

Том I, с. 58–66

УДК: 533.951+537.868+551.510.535

ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ НА СТЕНДЕ СУРА (ОБЗОР)

С. М. Грач¹, И. А. Насыров², Д. А. Когогин², А. В. Шиндин¹, В. В. Клименко³,
А. Б. Белецкий⁴, Р. И. Гумеров², Г. П. Комраков¹, Е. Н. Сергеев¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

E-mail: sgrach@rf.unn.ru

²Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

³Институт прикладной физики Российской академии наук,

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

⁴Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

Аннотация. Представлен обзор результатов исследований ионосферы, возмущённой мощным КВ радиоизлучением стенда «Сура», с помощью измерений оптического свечения ионосферы.

Ключевые слова: оптическое свечение, мощное радиоизлучение, стенд «Сура»

STUDYING OF ARTIFICIAL AIRGLOW AT THE SURА FACILITY (A REVIEW)

S. M. Grach, I. A. Nasyrov, D. A. Kogogin, A. V. Shindin, V. V. Klimenko, A. B. Beletsky,
R. I. Gumerov, G. P. Komrakov, E. N. Sergeev

Abstract. A review of studies of the ionosphere pumped by powerful high-frequency radio radiation of the Sura facility, carried out by measuring the optical emission of the ionosphere, is presented.

Keywords: optical emission, powerful radiowave, pumping, “Sura” facility, ionosphere

Введение

Воздействие мощных радиоволн на свечение ионосферы в оптическом диапазоне широко исследуется в экспериментах начиная с 70-х годов XX века [1–20], в том числе на стенде «Сура» [11–20]. Оптическое свечение ночного неба (в докладе речь идёт об F -области ионосферы) наблюдается, в частности, в линиях атомарного кислорода $O(^1D)$, $O(^1S)$, и иона молекулярного азота $N_2^+(B_2\Sigma_u^+)$ с длинами волн 630 нм (красная линия), 557.7 нм (зелёная линия), и 427.8 нм (синяя линия), порогами возбуждения ~ 2 эВ, 4.2 эВ, и 18.6 эВ, и характерными радиационными временами жизни ~ 110 с, 0.7 с и 10^{-6} с, соответственно. Свечение возникает при переходе электронов с возбуждённых уровней атомов, молекул и ионов ионосферы на более низкие энергетические уровни. В ночное время излучение в атмосферных линиях кислорода всегда имеет место в качестве фонового свечения неба, вызванного возбуждением атомов в ионно-молекулярных реакциях. В $F2$ -области ночной ионосферы основным источником возбуждения атомарного кислорода является последовательность реакций перезарядки и диссоциативной рекомбинации электронов с ионами молекулярного кислорода: $O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$; $O_2^+ + e^- \rightarrow O + O(^1D)$. При рекомбинации высвобождается достаточно энергии для возбуждения атомов в состояние $O(^1D)$. Коэффициент диссоциативной рекомбинации уменьшается с ростом температуры электронов: $\alpha(T_e) \propto T_e^{-1/2}$. Поэтому одним из оптических эффектов воздействия мощного коротковолнового радиоизлучения на $F2$ -область ионосферы является уменьшение яркости фонового свечения при включении нагрева и его увеличение после выключения. Такие эффекты ожидалось при проведении первых экспериментов и действительно были обнаружены. Другой канал возбуждения соответствующих уровней — это столкновения атомов (O) и ионов (N_2^+) с электронами, энергия которых превышает потенциал возбуждения. Энергичные электроны появляются в возмущённой мощными КВ радиоволнами области ионосферы в результате их ускорения плазменными (квазиэлектростатическими) волнами. Эти волны возникают в результате развития различных

параметрических неустойчивостей в ионосферной плазме в поле мощной радиоволны в области плазменных резонансов [21]. В результате увеличивается концентрация возбужденных атомов и ионов, и, следовательно, имеет место усиление оптического свечения (искусственное оптическое свечение, или «искусственное полярное сияние») под действием мощных радиоволн. В большинстве случаев генерация искусственного свечения преобладает над подавлением фона.

