

**Пространственно-временная динамика искусственной ионосферной турбулентности по данным радара некогерентного рассеяния и искусственного радиоизлучения ионосферы в эксперименте на нагревном стенде Аресибо в 2018 г.**

В.Р. Хашев, С.М. Грач, А.В. Шиндин.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*  
603022, г.Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23  
E-mail: [sgrach@rf.unn.ru](mailto:sgrach@rf.unn.ru)

*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). Воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной поляризации с эффективной мощностью излучения  $P_e \approx 100$  МВт вертикально вверх на частоте волны накачки (ВН)  $f_0 = 5095$  кГц для исследования формирования искусственной ионосферной турбулентности на разных стадиях её развития. Проведено сопоставление спектров и динамики ПЛ и ИРИ.*

*Ключевые слова: мощные радиоволны, радар некогерентного рассеяния, плазменная линия, искусственное радиоизлучение ионосферы*

**Spatio-temporal evolution of artificial ionospheric turbulence obtained from the data of incoherent scatter radar and stimulated electromagnetic emission of the ionosphere in the experiment at the Arecibo heating facility in 2018**

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

*Lobachevsky University of Nizhy Novgorod*

*The results of studies of high-frequency artificial ionospheric turbulence produced by the low-latitude heating facility at the Arecibo Observatory (Puerto Rico, USA) on November 7–8, 2018 using incoherent scatter radar measuring plasma line (PL) and measurements of stimulated (or secondary) electromagnetic emission of the ionosphere (SEE) are presented. The impact on the ionosphere was carried out by a powerful radio wave of ordinary polarization with an effective radiation power  $P_e \approx 100$  MW radiated vertically upwards at a pump wave (PW) frequency  $f_0 = 5095$  kHz for studying formation of artificial ionospheric turbulence at different stages of its development. A comparison is made between spectra and dynamics of PL and SEE.*

*Keywords: powerful radio waves, radar of incoherent scattering, plasma line, stimulated electromagnetic 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. Такие исследования проводятся на стендах Аресибо (Пуэрто-Рико) [1,2], Тромсё (Норвегия) [3], HAARP

(Аляска) [4]. Подобные исследования позволяют измерять различные параметры ионосферной плазмы, такие как электронная концентрация, температура электронов, скорости дрейфа и др. В частности, в этих экспериментах было обнаружено возбуждение ленгмюровских (плазменных) волн с частотами, близкими к частоте мощной волны (волны накачки, ВН)  $f_0$  и исследованы их свойства. Исследования плазменных волн проводятся с помощью измерений рассеянных на них сигналов радара, т.н. плазменной линии (ПЛ). В радарных экспериментах накоплен огромный материал, который в большинстве получил достаточно адекватную интерпретацию (см., например, обзор [1] и ссылки там).

Наряду с радарами некогерентного рассеяния используются и другие средства диагностики возмущенной области, например, измерения искусственного оптического свечения [4] и так называемого искусственного радиоизлучение (ИРИ) ионосферы. ИРИ – представляет собой малую шумовую составляющую в спектре отраженных от ионосферы радиоволн с частотами, близкими к частоте мощной радиоволны  $f_0$ . ИРИ (в английской терминологии *stimulated, or secondary electromagnetic emission, SEE*) возникает в результате трансформации плазменных волн, возбужденных ВН, в электромагнитные и обладает богатой спектральной структурой. Различные спектральные компоненты ИРИ обладают различной характерной динамикой поведения и позволяет исследовать процессы, приводящие к генерации искусственной плазменной турбулентности (см., например, обзоры [5,6] и ссылки там).

