

УДК 533.951+621.371

ОПТИЧЕСКОЕ СВЕЧЕНИЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРУ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 2010 ГОДА

С. М. Грач^{1,2}, В. В. Клименко³, А. В. Шиндин^{1,2}, И. А. Насыров⁴,
Е. Н. Сергеев², В. А. Яшинов¹, Н. А. Погорелко¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского;

² Научно-исследовательский радиофизический институт;

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Представлены результаты исследований структуры и динамики возмущённой области ионосферы над стендом «Сура», выполненных в течение 2010 года с помощью измерений оптического свечения ночного неба в красной ($\lambda = 630$ нм) и зелёной ($\lambda = 557,7$ нм) линиях атомарного кислорода. В качестве дополнительной диагностики параметров ионосферы и процессов, протекающих в возмущённой области, использовались данные вертикального зондирования ионосферы (с последующим моделированием распространения волны накачки) и измерений искусственного радиоизлучения ионосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие мощных радиоволн на свечение ионосферы в оптическом диапазоне широко исследуется в экспериментах начиная с 70-х годов XX века [1–29], в том числе на стенде «Сура» [20–29]. Оптическое излучение возникает при переходе электронов с возбуждённых уровней атомов, молекул и ионов ионосферы на более низкие энергетические уровни. Возбуждение соответствующих уровней происходит при столкновениях атомов с электронами, энергия которых превышает потенциал возбуждения уровней, а также в результате ионно-молекулярных реакций, где высвобождается энергия, достаточная для возбуждения одного из атомов, в частности при диссоциативной рекомбинации молекул.

Увеличение интенсивности оптического свечения ионосферы при воздействии радиоволны накачки обыкновенной поляризации (далее — искусственное оптическое свечение) связано с ускорением электронов плазменными волнами, возникающими при развитии различных параметрических неустойчивостей. По измерениям искусственного оптического свечения на различных длинах волн (соответственно, с различными потенциалами возбуждения) можно судить о функции распределения и концентрации таких электронов [4, 11, 16]. Искусственное оптическое свечение измеряют также для изучения положения пятна свечения на небосводе в зависимости от наклона диаграммы направленности нагревного стенда, неоднородной структуры возмущённой области, перемещений плазмы в возмущённой области ионосферы, для исследований зависимости эффективности ускорения электронов от положения частоты волны накачки f_0 относительно гармоник электронной циклотронной частоты nf_{ce} в ионосфере, для регистрации искусственной ионизации в возмущённой области [5, 6, 8, 13, 21, 27, 30].

Основные измерения проводят в красной (с длиной волны $\lambda = 630$ нм) и зелёной ($\lambda = 557,7$ нм) линиях атомарного кислорода, связанных с переходом электронов с уровня $O(^1D)$ в основное состояние $O(^3P)$ и с уровня $O(^1S)$ на уровень $O(^1D)$. Энергии возбуждения уровней $O(^1D)$ и $O(^1S)$ составляют 1,96 эВ и 4,17 эВ соответственно, а их радиационные времена жизни — $\tau_r(O^1D) = 107$ с и $\tau_r(O^1S) = 0,7$ с.

В то же время в ряде экспериментов отмечалось, что воздействие на ионосферу может приводить к подавлению интенсивности свечения в красной линии. Такой эффект существует при воздействии на ионосферу радиоволнами как обыкновенной, так и необыкновенной поляризации и связан с уменьшением скорости диссоциативной рекомбинации в результате омического нагрева электронов и, следовательно, с уменьшением концентрации атомов в состоянии $O(^1D)$ [1–3, 17].

Первые эксперименты по исследованию искусственного оптического свечения на стенде «Сура» были проведены в 1983 году с помощью телескопа АЗТ-14, расположенного в 170 км к востоку от стенда в Астрономической обсерватории Казанского государственного университета (в настоящее время — Казанского (Приволжского) федерального университета). В этих экспериментах измерялась яркость свечения в линии с длиной волны 557,7 нм при воздействии импульсным радиоизлучением с большой скважностью [23]. 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 [20, 21, 27].

Начиная с 2006 года на стенде «Сура» создавался фотометрический комплекс, позволяющий проводить самостоятельные измерения оптического свечения ночной ионосферы. Первые серии экспериментов с его помощью проведены в 2006–2008 годах. Однако в силу аномально низкой солнечной активности в эти годы и, следовательно, низких критических частот ионосферы в послезакатные часы, искусственное оптическое свечение было зарегистрировано всего в нескольких сеансах воздействия на ионосферу. В 2010 году после заметного подъёма солнечной активности, эксперименты оказались более удачными.