С помощью анализа данных измерений оптического свечения в линиях с различными потенциалами возбуждения можно оценивать функцию распределения и, следовательно, эффективность ускорения электронов в возмущенной области ионосферы. Регистрация портретов ночного неба с помощью ПЗС камер позволяет изучать пространственную структуру области генерации свечения, и, следовательно, получать изображение крупномасштабных (2–20 км) неоднородностей и их перемещение ионосферной плазмы в области, засвеченной волной накачки. Дополнительную информацию при этом дает одновременное использование радиометодов исследования возмущенной области ионосферы. В частности, измерения искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ), представляющего собой продукт обратной трансформации плазменных волн в электромагнитные, позволяет изучать свойства плазменных волн, ответственных за ускорение электронов, в том числе определять величину бесстолкновительного затухания. Характеристики эффекта самовоздействия волны накачки, наряду с измерениями ИРИ, дают ответ на вопрос, какие именно плазменные волны (ленгмюровские либо верхнегибридные) ответственны за ускорение электронов. Измерения сигналов навигационных ИСЗ систем GPS и ГЛОНАСС позволяет измерять полное электронное содержание на траектории распространения сигнала от спутника до приемника, т. е. изучать крупномасштабную неоднородную структуру ионосферы. Одновременные измерения этих сигналов и искусственного оптического свечения при пролете ИСЗ над возмущенной областью ионосферы позволяют определять, в областях повышенной или пониженной концентрации происходит генерация свечения. Анализ фотохимических реакций, ответственных за генерацию оптического свечения ионосферы и подавление фона показывает, что имеется принципиальная возможность на основе регистрации свечения осуществлять диагностику не только плазменных образований в возмущенной области ионосферы, но и аэрономических параметров нейтральной атмосферы на высотах F -области. В частности, речь идет о концентрации атомарного азота не только в возбужденном, но и в основном состоянии, о влиянии молекулярного азота на интенсивность свечения. Кроме этого, существует возможность определения (оценки) электронной температуры в возмущенной области на основе измерений динамики яркости свечения в красной линии после выключения волны накачки.

Первые эксперименты по исследованию искусственного оптического свечения на стенде «Сура» были проведены по инициативе А. М. Насырова и Г. П. Комракова в 1983 году с помощью телескопа АЗТ-14, расположенного в 170 км к востоку от стенда в Астрономической обсерватории Казанского федерального университета. В этих экспериментах измерялась яркость свечения в зелёной линии с длиной волны 557.7 нм при воздействии импульсным радиоизлучением с большой скважностью [12]. Следующая серия экспериментов, в которых исследовалась динамика свечения в зелёной линии при различных режимах воздействия, была проведена в 2001 г. [13]. В 1990-е и 2000-е годы на стенде была проведена серия исследований, в которых в качестве регистрирующей аппаратуры использовались ПЗС-камеры коллег из США и Великобритании [10, 11, 14]. Начиная с 2006 года, эксперименты на стенде «Сура» проводятся с помощью фотометрической аппаратуры стенда (НИРФИ, ННГУ), Казанского федерального университета и Института солнечно-земной физики СО РАН.

В настоящем докладе представлен краткий обзор полученных «собственными силами» результатов исследований процессов и явлений, происходящих в области ионосферы, возмущенной мощным радиоизлучением стенда «Сура» (56.15° с. ш., 46.10° в. д.), с помощью измерений оптического свечения ионосферы и некоторых радиометодов диагностики при различных режимах излучения стенда. Подробное описание полученных результатов дано в работах [12–20].

Результаты экспериментов

Напомним, что искусственное оптическое свечение можно наблюдать в ясную погоду приблизительно через полтора часа после захода Солнца в период, близкий к новолунию, при критических частотах F -слоя ионосферы, превышающих частоту волны накачки. В большинстве сеансов воздействия изображение области свечения в красной линии (630 нм), полученное с помощью ПЗС-камеры, представляет собой серию полос (страт), вытянутых вдоль проекций силовых линий геомагнитного поля \mathbf{B} (показанных тонкими белыми линиями на рис. 1), с поперечными и продольными угловыми размерами $0.5 - 2^\circ$ и $3 - 6^\circ$ соответственно (на высоте порядка 250–300 км это соответствует линейным размерам $l_\perp \sim 2 - 10$ км и $l_\parallel \sim 15 - 30$ км). Серия портретов ночного неба в линии 630 нм во время воздействия радиоизлучением стенда «Сура» представлена на рис. 1.

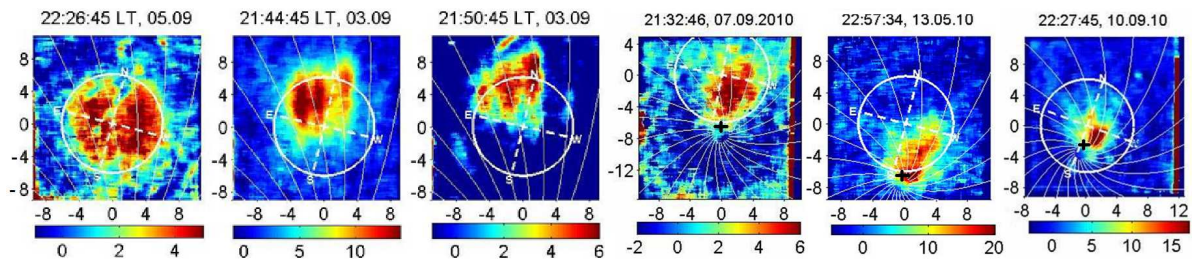


Рис. 1. Серия портретов ночного неба в линии 630 нм, зарегистрированных в конце двухминутных циклов воздействия в 2010 г. Три панели слева — вертикальное воздействие, четвёртая и пятая — наклон к югу на 12° , пятая — на 16° . Координаты по осям указаны в градусах поля зрения ПЗС-камеры, яркость — в единицах АЦП ПЗС-камеры после вычитания темного кадра, 1 единица соответствует примерно 2.6 Рл. Крест соответствует направлению вдоль магнитного поля (магнитный зенит), при этом наклон луча зрения составляет 18° .

