и динамика спектров ИРИ (SEE) для квазинепрерывного режима излучения (нижний ряд панелей). Хорошо видно последовательное развитие DM ( $\Delta f = -11$  кГц), 2DM компонент ИРИ и, через 10–20 с, IDM ( $\Delta f = -8$  кГц) и UM ( $\Delta f = +8$  кГц) компонент

Наши измерения плазменной линии и ИРИ показывают подобие основных характеристик спектров плазменной линии и ИРИ (ширины до 30–40 кГц и формы спектров типа continuum) на стадии развития ленгмюровской турбулентности в первые 100 мс. При более длинном квазинепрерывном нагреве формирование в спектре ИРИ основной его верхнегибридной компоненты, такой как главный спектральный максимум (Downshifted Maximum, DM) на отстройках  $\Delta f_{DM} = f_{DM} - f_{ВН} \approx -(8...11)$  кГц, коррелирует с наблюдаемыми характеристиками развития широкополосного максимума плазменной линии в нижней части области плазменной турбулентности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа данных по пространственно-временной динамике искусственной плазменной линии в экспериментах на нагревном стенде в Аресибо установлено следующее:

1. На стадии развития искусственной плазменной турбулентности максимальная интенсивность в спектре плазменной линии и, соответственно, плазменных волн наблюдается на нулевых отстройках от  $f_0$  уже ко 2-6-й мс воздействия, а сами спектры имеют форму типа continuum.

2. С увеличением времени воздействия область генерации расширяется вниз от области отражения ВН на 2–3 км при длительности воздействия до 100 мс и вплоть до 10 км при увеличении длительности воздействия до секунд и минут;

3. Наблюдается стабильно две области генерации искусственной плазменной линии. Вблизи уровня отражения с первых миллисекунд до нескольких секунд наблюдаются спектры распадного типа с максимумами на отстройках 0, –4 кГц, связанными с развитием здесь ленгмюровской турбулентности (волновые вектора плазменных волн вдоль магнитного поля с последующей изотропизацией углового спектра, что делает их доступными для наблюдения), и на 2–3 км ниже по высоте вблизи уровня верхнегибридного резонанса. Здесь плазменные волны ортогональны магнитному полю Земли, но также наблюдаются вследствие изотропизации их спектра. Наблюдаемые спектры плазменной линии качественно отличаются от ленгмюровских, обладая широкой формой типа continuum без резко выраженных максимумов;

4. Развитие верхнегибридной турбулентности плазменных волн приводит к экранировке генерации ленгмюровских волн через 15–30 с после включения волны накачки;

5. При дальнейшем увеличении времени нагрева (больше 40 с) может наблюдаться расслоение области генерации искусственной плазменной линии, хотя это утверждение требует проверки, поскольку здесь уже необходимо учитывать естественные вариации высот генерации плазменной линии и времени усреднения потока данных;

6. Сопоставление результатов наблюдений искусственной плазменной линии (для определенной длины волны плазменных волн) и искусственного радиоизлучения ионосферы (для интегрального процесса высвечивания плазменных волн) показывают качественное согласие структуры спектров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-12-00197.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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*. 2020. p. 9232319.

Sulzer M.P. A radar technique for high range resolution incoherent scatter autocorrelation function measurements utilizing the full average power of klystron radars. *Radio Sci.* 1986. Vol. 21, no. 6. P. 1033–1040.