

## Предварительные результаты измерений стимулированного свечения ионосферы в зелёной линии оптического спектра (557.7 нм) при коротких временах воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура»

И.А. Насыров<sup>1)</sup>, С.М. Грач<sup>2,3)</sup>, Р.И. Гумеров<sup>1)</sup>, В.В. Клименко<sup>4)</sup>, А.В. Шиндин<sup>3)</sup>, А.М. Насыров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Институт физики, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, 420008. E-mail: Igor.Nasyrov@ksu.ru

<sup>2)</sup> ФГБНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт», г. Н. Новгород, Б. Печерская, 25/12а. 603950.

<sup>3)</sup> ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Радиофизический факультет, г. Н. Новгород, пр.Гагарина,23, 630950.

E-mail: savely.grach@nirfi.sci-nnov.ru

<sup>4)</sup> Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН, г. Н. Новгород, ул. Ульянова,46, 630950. E-mail: klimenko@appl.sci-nnov.ru

В докладе приведены предварительные результаты измерений искусственного свечения ионосферы в зелёной (557,7 нм) линии оптического спектра, стимулированного короткими импульсами мощного радиоизлучения стенда «Сура», полученные при помощи двух независимых фотометров.

*Preliminary results of ionospheric artificial airglow emission at green lines (557.7 nm) caused by short pulses of powerful radio emission of "Sura" facility are presented in the report. The data were collected by two independent photometric instruments.*

### Введение

Изучение физических явлений в плазме методом воздействия мощными радиоволнами на ионосферу ведется уже около сорока лет. Наиболее интенсивные нелинейные эффекты взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой наблюдаются на высотах 200-300 км, в F-слое ионосферы. Эффективность воздействия является следствием совпадения частоты мощной возбуждающей волны с частотами собственных колебаний плазмы. В результате в области резонанса происходит возбуждение собственных колебаний плазмы, развивается плазменная турбулентность, что и служит причиной заметного нагрева электронов, их ускорения вплоть до энергий порядка 30 эВ, структуризации плазмы, генерации искусственного радиоизлучения и ряда других физических явлений [1, 2].

Ряд обнаруженных экспериментальных эффектов (развитие искусственного радиоизлучения ионосферы, «пиковый режим» поглощения мощных радиоволн, практически полное поглощение мощной радиоволны О-поляризации на этапе развития стрикционной неустойчивости (см. рис.1), механизм ускорения электронов и др.) не нашёл ясного теоретического обоснования.

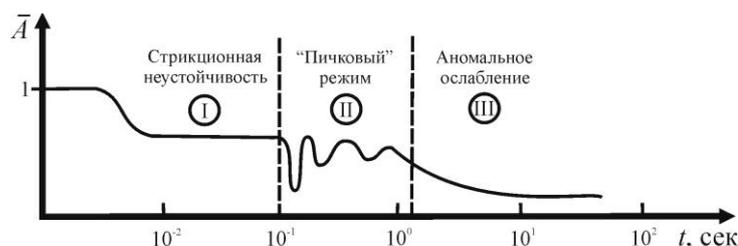


Рис.1. Уменьшение интенсивности мощной декаметровая радиоволны О-поляризации, отраженной от ионосферы [3]

В частности, нет полного понимания физических механизмов ускорения электронов на начальном этапе воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу (режимы I и II на рис. 1). Это связано с небольшим объемом проведенных экспериментов, в особенности при малых временах воздействия на ионосферу, когда тепловые механизмы развития нелинейных явлений (режим III на рис. 1) ещё отсутствуют.

Информативным методом диагностики возмущенной области является измерение искусственной модуляции свечения ночного неба при модификации ионосферы мощными радиоволнами. Экспериментально установлено, что при модификации ионосферы мощными радиоволнами изменяется интенсивность свечения на красной (630 нм) и зеленой (557.7) линиях свечения атомарного кислорода, связанных с излучением уровней  $O(^1D)$  и  $O(^1S)$  с энергиями возбуждения 1.96 и 4.17 эВ и временами жизни 107 сек и 0.7 сек, соответственно. Кроме этого, обнаружено свечение на линиях 844.6 нм (переход  $O(3p^3P) \rightarrow O(3s^3S)$ , энергия возбуждения 10.99 эВ) и 427.8 нм (переход из состояния  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$  на первый вибрационный уровень основного электронного состояния иона молекулярного азота  $N_2^+(X^2\Sigma_u^+)$ ) с временем жизни порядка нескольких мксек.