При вертикальном излучении волны накачки (три левых портрета), страты расположены в центре диаграммы направленности (белая окружность) при высоте отражения ВН $h_r \sim 250$ км и смещаются к северу соответственно на 3° и 6° при увеличении h_r до ~ 265 и 280 км. Такое смещение связано с высыпанием электронов, ускоренных плазменной турбулентностью в области возбуждения плазменных (по всей видимости, верхнегибридных) волн, несколько ниже h_r , вниз в более плотные слои атмосферы на высоты ~ 250 км, где и происходит генерация свечения, вдоль поля \mathbf{B} , которое наклонено к северу. При достаточно больших (> 15 Рл) яркостях свечения страты в процессе развития сливаются.

При наклоне диаграммы направленности стенда к югу в направлении магнитного поля, пятно свечения смещается, наоборот, к югу и при достаточно низких частотах воздействия наиболее яркое пятно свечения наблюдается вблизи магнитного зенита вне зависимости от угла наклона диаграммы. Это хорошо видно на правых панелях рис. 1 и верхних панелях рис. 2. Стратификация пятен свечения на снимках на вытянутые вдоль проекций магнитного поля структуры связана, скорее всего, с самофокусировочной неустойчивостью волны накачки, в результате которой в области существования плазменных волн образуются неоднородности концентрации плазмы с поперечными размерами $0.5 \div 5$ км, причём волна накачки должна фокусироваться в областях пониженной концентрации плазмы. Там же, естественно, более эффективно возбуждаются плазменные волны и ускоряются электроны, в результате столкновений с которыми появляются атомы в состояниях $O(^1D)$ и $O(^1S)$. Эти неоднородности вытягиваются вдоль магнитного поля за пределы области возбуждения плазменных волн на 15–30 км. Также с самофокусировочной неустойчивостью связан эффект магнитного зенита — усиление модификации ионосферы при запираии пучка мощных радиоволн, направленного вдоль магнитных силовых линий, в вытянутой вдоль магнитного поля каверне (полости) электронной концентрации [22]. Такая модель получила подтверждение при анализе взаимного расположения пятен искусственного свечения

и областей пониженной электронной концентрации, исследования которых проводились с помощью измерений полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) при пролете навигационных спутников системы NAVSTAR над диаграммой направленности станда «Сура» во время измерений искусственного оптического свечения (рис. 2). Из приведенного рисунка видно, что в случае воздействия в направлении магнитного зенита положение области максимальной яркости свечения соответствовало минимальным значениям ПЭС. Такая же ситуация имела место при вертикальном воздействии.

