

Некоторые результаты измерений искусственного свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура», полученные в 2007-2009 гг

И.А. Насыров¹⁾, С.М. Грач^{2,3)}, Р.И. Гумеров¹⁾, В.В. Клименко⁴⁾, А.М. Насыров¹⁾, Е.Н. Сергеев²⁾, Г.П. Комраков²⁾

¹⁾ ГОУ ВПО «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», Физический факультет, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, 420008. E-mail: Igor.Nasyrov@ksu.ru

²⁾ ФГНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт», г. Н. Новгород, Б. Печерская, 25/12а. 603950. E-mail: esergeev@nirfi.sci-nnov.ru

³⁾ 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

⁴⁾ 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 некоторые результаты измерений искусственного свечения ионосферы в зеленой (557,7 нм) и красной (630 нм) линиях оптического спектра, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура», полученные в ходе экспериментов 2007-2009 гг.

Some results of ionospheric artificial airglow emission at two lines of optical spectrum (557.7 nm and 630 nm) caused by powerful radio emission of "Sura" facility are presented in the report. The data were collected during of experimental companies from 2007 to 2009 years.

Введение

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 $O(^3P) \rightarrow O(^3S)$, 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.

Необходимо отметить, что в большинстве экспериментов искусственное свечение ионосферы регистрировалось при длительном нагреве ионосферы. Это позволило судить лишь о механизмах ускорения электронов на стадиях релаксации температуры электронов F -области ионосферы. В этих экспериментах не удалось определить механизмы ускорения электронов на начальных этапах развития нелинейных процессов в ионосфере при воздействии на нее мощной декаметровый радиоволной обыкновенной поляризации, соизмеримых с временами возбуждения плазменных волн и стрикционных неустойчивостей. Исключение составляют исследования, выполненные авторами доклада [1-3].

Целью настоящих исследований является оценка эффективности механизмов ускорения электронов на уровне отражения мощных радиоволн от ионосферы, уровня верхнегибридного резонанса, влияния эффекта «магнитного зенита» на ускорение электронов. А также, развитие методов диагностики ионосферных турбулентностей, как естественного, так и искусственного происхождения, с помощью измерений в оптическом диапазоне длин волн. Это предполагает развитие методов фотометрии протяженных слабосветящихся объектов с короткими временами жизни, а также

методик построения пространственной картины искусственного ионосферного возмущения по стерео-фотометрическим измерениям, проводимым из двух пространственно разнесенных точек (радиополигон «Васильсурск» (НИРФИ) и Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта (КГУ), расположенная в 170 км к востоку от стенда «Сура»).

В настоящем докладе приводятся ряд результатов экспериментов, проведенных в течении 2007-2010 годов.

Техника и методология проведения измерений

Измерения оптического свечения, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура» проводятся с помощью набора фотометров с соответствующими светофильтрами, цифровой ПЗС-камерой S1C/079FP(FU) принадлежащей НИРФИ (в 2010 г. совместно с камерой был опробован светосильный объектив HC-2), а также с помощью мобильного фотометрического комплекса, разработанного в Казанском государственном университете (МФК КГУ). В настоящее время МФК КГУ может обеспечивать фотометрические измерения из двух пространственно разнесенных точек (радиополигон «Васильсурск» (НИРФИ); Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта (КГУ), расположенная в 170 км к востоку от стенда «Сура»), с точной привязкой к мировой координированной шкале времени UTC посредством приема радиосигналов от спутников GPS. В качестве питающей оптики МФК КГУ используются два зеркальных телескопа Messier N203 фирмы Bresser, пригодных для астрофотографии со световым диаметром 203 мм, фокусным расстоянием 900 мм и максимальным полезным увеличением до 400 крат; один телескоп MEADE DeLuxe16" со световым диаметром 40 см и фокусным расстоянием 1800 мм; светосильная камера ЗИКАР-2Б со световым диаметром 270 мм и фокусным расстоянием 460 мм. В качестве светоприемников в МФК КГУ используются цифровые CCD камеры DSI и DSIPro, и фотометры оригинальной разработки, выполненные на базе модуля усилителя-дискриминатора LA100AD, предназначенного для формирования выходных сигналов в аналоговой и цифровой логической форме с фотоэлектронного умножителя ФЭУ100 (производитель ООО «Обнинская фотоника») и микроконтроллера AT91SAM7X фирмы AMD [4].