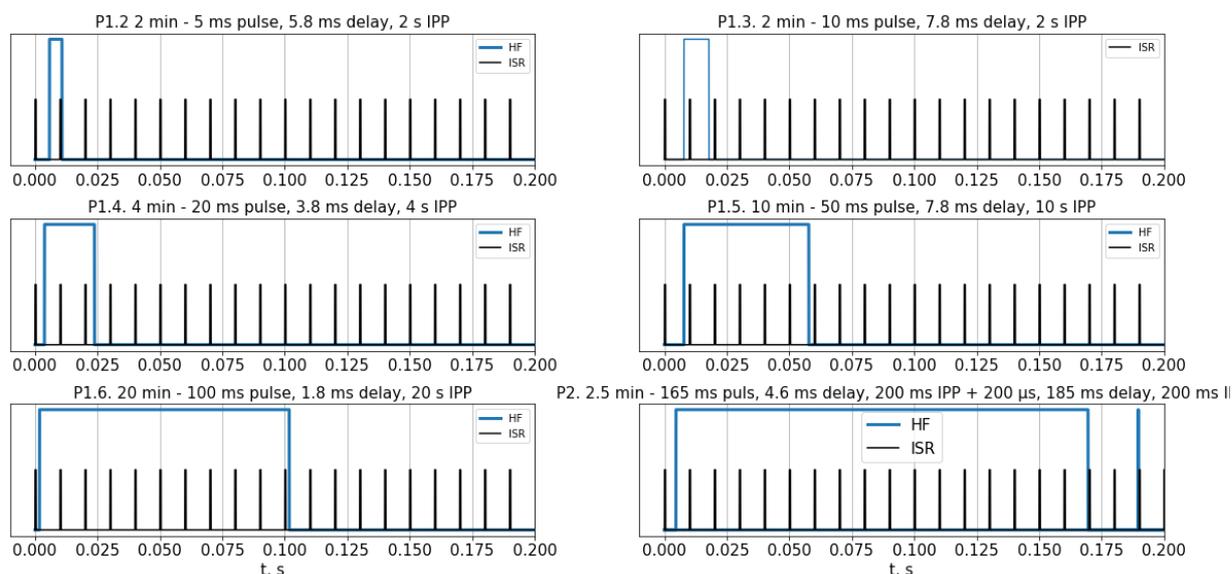
Первые и единственные до 2018 г. эксперименты по одновременным измерениям ИРИ и сигналов некогерентного рассеяния радара на низкоширотном нагревном стенде Аресибо были проведены достаточно давно, в 80-е гг. [7]. С тех пор техника и методика измерений шагнула достаточно далеко вперед. В связи с этим проведение совместных измерений ПЛ и ИРИ представляет несомненный интерес.

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 новая серия экспериментов по одновременному исследованию сигналов ИРИ и сигналов радара некогерентного рассеяния. В этих экспериментах регистрацию сигналов радара проводили работники стенда Аресибо, измерения ИРИ – сотрудники ННГУ, анализ данных измерений ПЛ и ИРИ также был проведен сотрудниками ННГУ. Результаты такого анализа кратко представлены в настоящей работе. Отметим, что часть представленных результатов изложена в работе [8].

### **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  $\tau_i = 5-100$  мс, период следования  $T_i = 2-20$  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 ( $\tau_n = 0.2-10$  мс,  $T_n = 0.2-1$  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. Программы режимов излучения ВН и радара некогерентного рассеяния показаны на рис. 1.