Регистрируя искусственное свечение ионосферы в зеленой линии оптического спектра (557.7 нм), стимулированное короткими импульсами волны накачки, соизмеримыми с временами возбуждения плазменных волн и стрикционных неустойчивостей, можно определить механизмы ускорения электронов на начальных этапах развития нелинейных процессов.

В докладе приведены предварительные результаты измерений искусственного свечения ионосферы в зелёной линии оптического спектра, стимулированного короткими импульсами волны накачки, полученные на стенде «Сура» в сентябрьской серии экспериментов 2010 г.

### Постановка эксперимента

Эксперименты проводились на нагревном стенде «Сура» (радиополигон «Васильсурск», Нижегородская обл., 56.13° с.ш., 46.10° в.д.). Величина магнитного склонения для данного пункта составляет ~10° на восток от истинного направления на север. Эффективная излучаемая мощность стенда составляла 60-100 МВт. Режим работы стенда был организован в виде шестиминутных циклов: две минуты нагрев – четыре минуты пауза или три минуты нагрев – три минуты пауза. В паузах излучались импульсы длительностью 25 мс с частотой 1 импульс в 2 с. Рабочая частота передатчиков  $f_p$  всегда выбиралась ниже критической частоты слоя F2 ионосферы ( $f_oF2$ ). Воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной поляризации (O-мода). В экспериментах использовались три вида ориентации диаграммы направленности антенны стенда: вертикальная (в зенит), с наклоном на 12° и на 16° от зенита на юг в плоскости магнитного меридиана.

Измерения оптического свечения на длине волны  $\lambda = 557.7$  нм проводились при помощи двух различных инструментов, расположенных на радиополигоне «Васильсурск» на некотором удалении друг от друга (~1 км). Оба инструмента снабжались узкополосными интерференционными светофильтрами.

Первый инструмент – фотометр КФУ, входящий в состав мобильного фотометрического комплекса Казанского университета [4]. В качестве питающей оптики используется полупрофессиональный телескоп «MEADE DeLuxe16» со световым диаметром 400 мм и фокусным расстоянием 1800 мм. В состав фотометра так

же входят блок фото-электронного умножителя (ФЭУ), выполненный на базе модуля усилителя-дискриминатора LA100AD и ФЭУ-100. Фотометр работает в режиме счета фотонов.

Второй инструмент – фотометр НИРФИ, построенный на основе ФЭУ-79 и работающий в режиме измерения постоянного тока. Угловое поле зрения фотометра составляет  $4^\circ$ .

Оба инструмента снабжены дополнительным каналом регистрации данных, позволяющим, синхронно с фотометрией возмущенной области ионосферы, вести регистрацию уровня радиосигнала, излучаемого передатчиками стенда «Сура». Инструменты выставлялись соответственно в зенит или на  $12^\circ$  и на  $16-17^\circ$  к югу от зенита, в зависимости от программы эксперимента.

### **Некоторые особенности полученных экспериментальных данных**

Характер кривых, полученных в ходе фотометрирования возмущенной области ионосферы, существенно отличается, что связано с особенностями аппаратной реализации фотометров.

В первом случае, для фотометра КФУ, имеющего узкое поле зрения ( $\sim 20$  угловых минут), на поведение фотометрической кривой влияют одновременно несколько процессов. Во-первых, наблюдается экспоненциальное понижение общего фона свечения неба, связанное с заходом Солнца. Во-вторых, начиная с 17:30 UTC (когда небо уже достаточно темное), наблюдаются колоколообразные всплески, связанные с прохождением звезд через поле зрения фотометра. В-третьих, на указанные выше процессы накладывается стимулированное свечение ионосферы, вызванное работой стенда «Сура».

Во втором случае, для фотометра НИРФИ, имеющего достаточно широкое поле зрения ( $4^\circ$ ), на поведение фотометрической кривой влияют те же процессы. Однако, в связи с тем, что в апертуру фотометра попадает одновременно большое количество звезд, то регистрируется интегрированный световой поток, создаваемый всеми источниками.

Прохождение звезд через поле зрения фотометров вызывает увеличение регистрируемого светового потока на сотни и даже тысячи Релей, а увеличение светового потока, связанное со стимулированным свечением ионосферы в зеленой линии оптического спектра, при мощностях возмущающих передатчиков, использовавшихся в эксперименте, может составлять лишь несколько единиц Релей. Данная особенность усугубляется тем, что в сентябрьской серии измерений 2010 г. питающая оптика фотометров ориентировалась в тот сектор ночного неба, в котором в это время суток и года проходит Млечный путь. Поэтому количество звезд, регистрируемых инструментами, достаточно велико. Это означает, что при регистрации стимулированного свечения ионосферы реализуется очень плохое соотношение сигнал/шум (С/Ш), так как полезным сигналом является уровень искусственного свечения, а шумом является свет от звезд, проходящих поле зрения фотометра.