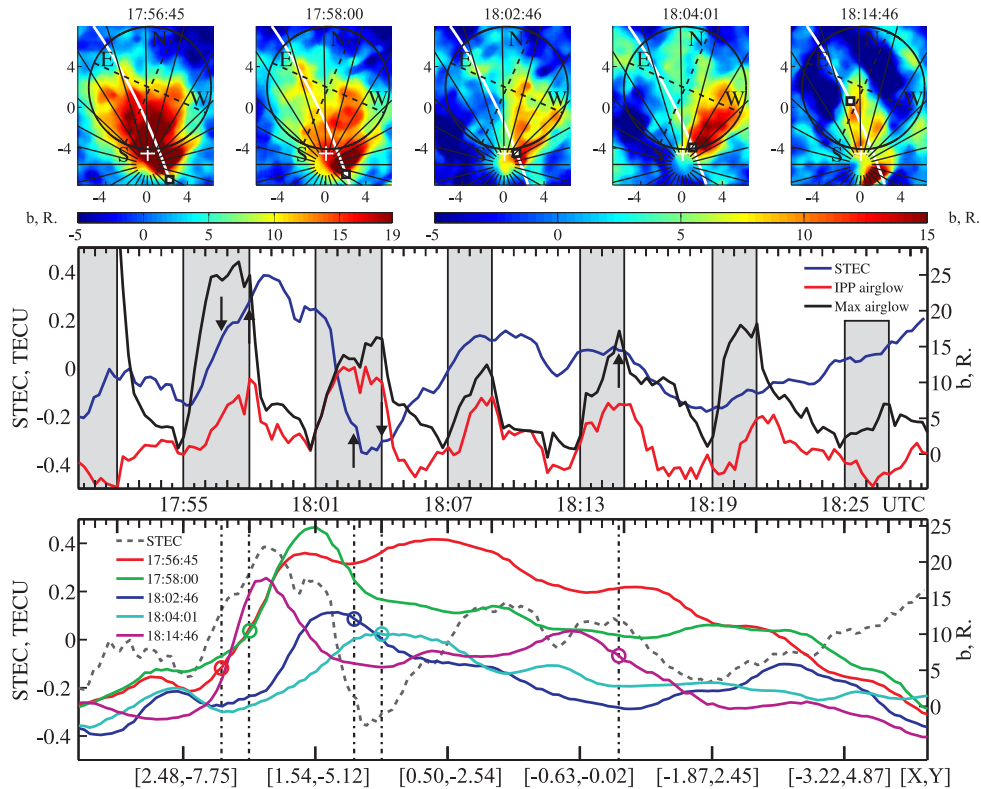


Рис. 2. Результаты совместных измерений ПЭС и искусственного оптического свечения в линии 630 нм (17.03.10) при наклоне ДН станда «Сура» на юг на 12° . На изображениях нанесены траектория (красная линия) и положение спутника GPS28 в моменты времени, отмеченные на средней панели вертикальными стрелками. Черной окружностью показана проекция главного лепестка диаграммы направленности станда «Сура» на плоскость кадра. Координаты указаны в угловых градусах поля зрения камеры, положение магнитного зенита отмечено белым крестом. Средняя панель — вариации ПЭС после удаления тренда (синяя линия), динамика интенсивности оптического свечения из области, соответствующей положению спутника в указанный момент времени (красная линия), и динамика максимальной яркости пятна свечения (чёрная линия). Серыми вертикальными прямоугольниками показано время работы передатчиков станда «Сура». Нижняя панель — распределение яркости свечения вдоль траектории подыоносферной точки спутника в моменты времени, соответствующие регистрации портретов, приведённых на верхней панели.

Приведенные на рис. 1, 2 портреты ночного неба в линии 630 нм получены с помощью ПЭС-камеры, расположенной в непосредственной близости от станда «Сура». При этом на портретах появляется проекция области генерации свечения на плоскость объектива камеры. Для получения представления об объемной структуре области генерации необходимо проводить многопозиционную регистрацию свечения. Первый такой эксперимент на станде «Сура» был проведен в августе 2014 г. Регистрация искусственного свечения проводилась в двух пунктах: в непосредственной близости от станда и в 170 км к востоку от него на территории магнитной обсерватории КФУ (55.56° с. ш., 48.45° в. д.). На рис. 3 приведена динамика высоты центра пятна свечения h_M в

эксперименте 24.08.2014, полученная по данным двухпозиционных измерений. Значения высоты отмечены маркерами, различные типы маркеров соответствуют различным моделям распределения яркости свечения. Рядом с каждым маркером сплошной линией дан интервал высот, на котором концентрация возбуждённых атомов кислорода выше уровня $1/e$ от максимальной. Синими линиями показана динамика высоты отражения волны накачки h_r (сплошная линия) и высоты верхнегибридного резонанса волны накачки $h_{ВГ}$ (пунктирная линия). Чёрными прямоугольниками в нижней части рисунка обозначены интервалы включения волны накачки. В результате экспериментов установлено, что высота центра области генерации свечения равнялась примерно 250 км и не зависела от высоты резонансов волны накачки. Характерный размер области составлял ~ 35 км, а форма изоповерхностей распределения хорошо описывалась наклонными сферами или каплевидной формой.

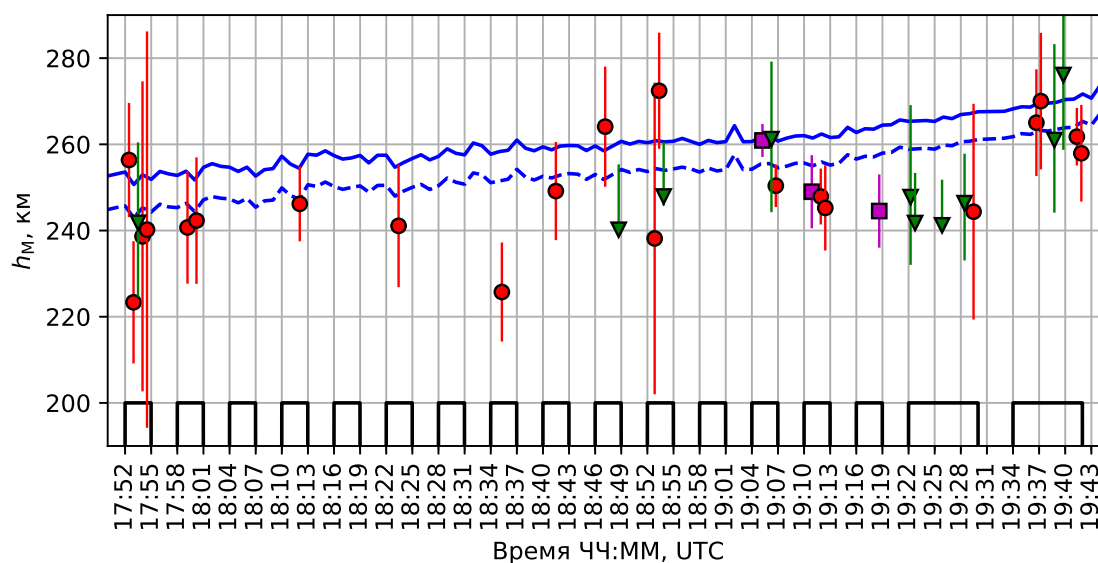


Рис. 3. Динамика высоты центра пятна свечения h_M и вертикального размера пятна в эксперименте 24.08.2014.