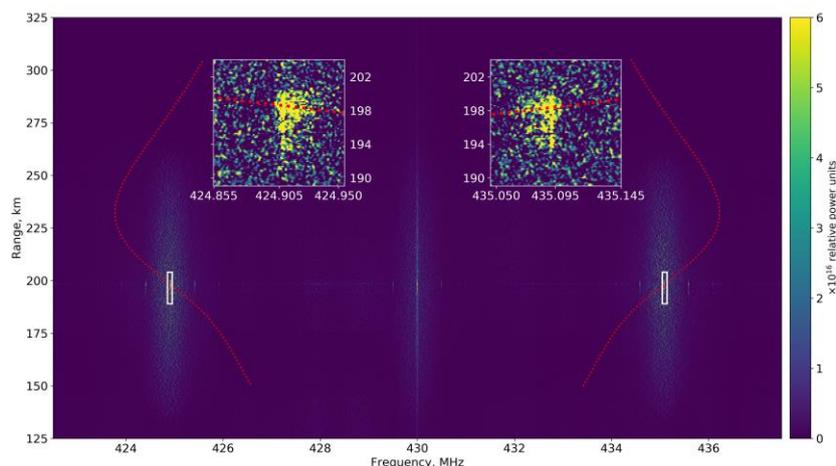


**Рис. 1. Схема режимов излучения нагревного стенда и радара некогерентного рассеяния. Импульсы радара изображены черным цветом, импульсы нагрева – синим. Режимы пронумерованы в заголовках для каждой программы. Программы P1.2-P1.6 соответствуют режимам излучения коротких импульсов (режимы «холодного старта»), программа P.2 соответствует квазинепрерывному нагреву.**

Схема излучения импульсов радара, модулированных псевдослучайной последовательностью, и методика анализа описаны в работе [2].

### Результаты эксперимента

Результатом анализа зарегистрированных рассеянных сигналов радара является массив, содержащий спектры рассеянного сигнала на высотах от 80 до 800 км с шагом 150 м. По полученным данным можно исследовать спектры рассеянного сигнала с фиксированных высот, либо представлять результаты обработки в виде спектрограмм. На рисунке 2 представлен пример спектрограммы, полученной для случая, когда на плазму осуществляется воздействие мощной радиоволной. На рисунке можно наблюдать сигналы искусственной плазменной линии на отстройках от частоты радара ( $f_p = 430$  МГц), равных примерно частоте ВН, и искусственной ионной линии, спектр которой сосредоточен вблизи частоты радара. Красным изображен профиль электронной концентрации, полученный после обработки сигналов радара в отсутствие излучения ВН. На отдельных панелях крупным планом представлены области генерации плазменных волн, инициированных ВН, вблизи её точки отражения. Спектры ПЛ построены для режима излучения коротких импульсов ВН (программа P1.6) относительно центральных частот  $f_{\pm} = f_p \pm f_0$  для сдвинутых вниз (-) и вверх (+) по отношению к  $f_p$  плазменных линий. При этом отстройка  $\Delta f_{\pm}$  частоты  $f$  рассеянного сигнала от центральной частоты  $\Delta f_{\pm} = f - f_{\pm}$  соответствует отстройке частоты плазменной волны  $f_{ПЛ}$  от  $f_0$ .



**Рис. 2. Профиль электронной концентрации и спектрограмма искусственных ионной (сигнал, рассеянный на ионном звуке) и плазменных линий (downshifted plasma line (–) – слева, upshifted plasma line (+) – справа на 98.2 мс воздействия). В отдельных панелях показана область генерации плазменной линии с высоким частотно-высотным разрешением.**

