

**ИСКУССТВЕННОЕ ОПТИЧЕСКОЕ СВЕЧЕНИЕ НА ДЛИНАХ ВОЛН 630 И 557.7 нм
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРУ НА ЧАСТОТАХ
ВБЛИЗИ 4-Й ЭЛЕКТРОННОЙ ГИРОГАРМОНИКИ НА СТЕНДЕ «СУРА» В СЕНТЯБРЕ 2012 г.**

А.В. Шиндин, С.М. Грач, В.В. Клименко, И.А. Насыров, А.Б. Белецкий

**ARTIFICIAL OPTICAL AIRGLOW AT $\lambda=630$ AND 557.7 nm DURING HF PUMPING
AT FREQUENCIES NEAR THE 4th GYROHARMONIC
AT “SURA” FACILITY IN SEPTEMBER 2012**

A.V. Shindin, S.M. Grach, V.V. Klimenko, I.A. Nasyrov, A.B. Beletsky

Представлены результаты исследований искусственного оптического свечения ионосферы в красной и зеленой линиях атомарного кислорода (630 и 557.7 нм) при вертикальном воздействии на ионосферу мощным КВ-радиоизлучением на частотах f_0 вблизи 4-й гармоники электронной циклотронной частоты f_{ce} . Эксперимент проводился на стенде «Сура» 14 сентября 2012 г. Свечение регистрировалось с помощью ПЗС-камеры S1C/079-FP(FU) и фотометров. Для диагностики соотношения между f_0 и $4f_{ce}$ регистрировались спектры искусственного радиоизлучения ионосферы. Отмечается, что наиболее интенсивное свечение в красной и зеленой линиях наблюдалось, когда частота волны накачки была несколько ниже 4-й электронной гиросгармоники.

We present the results of the artificial ionospheric airglow studies at the red (630 nm) and green (557.7 nm) lines of the atomic oxygen during vertical HF pumping at frequencies f_0 near the 4th gyroharmonic $4f_{ce}$. The experiment was carried out on September 14, 2012 at “Sura” heating facility. The airglow was recorded using CCD camera S1C/079-FP(FU) and photometers. Spectra of the stimulated electromagnetic emission (SEE) were recorded for diagnostics of the relation between f_0 and $4f_{ce}$. It was obtained that the most intensive airglow in red and green lines was observed when the pump wave frequency was slightly below the 4th gyroharmonic frequency.

В сентябре 2012 г. на стенде «Сура» (Васильсурск, Нижегородская обл.) в условиях высокой солнечной активности была проведена серия экспериментов по исследованию оптического свечения ионосферы при воздействии на нее мощного КВ-радиоизлучения на частотах вблизи 4-й гармоники электронной циклотронной частоты.

Искусственное оптическое свечение ионосферы возникает в результате возбуждения уровней атомов молекул и ионов при столкновениях с электронами, энергия которых превышает потенциал возбуждения соответствующих линий, а также в результате появления возбужденных атомов вследствие процессов диссоциативной рекомбинации. Оптическое свечение является эффективным методом исследования крупномасштабной структуры возмущенной области ионосферы. Регистрация свечения осуществлялась с помощью светочувствительной ПЗС-камеры S1C/079-FP(FU) со светосильным объективом и фотометров со светофильтрами на длины волн 630 и 557.7 нм (красная и зеленая линии атомарного кислорода, уровни $O(^1D)$ и $O(^1S)$). Подробнее методика регистрации и обработки данных искусственного оптического свечения описана в работе [Грач и др., 2012].