Генерация искусственного оптического свечения вследствие ускорения электронов обычно преобладает над подавлением фонового свечения ночной ионосферы вследствие температурной зависимости коэффициента диссоциативной рекомбинации. Однако, при послезаходном снижении критической частоты F -слоя до значений, превышающих частоту волны накачки не более, чем на 0.5 МГц, генерация искусственного свечения заметно убывает, и подавление фонового свечения обнаруживается в эксперименте. Такая же ситуация имеет место при уменьшении эффективной мощности станда. На рис. 4 продемонстрирован пример записи фотометра, на которой хорошо видна смена генерации свечения на его подавление (приблизительно в 21:40 LT, в этот момент упала мощность излучения). После выключения волны накачки наблюдается наоборот, временное увеличение фонового свечения, которое регистрируется и в тех случаях, когда генерация искусственного свечения во время воздействия преобладает.

Важным для построения адекватной физической модели искусственной турбулентности ионосферы являются а) зависимость наблюдаемых явлений от соотношения частоты волны накачки и гармоник электронной циклотронной частоты, и б) определение энергетических характеристик ускоренных электронов и того, какие именно электростатические волны их ускоряют. На рис. 5 приведена зависимость яркости свечения в красной и зеленой линиях атомарного кислорода (630 нм и 557.7 нм) в зависимости от разницы частоты волны накачки и 4-й гармоники гирочастоты электронов, полученная в экспериментах, проведенных в сентябре 2014 г. При вертикальном излучении волны накачки какой-либо регулярной зависимости яркости свечения в

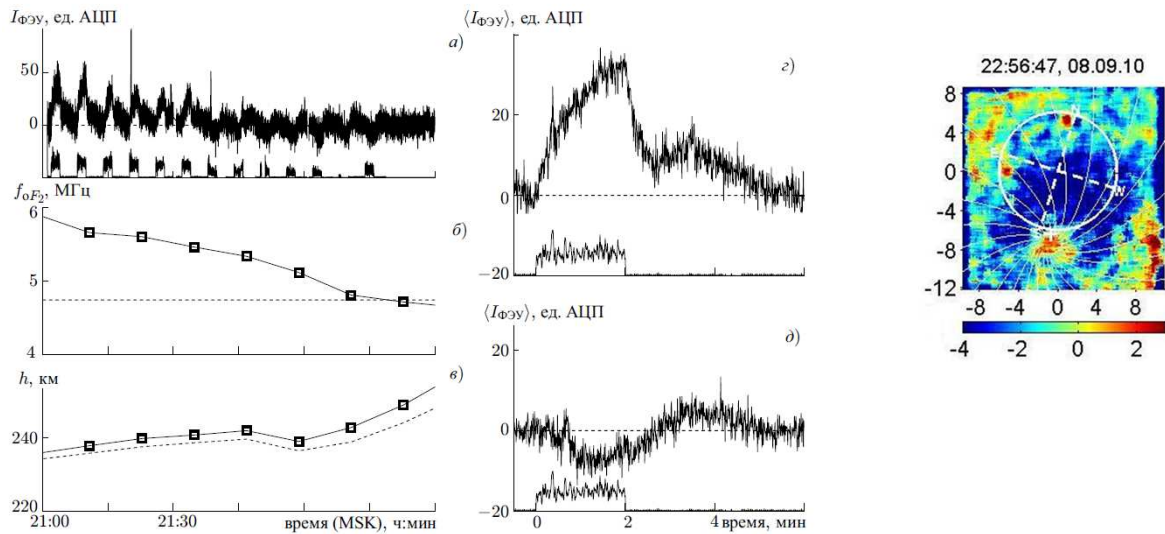


Рис. 4. Временные вариации яркости свечения 08.09.2010 после вычитания естественного фонового уровня (а), критической частоты ионосферы f_oF2 (б), высот отражения волны накачки (сплошная линия, в) и верхнегибридного резонанса (штриховая линия, в). Частота волны накачки 4.375 МГц (штриховая линия, б), наклон диаграммы направленности равен 12° к югу. На панели ε — средняя по 6 циклам вариация свечения в интервале 21:01–21:37 MSK, на панели δ — средняя по 7 циклам вариация свечения в интервале 21:37–22:19 MSK Справа — портрет ночного неба, на котором ясно различаются области подавления и генерации (вблизи магнитного зенита) свечения в линии 630 нм.