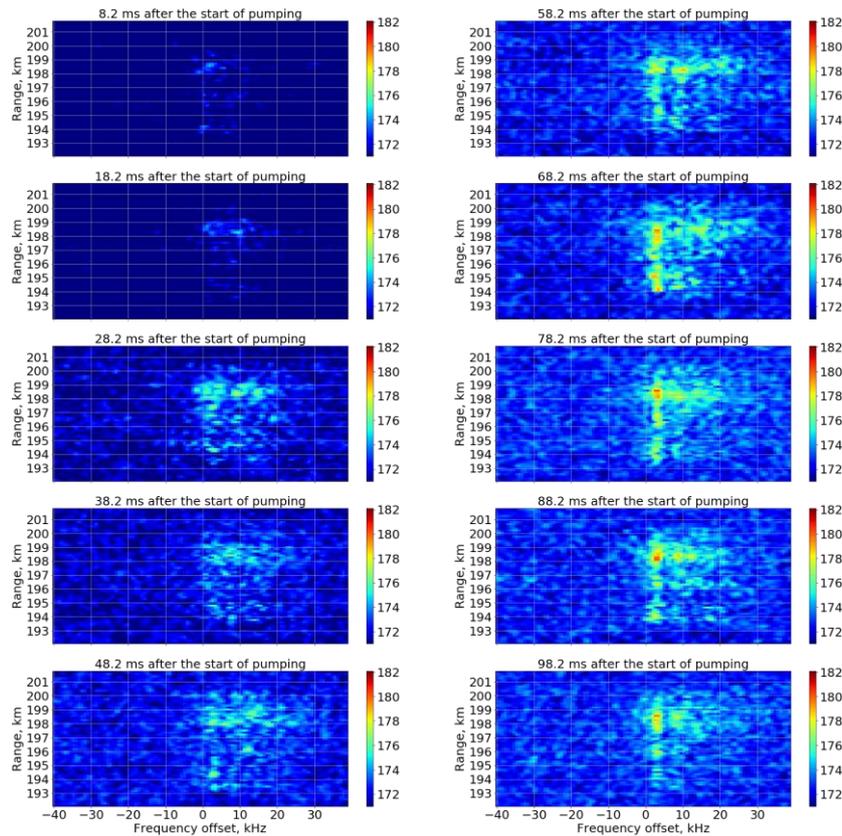
### Режим коротких импульсов

На рис. 3 представлена последовательность спектрограмм рассеянного сигнала для разных моментов времени относительно начала воздействия с шагом в 10 мс. В левом ряду сверху вниз представлены первые 50 мс воздействия ВН на ионосферу, в правом – следующие 50 мс. в режиме излучения по программе P1.6 (длительность импульса ВН  $\tau_{\text{и}} = 100$  мс, период следования  $T_{\text{и}} = 20$  с, задержка относительно импульсов радара  $\tau_d = 1,8$  мс, длительность 20 минут) с шагом в 10 мс, представляющие высотно-временную динамику DPL. Данные радара усреднены по 54 импульсам ВН.

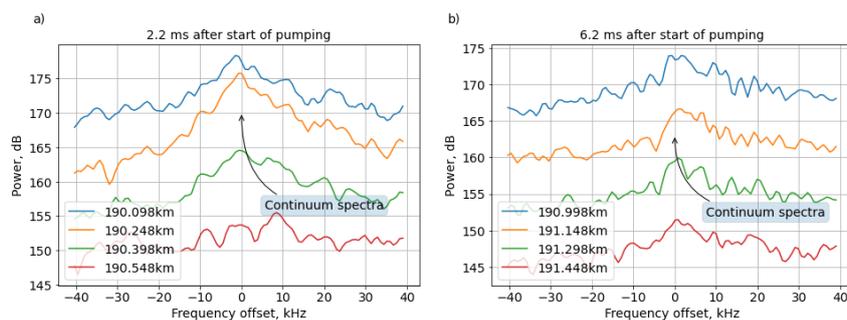
Из рис. 3, видно, что область генерации ПЛ формируется вблизи области отражения ВН (верхняя спектрограмма в левом столбце), и как она затем расширяется вниз от точки отражения ВН. На нижней спектрограмме в правом столбце можно видеть область генерации плазменных волн под конец воздействия импульса ВН, а именно на 98.2 мс с начала воздействия.

Для более детального рассмотрения динамики ПЛ (DPL) на разных высотах приведем примеры отдельных спектров. Пример спектров DPL на 2-6-й мс воздействия приведен на рисунке 4 (программы P1.3 и P1.4, усреднение по 50-55 импульсам). Видно, что 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», несколько смещенного (больше для меньших времён) в область отрицательных отстроек  $-\Delta f_- = f - f_0 < 0$  на высотах вблизи уровня отражения ВН.

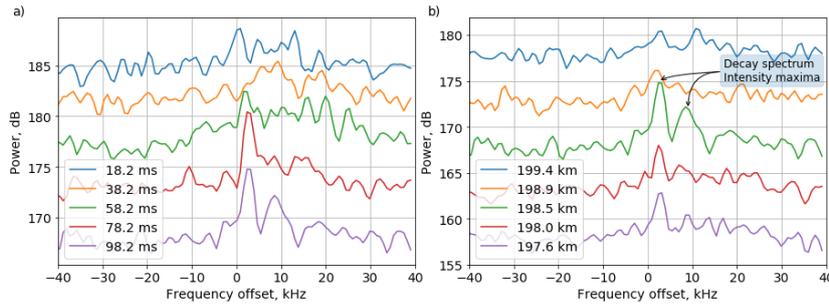
Динамика развития спектров DPL в зависимости от высоты представлена на рис. 5 (программа P1.6) при больших временах после включения ВН. На панели а) представлены спектры сдвинутой вниз плазменной линии на фиксированной высоте  $h = 198.5$  км в различные моменты времени. На панели б) представлена динамика спектров плазменной линии в зависимости от высоты в фиксированный момент времени, на 98.2 мс с начала воздействия).