Искусственное свечение ионосферы стимулировалось воздействием на неё мощного радиоизлучения стенда «Сура». Режим воздействия на ионосферу выбирался по следующей схеме: от 1.5 мин до 4 мин – нагрев, от 3 до 6 мин – пауза; в паузах излучались короткие (20 ÷ 30 мсек) импульсы с периодом следования 3 сек.

Состояние ионосферы контролировалось при помощи ионозонда «Базис-3», расположенного на р/п «Васильсурск», а в ряде экспериментов использовался второй ионозонд «Циклон-М», расположенный на р/п Казанского университета «Ореховка» (170 км на восток от стенда «Сура»), что позволяло контролировать параметры ионосферы в моменты воздействия мощного радиоизлучения (т.е. когда отражения от ионосферных слоев станцией «Базис-3» не регистрируются). Во время проведения измерений регистрировались спектры искусственного радиоизлучения ионосферы при помощи установки, расположенной на р/п «Васильсурск».

Результаты 2007 г

В экспериментальной компании сентября 2007 г. МФК КГУ располагался на р/п «Васильсурск», Нижегородская область. Результаты измерений в зеленой линии (557,7 нм) 05.09.2007 г. приведены на рис.1. При импульсной работе мощного передатчика (длительность импульса 20 мс, частота повторения 3 сек) обнаружено увеличение свечения в зеленой линии (557,7 нм) над фоновым, которое достигает своего

максимума (~ +5 % от фонового уровня) через 0,6 сек после воздействия волны накачки (ВН), затем уровень сигнала начинает падать, и достигает своего минимума (~ -7 % от фонового уровня) через ~ 1,6 – 1,7 сек после воздействия импульса ВН, уровень регистрируемого свечения восстанавливается к фоновому уровню через ~ 2 – 2,3 сек после импульсного воздействия на ионосферу ВН. Полученный результат согласуется с опубликованными нами ранее [1-3].

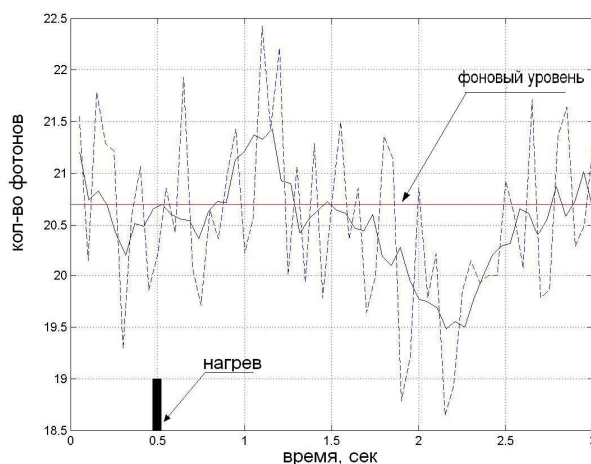


Рис. 1. Результаты измерений на зеленой линии (557,7 нм), 05.09.2007 г., 18:21-18:25 UTC. На временной оси показан 20 мс импульс нагрева, прямая сплошная линия – фоновый уровень, полученный в паузе нагрева (продолжительность паузы 1 мин); пунктирная линия – фотометрическая кривая, построенная по отсчетам, взятым через 50 мс; сплошная линия - сглаженная фотометрическая кривая

Результаты 2008 г

Первая серия экспериментальных исследований 2008 г. стимулированного свечения ионосферы (ССИ) проводилась с 31.03 по 05.04.2008 г. Измерения проводились в двух пространственно разнесённых пунктах: р/п «Васьльсурск»; Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгадта (АОЭ) (170 км к востоку от стенда «Сура»). На р/п «Васьльсурск» был установлен набор фотометров с соответствующими светофильтрами и цифровая ПЗС-камера S1C/079FP(FU), измерения проводились в зеленой (557,7 нм) и красной (630 нм) линиях оптического спектра. МФК КГУ располагался на территории АОЭ, был задействован один оптический канал на линии 630 нм. Наведение питающей оптики МФК КГУ осуществлялось по методике, разработанной в Казанском университете [5].

Воздействие на ионосферу осуществлялось циклами: 4 мин – нагрев; 6 мин – пауза. 01.04, 04.04 и 05.04.07, диаграмма направленности антенн стенда «Сура» отклонялась на 12° на юг от вертикали - в «магнитный зенит». 31.03, 02.04 и 03.04.07 диаграмма направленности антенной системы стенда «Сура» была ориентированна в зенит.