### **Обработка экспериментальных данных**

Для предварительной обработки экспериментальных данных были выбраны измерения, проведенные 07.09.2010 г. Диаграмма направленности антенной системы стенда «Сура» была наклонена на  $12^\circ$  от зенита на юг вдоль магнитного меридиана. Питающая оптика фотометров отклонялась на  $13-14^\circ$  от зенита на юг в плоскости магнитного меридиана.

При обработке экспериментальных данных учитывалось несколько обстоятельств. Во-первых, регистрация светового потока для разных инструментов основывается на

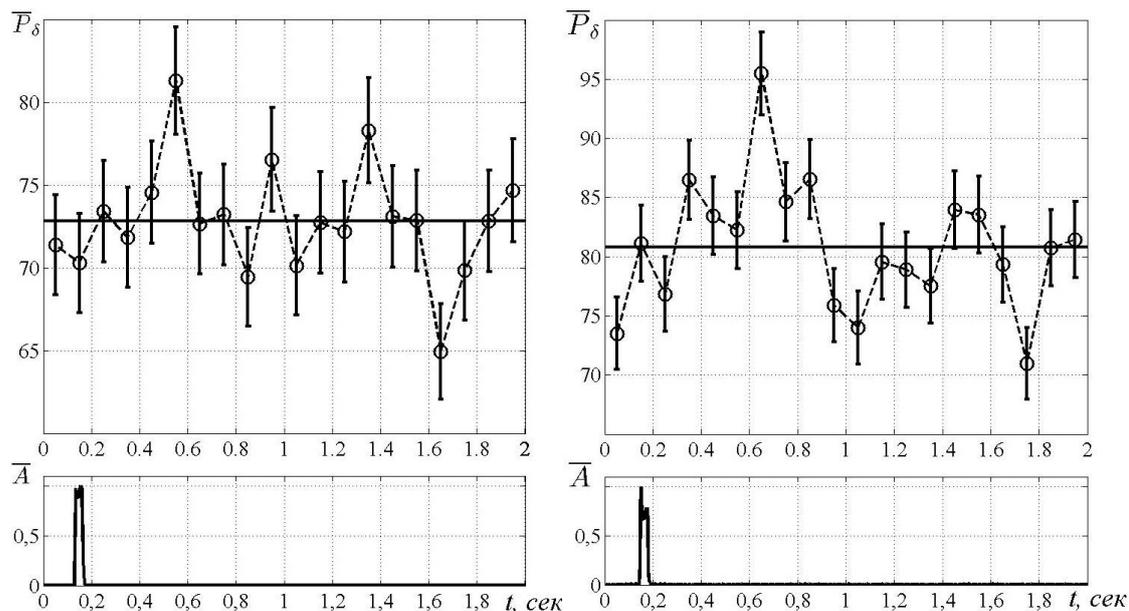
разных методах регистрации сигнала ФЭУ. В фотометре НИРФИ используется метод измерения постоянного тока, протекающего через нагрузочное сопротивление  $R_L$ , при помощи которого анод ФЭУ соединяется с землей. Время усреднения определяется соотношением  $\tau_e = R_L C$  и для фотометра НИРФИ составляет 1 мс, поэтому частота дискретизации АЦП выбиралась равной 1 кГц. В фотометре КФУ используется метод счета фотонов, позволяющий устранить диодный шум. Оригинальное программное обеспечение фотометра КФУ позволяет устанавливать время накопления сигнала от 1 мс до 100 с. При проведении измерений время накопления сигнала устанавливалось равным 20 мс. Особенность метода счета фотонов заключается в том, что время накопления сигнала всегда можно увеличить путем суммирования соседних отсчетов исходной фотометрической кривой, улучшив тем самым соотношение С/Ш. Во-вторых, если измеряется световой поток от постоянного источника и условия измерений не меняются, то регистрируемый выходной сигнал ФЭУ стационарен и его распределение практически всегда близко к распределению Пуассона.