**Рис. 3.** Спектрограммы принятого рассеянного сигнала вблизи уровня отражения ВЧ, построенные по данным радара некогерентного рассеяния, накопленным за время работы нагревного стенда в режиме излучения по программе P1.6 (длительность импульса ВЧ  $\tau_{и} = 100$  мс, период следования  $T_{и} = 20$  с, задержка относительно импульсов радара  $\tau_d = 1,8$  мс, длительность 20 минут) с шагом в 10 мс, представляющие высотно-временную динамику DPL. Данные радара усреднены по 54 импульсам ВЧ. Ось ординат – высотный интервал 193-201 км, Ось абсцисс – частотный интервал  $-40 \text{ кГц} < \Delta f < +40 \text{ кГц}$  от частоты  $f_{pl} = f_p - f_0$ ; Мощность сигнала представлена в дБ.



**Рис. 4.** Спектры DPL на различных высотах вблизи точки отражения ВЧ на 2.2 мс (панель а) и на 6.2 мс после включения ВЧ (панель б). Проведено усреднение по 50-55 импульсам ВЧ. Для построения использован дополнительный сдвиг на 7 дБ каждого из спектров. Панель а): программа P1.3 (длительность импульса ВЧ  $\tau_{и} = 10$  мс, период  $T_{и} = 2$  с, задержка относительно импульсов радара  $\tau_d = 7,8$  мс, воздействие на протяжении 2 минут), Панель б): программа P1.4 (длительность нагревного импульса  $\tau_{и} = 20$  мс, период  $T_{и} = 4$  с, задержка  $\tau_d = 3,8$  мс, воздействие на протяжении 4 минут).

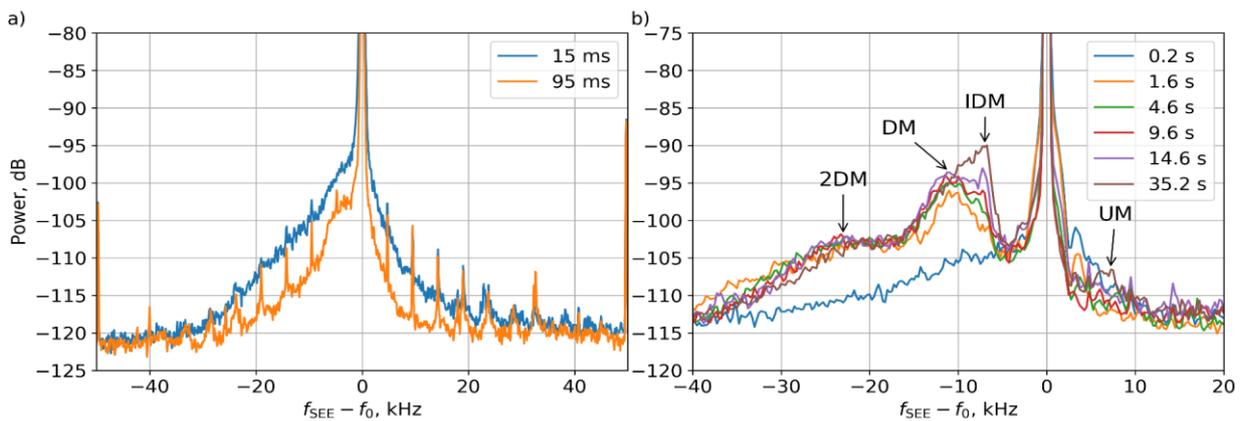


**Рис. 5.** Характерный вид спектров ВЗД на стадии развития искусственной плазменной турбулентности для различных моментов времени воздействия с шагом в 20 мс на фиксированной высоте  $h = 198.5$  км (панель (а)) и высотное распределение с шагом 450 м спектральной интенсивности к концу импульса ВН,  $t = 98.2$  мс (правая панель (б)).