Генерация искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) также является важной реакцией ионосферы на мощное высокочастотное воздействие. Оно представляет собой вторичное электромагнитное излучение, возникающее вблизи плазменного резонанса в ионосфере под действием падающей волны за счет эффективной генерации в этой области плазменных волн с частотой, близкой частоте волны накачки. ИРИ – мощное средство диагностики ионосферной плазмы, позволяющее, кроме всего прочего, оценить, насколько частота волны накачки отстоит от гармоники электронной циклотронной частоты

$$nf_{ce} = neB / (2\pi m),$$

где n – номер гармоники, e и m – заряд и масса электрона, B – напряженность магнитного поля. Характеристики спектральных компонент ИРИ, таких как Downshifted Maximum (DM) и Broad Upshifted Maximum (BUM), непосредственно зависят от этой частотной отстройки, а именно, компонента BUM появляется в спектре ИРИ только при

$$f_0 > nf_{ce},$$

где f_0 – частота волны накачки, а сдвиг частоты ее пика от f_0 определяется формулой $\Delta f_{BUM} = f_{BUM} - f_0 = f_0 - nf_{ce} + \delta f$; интенсивность пика компоненты DM минимальна, когда $f_0 - |\Delta f_{DM}| = nf_{ce}$ (см., например, [Sergeev et al., 2006]). Регистрация ИРИ осуществлялась с помощью широкополосного приемника прямого усиления с полосой приема до 1 МГц.

Целью эксперимента, проведенного 14 сентября 2012 г., были поиски зависимости в характеристиках пятна и интенсивности свечения от соотношения f_0 и $4f_{ce}$. Отметим, что в экспериментах на стенде EISCAT яркость свечения при $f_0 > nf_{ce}$ была выше, чем при $f_0 < nf_{ce}$ ($n=2, 3$), но в экспериментах при $n=4$ надежных данных получено не было [Gustavsson et. al., 2006]. В нашем эксперименте воздействие на ионосферу осуществлялось в следующем режиме:

- 1) волна накачки излучалась вертикально вверх;
- 2) частота f_0 выбиралась из набора частот 5360, 5330, 5300 кГц, близких $4f_{ce}$;
- 3) непрерывный нагрев длительностью 2.5 мин чередовался с паузами длительностью 3.5 мин.

Ниже приведены результаты комплексных наблюдений красной и зеленой линий, а также ИРИ, с помощью которого оценивалось соотношение f_0 и $4f_{ce}$. Изменение соотношения f_0 и $4f_{ce}$ происходило при перестройке частоты волны накачки между выбранными значениями либо за счет естественных изменений высоты ионосферы.