Первичная обработка экспериментальных данных проводилась по минутному интервалу времени (17:18-17:19 UTC), выбранному непосредственно перед двухминутным циклом нагрева. Выбор обусловлен следующим: общий фон неба уже достаточно темный, но сигнал от прохождения звезд ещё не регистрируется, т.к. в это время суток Млечный путь находится в стороне от поля зрения фотометров; рассматриваемый участок фотометрической кривой может быть описан линейной зависимостью, т.е. измеряется световой поток от постоянного источника, следовательно, распределение отдельных отсчетов носит пуассоновский характер; искусственное свечение ионосферы, стимулированное предыдущим двухминутным циклом нагрева оказывает на «короткие» процессы минимальное влияние.

Следующим шагом в обработке было приведение экспериментальных данных, полученных на разных инструментах к единому виду. Для данных фотометра КФУ было произведено увеличение соотношения С/Ш путем суммирования соседних отсчетов полученной фотометрической зависимости. Известно, что для стационарных процессов соотношение С/Ш растет пропорционально квадратному корню из времени накопления сигнала. Суммирование проводилось по каждому пяти соседним отсчетам, таким образом, время накопления сигнала было увеличено до 100 мс. Следовательно, соотношение С/Ш увеличилось более чем в два раза. Для фотометрической кривой, полученной на фотометре НИРФИ, было проведено усреднение по тому же 100 мс интервалу времени. Суммирование соседних отсчетов не даст такого увеличения соотношения С/Ш, так как в данном случае вместе с полезным сигналом будет суммироваться и шум, создаваемый диодным током.

Известно (см. например [5]), что генерация оптического излучения в зеленой линии спектра происходит при квантовом переходе атома кислорода уровня  $O(^1S_0)$  на уровень  $O(^1D_2)$  с характерным временем жизни  $\sim 0.7$  с. Вновь полученные фотометрические отсчеты с дискретами по времени, равными 0.1 с, позволяют отследить динамику искусственного свечения ионосферы, стимулированного короткими (25 мс) импульсами накачки мощного радиоизлучения стенда «Сура».

Для новых фотометрических зависимостей был найден параметр распределения Пуассона  $\bar{P}_s$  (сплошная горизонтальная линия в верхней части рис. 2). Далее, одноминутный интервал (17:18 - 17:19 UTC) был разделен на двухсекундные отрезки (по 20 отсчетов) таким образом, чтобы в каждом из них был только один импульс накачки. Затем методом наложения эпох для каждого отсчета был найден параметр распределения Пуассона ( $\bar{P}_s$ ). Результаты представлены в верхней части рис. 2, вертикальными отрезками отмечен доверительный интервал в 95%.



**Рис. 2.** Результаты измерений на зелёной линии оптического спектра ( $\lambda = 557.7$  нм) при импульсной работе стенда «Сура», полученные методом наложения эпох: верхние панели – фотометрические данные; нижние панели – импульс «накачки» (25 мс); правые панели – фотометр НИРФИ; левые панели – фотометр КФУ

### Обсуждение результатов

Из рис. 2 видно, что после воздействия на ионосферу импульсом накачки уровень свечения ночного неба начинает расти и достигает своего максимума (+9% над фоном) через  $\sim 0.4 \div 0.6$  с, затем примерно через  $1.3 \div 1.4$  с он достигает своего минимума (-9% от фона), после чего возвращается к среднему уровню свечения. Необходимо сказать, что полученный результат качественно хорошо согласуется с результатами, полученными нами ранее (см. например [6,7]). Обращает на себя внимание факт гашения зеленой линии на заключительном этапе развития фотометрической кривой, который наблюдается во всех экспериментах. Физика этого явления требует отдельного обсуждения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №12-02-00513 и №12-05-01017)*

### Литература

1. Гуревич А.В. //УФН. – 2007. – Т.177, №11. – С.1145-1177.
2. Беликович В.В., Грач С.М. и др. //Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т.50, №7. – С.545-576.
3. Ерухимов Л.М, Метелёв С.А., Мясников Е.Н., Митяков Н.А., Фролов В.Л. //Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1987. – Т.30, №2. – С.208-225.
4. Артемов А.В., Гумеров Р.И., Насыров А.М., Насыров И.А. //Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XVI Международного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. – С. 560-562.
5. Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. – М.: Мир, 1978 – 376 с.
6. Гумеров Р.И., Капков В.Б., Комраков Г.П., Насыров А.М. //Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т.42. – С.524--527.
7. Grach S.M., Nasyrov I.A., Gumerov R.I. et al. //Advances in Space research – 2004. – V.34. -- P.2422-2427.