Проведено усреднение по 50-55 импульсам ВН. Для построения использован дополнительный сдвиг каждого из спектров на 5 дБ. Данные обработаны для программы Р1.6 (длительность нагревного импульса  $\tau_i = 100$  мс, период  $T_i = 20$  с, задержка относительно импульсов радара  $\tau_d = 1,8$  мс, воздействие на протяжении 20 минут).

Установлено, что 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 от  $-2,5$  кГц до  $-12$  кГц.

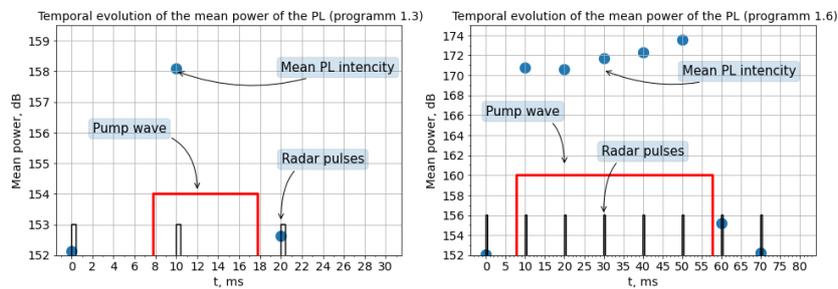
Отметим также, что в режиме воздействия короткими импульсами спектры ИРИ имеют форму тип continuum, подобную спектру ПЛ, при этом интенсивность ИРИ уменьшается со временем. На фоне continuum'a выделяется однако, слабый максимум при отстройках  $\Delta f \sim 5$  кГц. Вид спектров ИРИ при воздействии в режиме коротких импульсов показан на рис. на различных временах после включения ВН показан на рис. 6, панель а).



**Рис. 6.** Примеры спектров ИРИ на начальной стадии воздействия (режим коротких импульсов, панель а)) и при квазинепрерывном воздействии (панель б)). Ось абсцисс – отстройка частоты ИРИ от частоты ВН  $\Delta f_{ИРИ} = f_{ИРИ} - f_0$ ;  $f_{ИРИ}$  – частота искусственного излучения ионосферы.

Сравнение интегральной интенсивности ПЛ для программ Р1.3 ( $\tau_i = 10$  мс,  $T_{иi} = 2$  с,  $\tau_d = 7,8$  мс) и Р1.5 ( $\tau_i = 50$  мс,  $T_i = 10$  с,  $\tau_d = 7,8$  мс) на 2,2 мс после выключения ВН позволило оценить времена релаксации сигнала ПЛ. Средняя мощность рассеянного сигнала в области отражения ВН, в диапазоне частот  $f_r -$

$f_0 - 40 \text{ кГц} < f < f_r - f_0 + 40 \text{ кГц}$ , в различные моменты времени относительно импульса ВН для программ P1.3 и P1.5 представлена на рисунке 7, из которого можно оценить время релаксации  $\tau_{rel}$ . Для 10 мс оно составило  $\tau_{rel} \sim 2 \text{ мс}$ , а для 50 мс –  $\tau_{rel} \sim 0,5 \text{ мс}$ . Это свидетельствует о росте декремента затухания плазменных волн в  $\sim 4$  раза с ростом длительности импульса воздействия, а также показывает, что затухание плазменных волн в случае длительности воздействия 50 мс является бесстолкновительным с декрементом затухания  $\gamma \sim \tau_{rel}^{-1} = 2000 \text{ с}^{-1}$ , поскольку затухание плазменных волн из-за столкновений не превышает частоту соударений электронов:  $\nu_e \sim 500 - 1000 \text{ с}^{-1}$ . Отметим также, что релаксация различных спектральных компонент ПЛ происходит с различными декрементами затухания: с увеличением отстроек ( $\Delta f_{pl} = f_{pl} - f_0$ ) декремент уменьшается. В результате на стадии релаксации может наблюдаться уплощение и даже инверсия спектра плазменных волн.