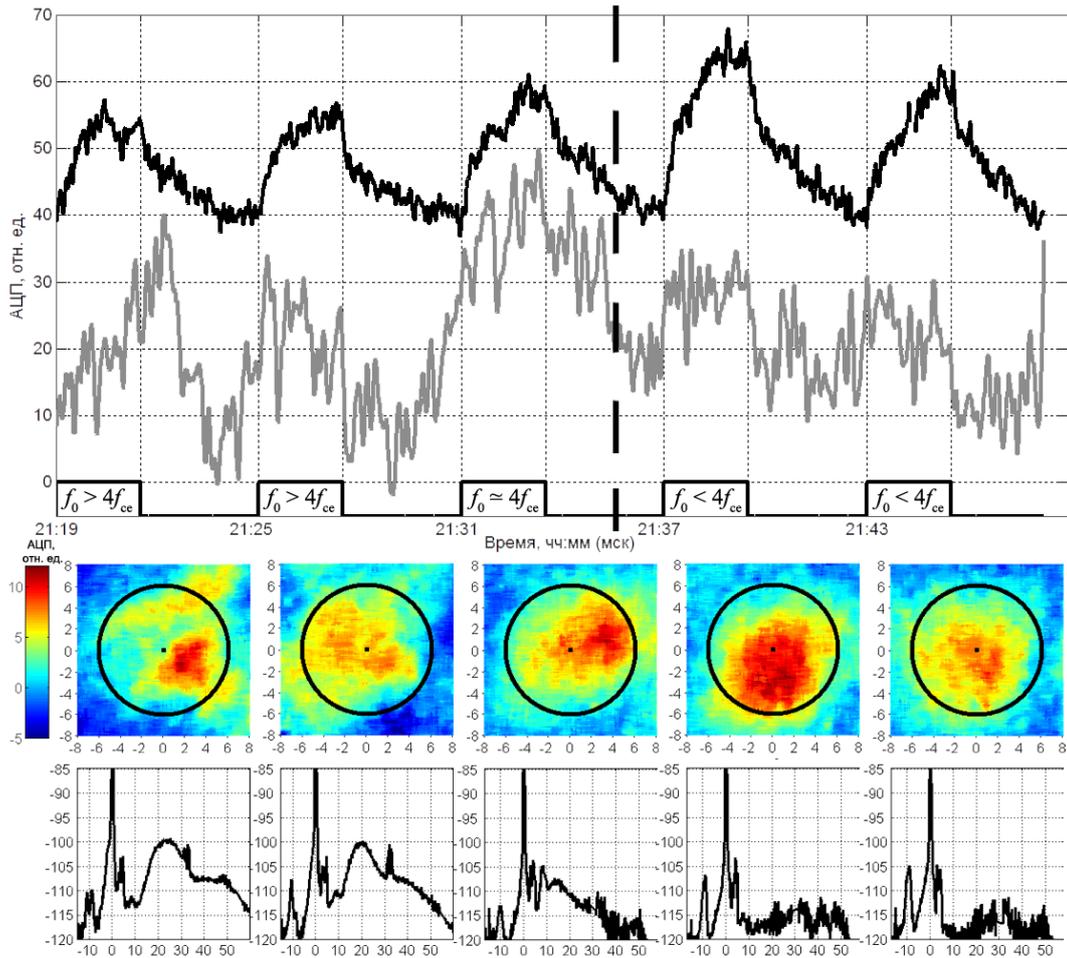


Рис. 1. Временной ход интенсивности свечения в красной (черная линия) и зеленой (серая линия) линиях по данным фотометра для сеансов нагрева 21:19, 21:25, 21:31, 21:37, 21:43 и $f_0=5330$ кГц. В нижней части панели отмечены периоды излучения волны накачки. Центральная панель: изображения пятен искусственного оптического свечения, полученные с помощью ПЗС-камеры во время соответствующих сеансов нагрева. Черный круг – проекция диаграммы направленности антенной системы стенда по уровню половинной мощности на небосвод. Нижняя панель: стационарные спектры ИРИ, зарегистрированные во время соответствующих сеансов нагрева.

В начале эксперимента (21:01–21:15:30 мск) при $f_0=5360$ кГц частота ВН была выше 4-й гирогармоники ($f_0 > 4f_{ce}$) приблизительно на 30–35 кГц, поскольку в спектре ИРИ наблюдалась интенсивная ВУМ-компонента, пик которой располагался на отстройке $|\Delta f_{ВУМ}| = f_0 - 4f_{ce} \approx 50$ кГц. При этом наблюдалось достаточно интенсивное искусственное свечение в красной линии (630 нм), причем его максимальная яркость значительно варьировала от сеанса к сеансу, тогда как генерация искусственного свечения в зеленой линии не наблюдалась. Далее в период 21:19–21:49 мск использовалась частота $f_0=5330$ кГц. На рис. 1 для этого периода приведен временной ход интегральной интенсивности свечения в красной и зеленой линиях, зарегистрированного с помощью фотометров, изображения пятен искусственного свечения, зарегистрированные с помощью ПЗС-камеры во время соответствующих сеансов нагрева, а также соответствующие этим сеансам стационарные спектры ИРИ. При уменьшении частоты ВН от $f_0=5360$ до 5330 кГц позиция пика ВУМ перемещается к $\Delta f_{ВУМ} \approx 25$ кГц (в сеансе 21:19–21:21:30 мск). В последующих сеансах при неизменной частоте $f_0=5330$ кГц наблюдалось приближение позиции