В настоящей статье дан обзор результатов исследований оптического свечения ионосферы под действием мощных радиоволн, проведённых на стенде «Сура» в 2010 году. Далее в разделе 1 кратко описана методика эксперимента, в разделах 2.1, 2.2 — результаты исследований оптического свечения в красной линии атомарного кислорода (переход $O(^1D) \rightarrow O(^3P)$), в разделе 2.3 — результаты исследований свечения в зелёной линии (переход $O(^1S) \rightarrow O(^1D)$). В заключительном разделе кратко обсуждаются полученные результаты.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для создания возмущённой области ионосферы с помощью излучения мощной радиоволны коротковолнового диапазона использовался радиопередающий комплекс стенда «Сура» (географические координаты 56,15° с.ш, 46,10° в.д, восточное магнитное склонение 10,5°, магнитное склонение 71,5°). Воздействие на ионосферу осуществлялось в режиме чередования квазинепрерывного излучения волны накачки в течение 1,5÷3 минут и импульсного излучения с большой скважностью (длительность импульсов $\tau_p = 10\div 30$ мс, период повторения $T_p = 1\div 3$ с) на частотах $f_0 = 4\,300$ кГц (15–17 марта 2010 года), $f_0 = 4\,785$ кГц (13–15 мая 2010 года), 4 375 и 4 740 кГц (3–10 сентября 2010 года). Кроме того, в эксперименте 07.09.2010 при достаточно высоких критических частотах ионосферы сначала (21:00–22:25 LT) использовались частоты $f_0 = 5\,375$ и 5 355 кГц, а затем, после перестройки передатчиков стенда — 4 740 кГц (22:49–23:15 LT).

Квазинепрерывное излучение представляло собой последовательность импульсов с длительностью 970 мс и периодом повторения 1 с. Эффективная мощность излучения стенда варьировалась в пределах от 60 до 100 МВт. Диаграмма направленности стенда в экспериментах 15.03, 16.03 и 03–05.09.2010 была ориентирована вертикально вверх, 17.03, 13.05–15.05, 07.09 и 08.09.2010 наклонена на 12°, а 09.09 и 10.09.2010 — на 16° к югу в плоскости магнитного меридиана.

Все оптические инструменты располагались в непосредственной близости (на расстоянии приблизительно 1 км) от передающей антенны стенда. В соответствии с положением диаграммы направленности стенда они выставлялись в зенит или наклонялись на 15° и 18°÷19° от зенита

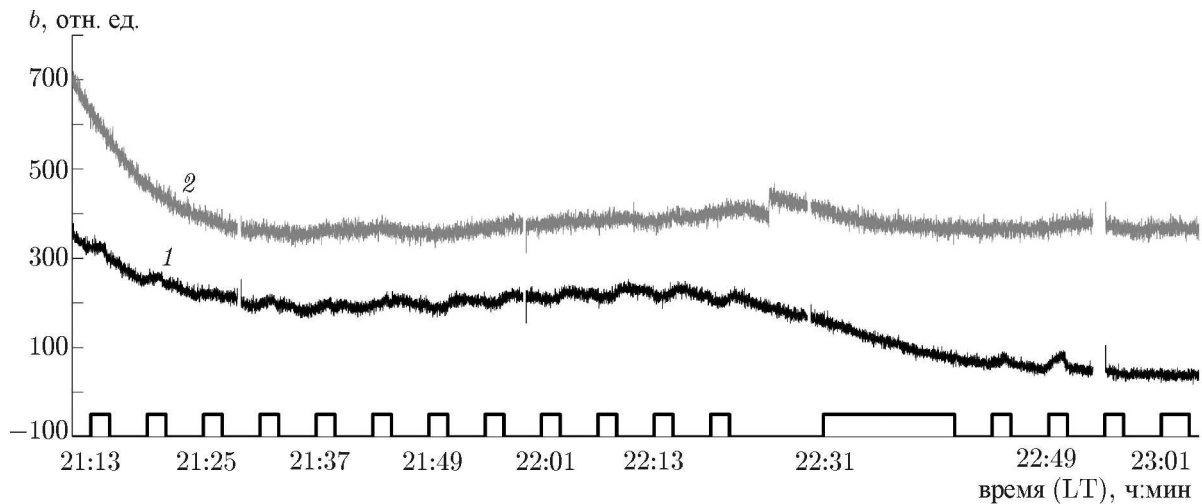


Рис. 1. Временной ход яркости свечения ионосферы в линии 630 нм (кривая 1) и 557,7 нм (кривая 2) в эксперименте 07.09.2010, текущее усреднение данных по 0,5 с. Прямоугольниками внизу рисунка отмечено время квазинепрерывного излучения стенда «Сура»