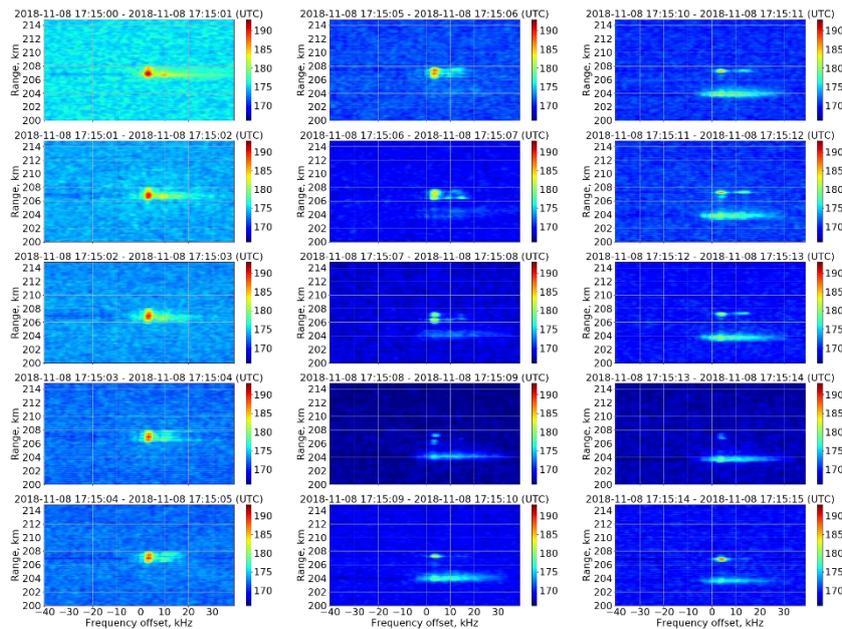


**Рис.7. Средняя мощность рассеянного сигнала вблизи области отражения ВН в диапазоне частот  $f_r - f_0 - 40 \text{ кГц} < f < f_r - f_0 + 40 \text{ кГц}$ . Синим изображена средняя мощность рассеянного сигнала, красным – импульс ВН, черным – импульсы радара.**