красной линии от отстройки Δf в диапазоне $-15 < \Delta f [\text{кГц}] < 280$ отмечено не было. В зелёной линии свечение наблюдалось, если только частота волны накачки находилась непосредственно вблизи циклотронной гармоники, при $-15 < \Delta f [\text{кГц}] < 5$, и в диапазоне сильного излучения, $230 < \Delta f [\text{кГц}] < 280$. Причём во втором диапазоне отстроек искусственное свечение в зелёной линии было наиболее интенсивным.

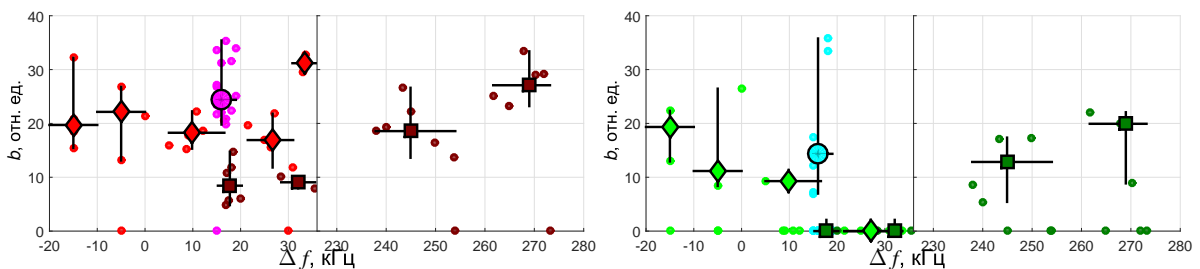


Рис. 5. Максимальная по области возбуждения яркость свечения b в красной линии (630 нм, панель а) и зелёной линии (557.7 нм, панель б) в зависимости от отстройки частоты волны накачки Δf от 4-й гармоники гирочастоты электронов ($4f_c$) в экспериментах 11, 13 и 14 сентября 2012 года. Кружки соответствуют экспериментам 11.09.12 (наклонное излучение вн на юг), квадраты — 13.09 и ромбы — 14.09 (вертикальное излучение).

На рис. 6 показана фотометрическая кривая в зелёной линии атомарного кислорода, зарегистрированная телескопом АЗТ-14, расположенным в 170 км к востоку от стенда «Сура», при воздействии на ионосферу импульсами с длительностью 5 мс и периодом повторения 10 с. В канале регистрации оптического излучения использовалось суммирование по периодам повторения

импульсов воздействия, что дало улучшение отношения сигнал/шум и уменьшение случайных флуктуаций яркости неба. Видно увеличение яркости свечения на 15–20% от среднего уровня, инициированное волной накачки. При таких режимах воздействия возбуждаются только ленгмюровские волны, распространяющиеся вдоль \mathbf{B} , которые обеспечивали необходимое ускорение электронов.

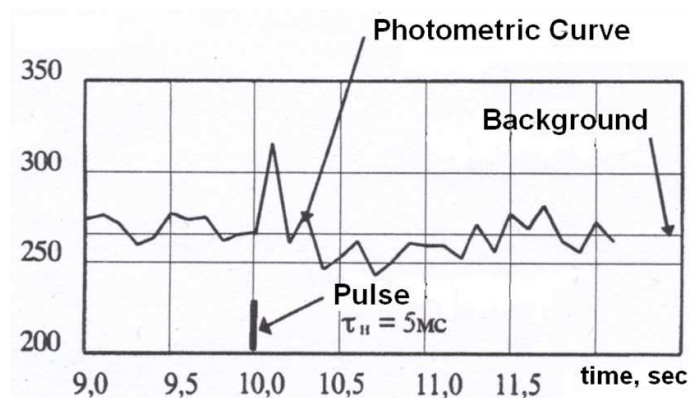


Рис. 6. Фотометрическая кривая возмущенной области ионосферы в линии 557.7 нм. 20.07.1983.

Другой характер генерации свечения в линии 557.7 нм имел место в эксперименте, представленном на рис. 7. Здесь на панели *a)* показана фотометрическая кривая в зелёной линии, (телескоп АЗТ-14) в течение отрезка времени, соответствующего прозрачному прямоугольнику на оси времени на панели *c)*; на панели *b)* — характерное время релаксации искусственного радиоизлучения ионосферы, измеренное в эксперименте, на панели *c)* — интенсивность искусственного радиоизлучения (SEE). Стенд «Сура» излучал на частоте 5.32 МГц в режиме чередования импульсов с длительностью 20 мс и периодом повторения 2 с и непрерывного излучения (в течение 1 мин., черный прямоугольник на оси времени). Поведение представленных параметров свидетельствует о том, что зарегистрированное свечение (модуляция фона) имела место во время импульсного воздействия и была связана с ускорением электронов верхнегибридными волнами.