пика ВУМ к частоте накачки ($\Delta f_{ВУМ} \approx 20$ кГц в 21:25, $\Delta f_{ВУМ} \approx 14$ кГц в 21:31). Последний сеанс (21:31) соответствует, по-видимому, проходу частоты ВН через гирогармонику, поскольку в этом сеансе интенсивность компоненты DM минимальна. В последующих сеансах (21:37 и 21:43) ВУМ в спектре ИРИ не наблюдается, а интенсивность DM увеличивается, что соответствует $f_0 < 4f_{ce}$. При этом именно в сеансах 21:25, 21:31, 21:37 и 21:43, т. е. когда частота f_0 наиболее близка $4f_{ce}$, наблюдается искусственное свечение в зеленой линии, а максимальное свечение в красной наблюдалось в сеансах 21:37, когда f_0 несколько ниже $4f_{ce}$.

На рис. 2 представлен ход яркости искусственного свечения в красной линии по данным фотометра для сеансов нагрева 21:49, 21:55, 22:01, 22:07, 22:13. При дальнейшем уменьшении частоты до $f_0=5300$ кГц (см. рис. 2, сеанс 21:49) искусственное свечение в зеленой линии не регистрируется, возможно, вследствие сильных флуктуаций естественного фона, а яркость свечения в красной линии уменьшается. Далее в течение трех сеансов с 21:55 по 22:09:30 яркость свечения в красной линии увеличивается, причем особенно заметно в сеансе

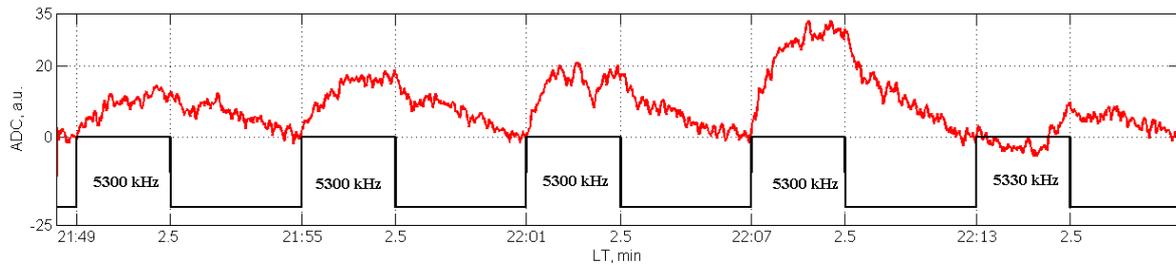


Рис. 2. Интегральная интенсивность в красной линии (по данным фотометра) для сеансов нагрева 21:49, 21:55, 22:01, 22:07, 22:13. В нижней части рисунка отмечены периоды излучения волны накачки и значения f_0 .

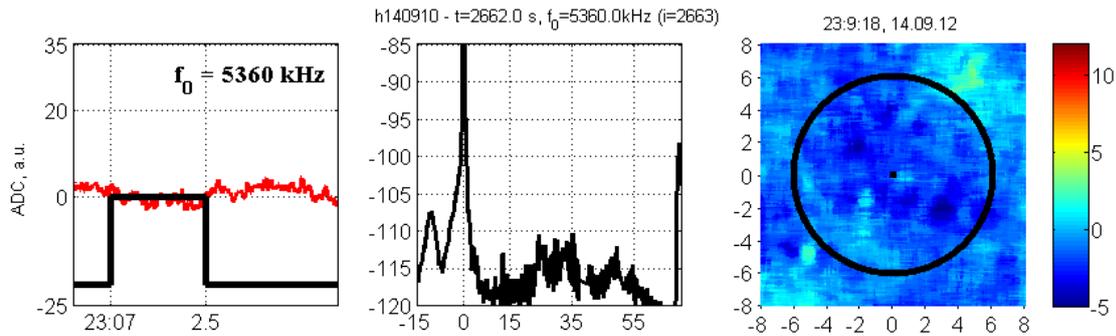


Рис. 3. Левая панель: интегральная интенсивность в красной линии (красная кривая) по данным фотометра для сеансов нагрева 23:07 и $f_0=5360$ кГц. В нижней части панели отмечены периоды излучения волны накачки. Центральная панель: стационарные спектры ИРИ, зарегистрированные во время сеанса нагрева 23:07. Правая панель: изображение, полученное с помощью ПЗС-камеры во время сеанса нагрева 23:07. Черный круг – проекция диаграммы направленности антенной системы стенда по уровню половинной мощности.