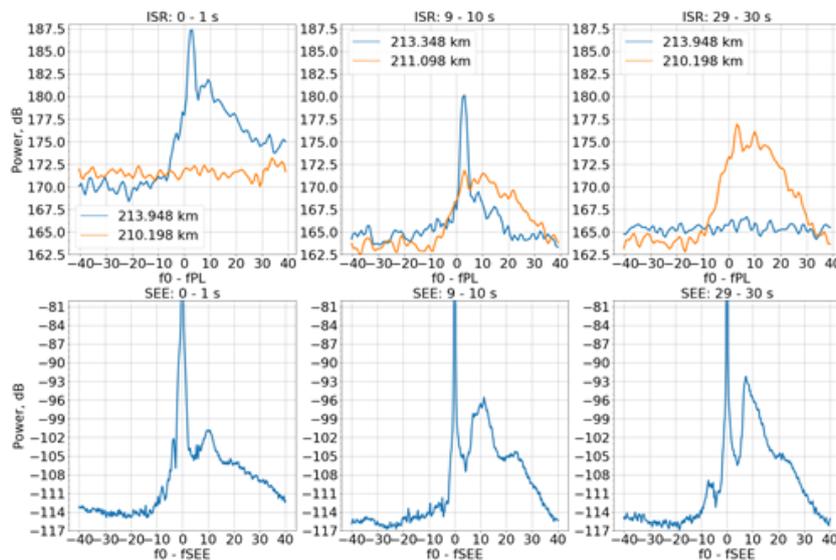
### Режим квазинепрерывного воздействия

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  $h_{ВГР}$  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  $\Delta f_{pl} = f_{pl} - f_0 = -4 \text{ кГц}$  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  $\Delta f_{pl} = f_{pl} - f_0 = -10 \text{ кГц}$  на высотах, близких к высотам верхнегибридного резонанса  $h_{ВГР}$ , 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. 8. От сеанса к сеансу наблюдался рост абсолютных значений области отражения ВН от  $h_0 = 208 \text{ км}$  (рис.8) до  $h_0 = 214 \text{ км}$ , связанный с суточным ростом высот ионосферы при переходе к более поздним часам наблюдений. Примеры спектров DPL для последнего минутного цикла воздействия приведены на рис. 9 для 1-й, 10-й и 29-й секундах излучения ВН (верхние панели). На нижних панелях приведены зарегистрированные одновременно спектры ИРИ.



**Рис. 8. 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 200-215 км.**



**Рис. 9. Пример пространственно-временной динамики развития 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**

Следует также отметить, что область генерации плазменных волн в области отражения ВН к 30-й секунде воздействия экранируется генерацией плазменных волн в области более низких высот (рис.9, 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  $\Delta f \approx -(10 - 12)$  кГц. оранжевые линии, рис. 9 и более слабым максимумом на  $\Delta f \approx -(21 - 25)$  кГц (рис. 9, верхняя средняя панель). При этом, в первые секунды воздействия сигнал с высоты  $h \sim 210.2$  км  $\sim h_{ВГР}$  не наблюдался.

С увеличением длительности воздействия до 40 секунд и более наблюдалась 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 (появление слоёв областей генерации плазменной линии, отстоящих друг от друга на расстоянии 1,5 – 2 км, причем это расстояния со временем увеличивается).

### **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,  $\mathbf{k}_{sc} = \mathbf{k}_p \pm \mathbf{k}_{pl}$ ) 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:

- 1) Приблизительно одинаковая ширина спектров плазменной линии и ИРИ (до 30-40 кГц) и форма спектров типа «continuum» на начальной стадии воздействия, в первые 100 мс.
- 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 [5-7], со 2-й до 10-й секунд 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 [6] 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.

### **Выводы**

Из анализа данных по пространственно-временной динамике ПЛ и ИРИ в экспериментах на нагревном стенде в Аресибо установлено следующее:

1. На стадии развития искусственной плазменной турбулентности максимальная интенсивность в спектре ПЛ 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, далее, 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 секунд после включения волны накачки.

5. При дальнейшем увеличении времени нагрева (больше 40 секунд) 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 времена усреднения потока данных.

б. 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 поддержке гранта РФФИ №20-12-00197-П.*

### **Литература**

1. Djuth F. T., DuBois D. F. (2015), Temporal Development of HF-Excited Langmuir and Ion Turbulence at Arecibo// Earth Moon Planets, 116, 19. <https://doi.org/10.1007/s11038-015-9458-x>.
2. Sulzer M. P. A radar technique for high range resolution incoherent scatter autocorrelation function measurements utilizing the full average power of klystron radars // Radio Science. 1986. Vol. 21, No 6. P. 1033.
3. Stubbe P., Kohl H. (1992), Langmuir Turbulence and Ionospheric Modification // J. Geophys. Res., V. 97 (A5), p. 6285-6297.
4. Kosch M., Pedersen T., Mishin E., Oyama S., Hughes J., Senior A., Watkins B., Bristow B. (2007), Coordinated optical and radar observations of ionospheric pumping for a frequency pass through the second electron gyroharmonic at HAARP // J. Geophys. Res. 112, A06325. <https://doi.org/10.1029/2006JA012146>.
5. Leyser (2001), Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma, Space Sci. Rev., 98, 223–328, doi:10.1023/A:1013875603938.
6. 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. Doi: 10.3367/UFNr.2016.07.037868.
7. B. Thidé, F. T. Djuth, T. B. Leyser, H. M. Ierkić, (1995), Evolution of Langmuir turbulence and stimulated Electromagnetic emissions excited with a 3-MHz pump wave at Arecibo// Journal of Geophysical Research, 100, A12, 1995, p. 23887–23899.
8. 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.