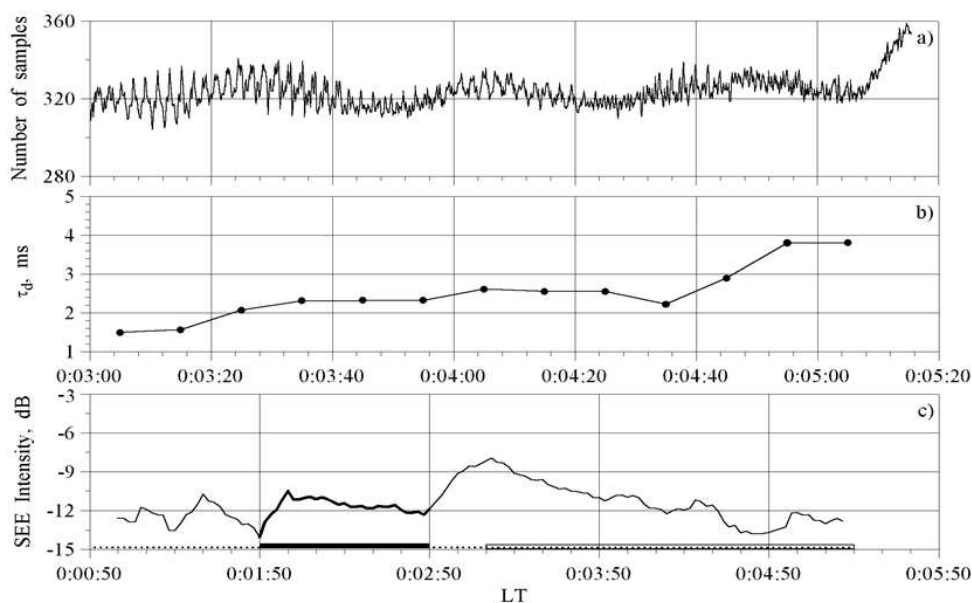


Рис. 7. Одновременные наблюдения свечения ионосферы в линии 557.7 нм и искусственного радиоизлучения ионосферы 22.08.2001.

Наконец, в единичном сеансе воздействия 26.08.2014 г. нам удалось зарегистрировать свечение в линии 427.8 нм с высоким порогом возбуждения 18.6 эВ (рис. 8).

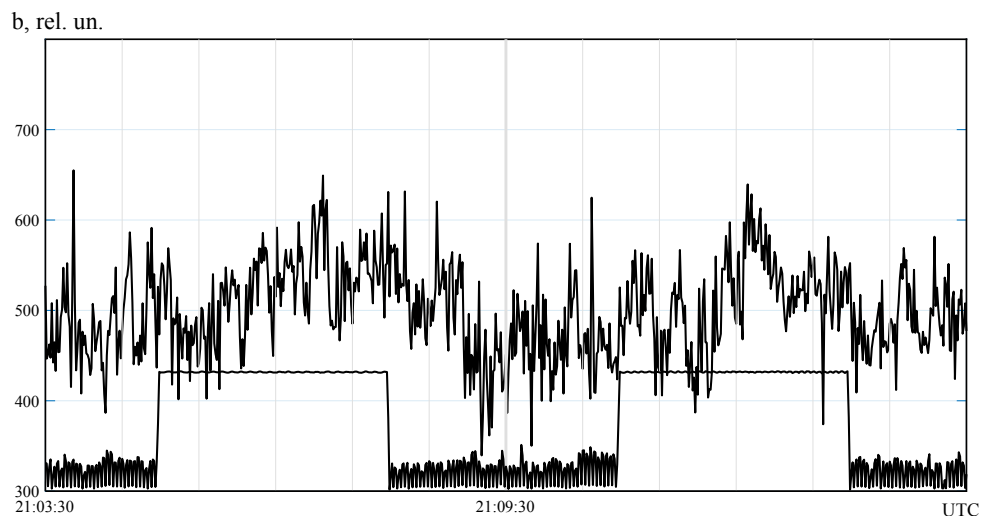


Рис. 8. Фотометрическая кривая в линии 427.8 нм. Стенд «Сура», 26.08.2014.

Заключение

В докладе дан краткий обзор данных измерений оптического свечения ионосферы при воздействии на нее радиоизлучением стенда «Сура». В обзор не вошли результаты, полученные в сотрудничестве с иностранными коллегами. Следует отметить, что научный потенциал исследований оптического свечения возмущенной ионосферы к настоящему времени далеко не исчерпан. Новых интересных результатов следует ожидать в ближайшие несколько лет, когда будет иметь место увеличение солнечной активности. При этом важным является одновременное использование оптических и радио методов исследований возмущенной области ионосферы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проекты № 17–72–10181 (в части двухпозиционных измерений оптического свечения) и № 14–12–00706).