22:07–22:09:30, а затем снова уменьшается. При этом частота ВН остается ниже 4-й гирогармоники. Следует заметить, что спектры ИРИ при $f_0 < 4f_{ce}$ не позволяют определять, насколько далеко частота ВН отстоит от гирогармоники [Sergeev et al., 2006]. В дальнейшем при перестройке f_0 обратно к значению 5330 кГц спектры ИРИ показывали заметное изменение ионосферных условий непосредственно во время сеансов воздействия. При перестройке к $f_0=5360$ кГц (в 22:25) BUM снова наблюдался в спектре ИРИ, при этом позиция его пика удалялась от частоты ВН от отстройки $\Delta f_{BUM} \approx 20$ кГц (сеанс 22:25) до $\Delta f_{BUM} \approx 50$ кГц в 22:55, что соответствует увеличению высоты области генерации BUM. В последнем сеансе интенсивность BUM заметно уменьшилась, так же как интенсивность искусственного свечения в красной линии.

На рис. 3 представлены интегральная интенсивность свечения в красной линии (левая панель), стационарный спектр ИРИ (центральная панель), а также изображение пятна свечения (правая панель) для сеанса нагрева 23:07 на частоте $f_0=5360$ кГц. В этом и предыдущем сеансах (23:01 и 23:07) BUM-компонента не наблюдалась, отмечалось уменьшение интенсивности DM, а вместо генерации искусственного свечения в красной линии наблюдалось подавление фона естественного свечения при воздействии. Это связано, по-видимому, с уменьшением критической частоты ионосферы, что приводит к ослаблению генерации ИРИ и «смене знака» влияния ВН на яркость свечения в красной линии при воздействии [Грач и др., 2012].

По результатам эксперимента нельзя утверждать, что существует очевидная зависимость размера и

формы пятна свечения от частотной отстройки от 4-й электронной гирогармоники. Между тем, наиболее интенсивное свечение в красной линии (630 нм) наблюдается, когда частота волны накачки слегка меньше частоты 4-й гирогармоники. Свечение же в зеленой линии (557.7 нм) наблюдается в момент прохода частоты ВН через гирогармонику. В момент, когда частота ВН приближается к критической частоте F2-области ионосферы, яркое пятно искусственного оптического свечения сменяется на темное пятно, эффект сменяется на противоположный.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 11-02-00125, 12-02-00513, 12-02-31181-мол_а, 13-02-12074-офи_м, 13-02-97072, Минобрнауки РФ (соглашение № 14.132.21.1434). Авторы выполняли исследования в соответствии с Программой развития ННГУ как национального исследовательского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грач С.М., Клименко В.В., Шиндин А.В. и др. Оптическое свечение при воздействии радиоизлучением стенда «Сура»: результаты экспериментов 2010 г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1. С. 36–56.
- Gustavsson B., Leyser T.B., Kosch M., et al. Electron gyroharmonic effects in ionization and electron acceleration during high-frequency pumping in the ionosphere // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 195002. doi:10.1103/PhysRevLett.97.195002.
- Sergeev E.N., Frolov V. L., Grach S.M., Kotov P.V. On the morphology of stimulated electromagnetic emission spectra in a wide pump wave frequency range // Adv. Space Res. 2006. 38. P. 2518–2526. doi:10.1016/j.asr.2005.02.046/.

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