На рис. 2 представлены *F*-графики для слоя *F2* ионосферы за 3-5 апреля 2008 г., сплошной горизонтальной линией отмечена рабочая частота стенда «Сура» – 4,3 МГц. Из рис. 2 видно, что только 4 апреля 2008 г. были подходящие условия для наблюдения ССИ. Т.к. только в этот день критические частоты слоя *F2* держались достаточно долго, и практически все время проведения оптических наблюдений были выше нагревной частоты стенда «Сура». В остальные дни критические частоты слоя *F2* снижались ниже уровня 4,3 МГц, раньше, чем наступала темнота в пункте наблюдения (16:30 UTC), т.е. создавались условия наблюдения ССИ в оптическом диапазоне длин волн.

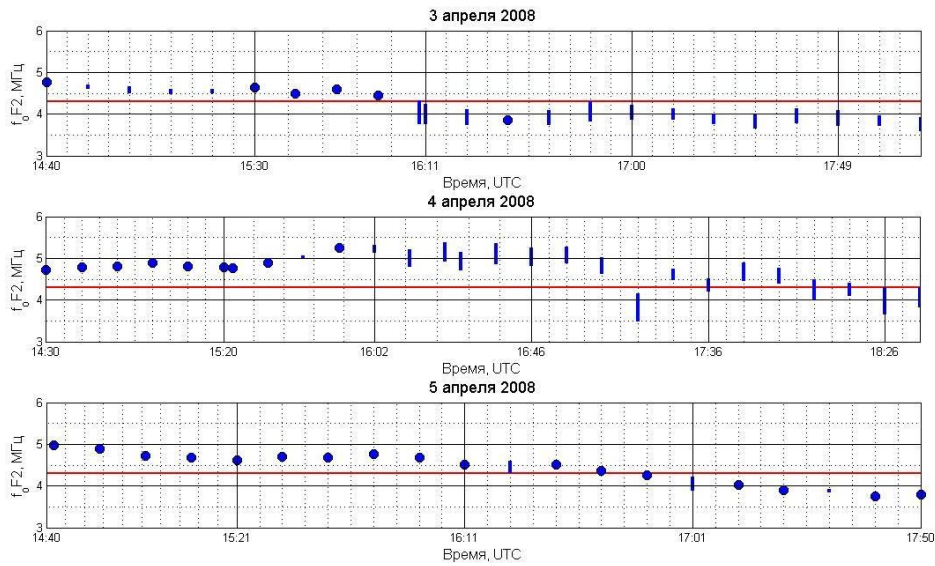


Рис. 2. F -графики построенные по данным ионозонда «Базис-3»

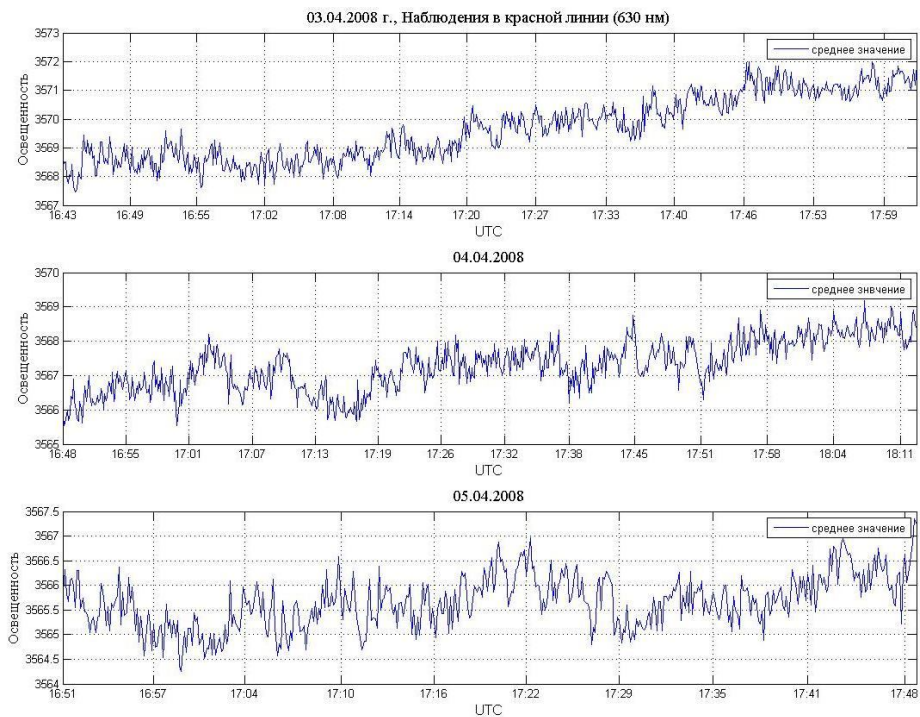


Рис. 3. Фотометрические кривые: верхняя панель – 03.04.08 г.; средняя панель – 04.04.08 г.; нижняя панель – 05.04.08 г