Список литературы

1. Utlaut W. F., Cohen R. Modifying the Ionosphere with Intense Radio Waves // *Science*. — 1971. — Vol. 174, No. 4006. — P. 245.
2. Bernhardt P. A., Duncan L. M., Tepley C. A. Artificial airglow excited by high-power radio waves // *Science*. — 1988. — Vol. 242. — P. 1022–1027.
3. Pedersen T. R., Carlson H. C. First observations of HF heater-produced airglow at the high frequency active auroral research program facility: thermal excitation and spatial structuring // *Radio Sci.* — 2001. — Vol. 36. — P. 1013–1026.
4. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F. et al. Ionospheric electron heating, optical emissions and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: aspect angle dependence // *J. Geophys. Res.* — 2003. — Vol. 108, No. 4. — P. 1141, doi:10.1029/2002JA009543.
5. Djuth F. T., Pedersen T. R., Gerken E. A. et al. Ionospheric modification at twice the electron cyclotron frequency // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Vol. 94 — Art. no. 125001
6. Gustavson B., Sergienko T., Kosch M. J. et al. // *Ann. Geophys.* — 2005. — Vol. 23. — P. 1 747.
7. Ashrafi M., Kosch M. J., Isham B., Kaila K. Spatio-temporal evolution of HF-induced artificial optical emissions, radar backscatter and Stimulated Electromagnetic Emissions at EISCAT // *J. Geophys. Res.* — 2007 — Vol. 112. — A05314, doi:10.1029/2006JA011938.

8. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E. et al. Optical ring formation and ionization production in high-power HF heating experiments at HAARP // *Geophys. Res. Lett.* — 2009. — Vol. 36. — Art. no. L18107, doi:10.1029/2009GL040047.
9. Kvammen A., Gustavsson B., Sergienko T., Brändström U., Rietveld M., Rexer T., Vierinen J. The 3-D distribution of artificial aurora induced by HF radio waves in the ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 2019. — Vol. 124, <https://doi.org/10.1029/2018JA025988>
10. Bernhardt P. A., Wong M., Huba J. D. et al. Optical remote sensing of the thermosphere with HF pumped artificial airglow // *J. Geophys. Res.* — 2000. — Vol. 105. — P. 10657–10671.
11. Kosch M. J., Pedersen T., Rietveld M. et al. Artificial optical emissions in the high-latitude thermosphere induced by powerful radio waves: An observational review // *Advances in Space Research.* — 2007. — Vol. 40. — P. 365–376.
12. Гумеров Р. И., Капков В. Б., Комраков Г. П., Насыров А. М. Искусственное свечение ионосферы при кратковременном воздействии мощного радиоизлучения // *Изв. вузов. Радиофизика.* — 1999. — Т. 42, № 6. — С. 524–527.
13. Grach S. M., Sergeev E. N., Nasyrov A. M. et al. Simultaneous observations of the 557.7 nm airglow and stimulated electromagnetic emission during HF pumping of the ionosphere with diagnostic schedule: First results // *Adv. Space Res.* — 2004. — Vol. 34, No. 11. — P. 2422–2427.
14. Grach S. M., Kosch M. J., Yashnov V. A. et al. On the location and structure of the artificial 630-nm airglow patch over Sura facility // *Annales Geophysicae.* — 2007. — Vol. 25, Iss. 3. — P. 689–700. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-689-2007>
15. Грач С. М., Клименко В. В., Шиндин А. В. и др. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением станда «Сура»: результаты экспериментов 2010 года // *Известия вузов. Радиофизика.* — 2012. — Т. 55, № 1–2. — С. 36–56.
16. Грач С. М., Насыров И. А., Когогин Д. А. и др. О связи пространственного поведения полного электронного содержания ионосферы на трассе GPS-сигналов и искусственного оптического свечения ионосферы в линии 630 нм // *Известия вузов. Радиофизика.* — 2018. — Т. 61, № 3. — С. 181–197.
17. Grach S. M., Nasyrov I. A., Kogogin D. A. et al. Mutual allocation of the artificial airglow patches and large-scale irregularities in the HF-pumped ionosphere // *Geophysical Research Letters.* — 2018. — Vol. 45, Iss. 23. — P. 12,749–12,756 — <https://doi.org/10.1029/2018GL080571>
18. Gumerov R. I., Nasyrov I. A. et al. Photometry of artificial airglow emission of the ionosphere stimulated by "Sura" facility radiation // *Conference Proceedings — 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017* — 8103578. — P. 105–108.
19. Шиндин А. В., Грач С. М., Клименко В. В. и др. Оптическое свечение на длинах волн 630 и 557,7 нм при воздействии на ионосферу коротковолновым излучением станда «Сура» в области 4-й гармоники электронного гирорезонанса // *Известия вузов. Радиофизика.* — 2014. — Т. 57, № 11. — С. 849–864.
20. Шиндин А. В., Клименко В. В., Когогин Д. А. и др. Пространственные характеристики области генерации искусственного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии радиоизлучением станда «Сура» // *Известия вузов. Радиофизика.* — 2017. — Т. 60, № 11. — С. 949–966.
21. Грач С. М., Сергеев Е. Н., Мишин Е. В., Шиндин А. В. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения // *УФН.* — 2016. — Т. 186, № 11. — С. 1189 – 1228.
22. Gurevich A. V., Carlson H., Zybin K. P. Nonlinear structuring and southward shift of a strongly heated region in ionospheric modification // *Physics Letters A* — 2001. — Vol. 288. — P. 231–239.