Проведенный анализ данных показал (рис. 3), что 04.04.2008 наблюдался эффект, заключающийся в повышении уровня фотометрического фона в период нагрева ионосферы. Разность фона между началом (16:48 UTC) и окончанием (18:12 UTC) измерений составляет +15-17% (рис. 3, средняя панель). В естественных условиях фон понижается в связи с заходом Солнца за горизонт. Интересно отметить, что подобный эффект наблюдается и 03.04.08 г. (рис. 3, верхняя панель), хотя из анализа ионосферных данных (рис. 2, верхняя панель) взаимодействия мощного радиоизлучения стенда «Сура» с ионосферной плазмой быть не должно. Однако, по ионограммам ионозонда «Базис-3» видно, что 3 и 4-го апреля наблюдался F_{spread} во время проведения оптических измерений (рис.2 верхняя и средняя панели), 5-го апреля F_{spread} не наблюдался (рис. 2 нижняя панель).

К сожалению, значимой корреляции фотометрических кривых с циклами нагрева обнаружить не удалось для всех дней наблюдений.

Следует отметить, что солнечная активность в 2008-2009 гг. оставалась достаточно низкой, минимум 11-летнего цикла активности Солнца, пришедшийся на 2007-2008 гг. оказался наиболее глубоким и длительным за последние 50-55 лет. В связи с этим, критическая частота ионосферы во время проведения экспериментов в 2008-2009 гг. оставалась достаточно низкой. В темное время суток, через ~1,5 часа после захода Солнца, когда в силу уменьшения естественной освещенности становятся возможными измерения искусственного оптического свечения, критические частоты ионосферы часто оказывались ниже минимальной частоты станда «Сура» (4.3 МГц).

Кроме этого, во время проведения измерений в августе 2009 г. один из 3-х передатчиков станда «Сура» не работал по техническим причинам. Таким образом, мощность воздействия на частоте 4,3 МГц при фазированном излучении передатчиков была в 2,25 раза ниже максимальной и не превышала 70 МВт, что должно было существенно уменьшить эффективность генерации энергичных электронов, ответственных за оптическое свечение.

В связи с этим, во второй половине 2008 г. и в 2009 г. значимых результатов получить не удалось.

Последняя экспериментальная кампания проводилась в марте 2010 г. Погодные и ионосферные условия были приемлемыми для наблюдения стимулированного свечения ионосферы. Измерения проводились на р/п «Васильсурск». В ряде циклов нагрева зарегистрировано увеличение свечения ионосферы, как в красной, так и зеленой линиях оптического спектра.

Работа выполняется при поддержке фонда РФФИ (гранты №08-02-01188 и №09-02-01150).

Литература

1. Гумеров Р.И., В.Б.Капков, Г.П. Комраков, А.М.Насыров. Искусственное свечение ионосферы при кратковременном воздействии мощного радиоизлучения //Изв. вузов: радиофизика. – 1999. - Т.42, № 6. - С. 463-465.
2. S.M. Grach, E.N. Sergeev, A.M. Nasyrov, I.A. Nasyrov, R.I. Gumerov, R.R. Shaimukhametov, G.P. Komrakov. Simultaneous observations of the 557.7 nm airglow and stimulated electromagnetic emission during HF pumping of the ionosphere with diagnostic schedule: First results //Advances in Space research. - 2004. - Vol. 34, № 11. - P. 2422-2427.
3. S.M. Grach, E.N. Sergeev, G.P. Komrakov, P.V.Kotov, A.M. Nasyrov, I.A. Nasyrov, R.I. Gumerov, R.R. Shaimukhametov. Studies of artificial airglow emission at 557.7 nm (green line) of upper atmosphere caused by “Sura” facility //SPIE Proc. - 2006. - Vol. 6522. – Paper No 652226.
4. А.В. Артемов, Р.И. Гумеров, А.М. Насыров, И.А. Насыров. Быстродействующий фотометр для регистрации искусственного свечения ионосферы, стимулированного антропогенными воздействиями //Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XVI Международного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009 – С. 560-562.
5. Р.И. Гумеров, Е.Ю. Зыков, А.М. Насыров, И.А. Насыров, Р.Р. Шаймухаметов. Методика наведения мобильного фотометрического комплекса на область ионосферы, возмущенную мощным радиоизлучением станда «Сура» //Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XVI Международного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009 – С. 555-557.