на юг. Измерения проводились в тёмное время суток при безоблачном небе в период, близкий к новолунию. Они начинались приблизительно через полтора часа после захода солнца с наступлением астрономических сумерек и продолжались при ясной погоде до падения критической частоты ионосферы ниже рабочей частоты стенда. После этого рабочая частота стенда «Сура» могла перестраиваться вниз в соответствии с ионосферными условиями (минимальная рабочая частота стенда составляет $f_{\min} = 4300$ кГц).

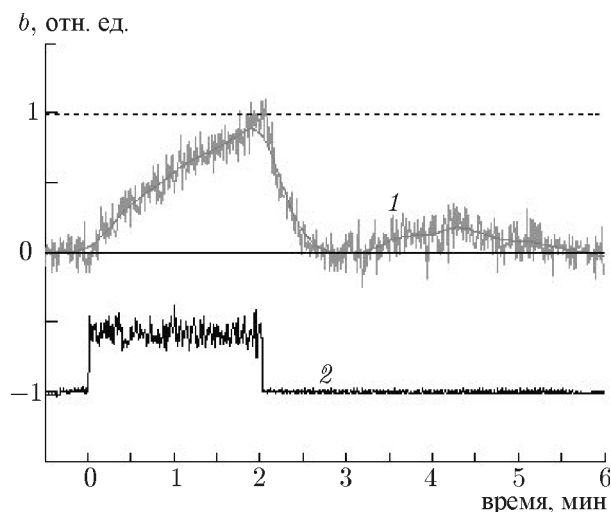


Рис. 2. Кривая 1 — временной ход яркости свечения в линии 630 нм (сигнал фотометра), усреднение по 11 последовательным сеансам воздействия. Кривая 2 — временной ход излучения стенда «Сура» (вертикальное излучение нагревной волны с частотой $f_0 = 4740$ кГц в 21:49–22:55 LT, 05.09.2010)

(21:49–22:25 LT), и 4740 кГц (с 22:31 LT до конца работы). С 22:21 до 22:37 LT осуществлялась перестройка несущей частоты передатчиков стенда и подстройка их фазы.

Измерения интегральной интенсивности оптического свечения проводились с помощью фотометров с интерференционными светофильтрами на длины волн $\lambda = 630$ и 557,7 нм с шириной полосы пропускания $\Delta\lambda_{0,5} = 2,3$ нм и коэффициентом пропускания 50 %. Поле зрения фотометров составляет соответственно $6,8^\circ$ и 4° , постоянная времени выходного фильтра низких частот фотометров (время накопления) — 1 мс, частота оцифровки сигнала — 1 кГц. При обработке и анализе данные усреднялись на временных интервалах $0,25 \div 0,5$ с, что позволяло отслеживать временной ход яркости свечения.

Пример регистрации свечения ионосферы в красной (кривая 1) и зелёной (кривая 2) линиях с помощью фотометров в течение практически всего времени эксперимента 07.09.2010 с 21:12:00 до 23:04:30 LT представлен на рис. 1. Прямоугольниками на оси времени отмечено время квазинепрерывного излучения стенда «Сура» на частотах $f_0 = 5375$ кГц (21:12–21:49 LT), 5355 кГц (21:49–22:25 LT), и 4740 кГц (с 22:31 LT до конца работы). С 22:21 до 22:37 LT осуществлялась перестройка несущей частоты передатчиков стенда и подстройка их фазы.

В начале эксперимента замечен спад яркости свечения в обеих линиях, связанный с уменьшением освещённости небосвода из-за захода Солнца, а также увеличение яркости приблизительно с 21:30 до 22:30 LT из-за прохождения Млечного пути через поле зрения фотометров. Ясно видна также модуляция яркости свечения в красной линии в такт с излучением стенда «Сура», в зелёной линии такого эффекта не наблюдается. Увеличение свечения в красной линии при воздействии излучения хорошо видно на рис. 2, где приведён временной ход яркости, усреднённый по 11 последовательным 6-минутным циклам в эксперименте 05.09.2010.

Изображения ночного неба в красной линии атомарного кислорода регистрировались с помощью ПЗС-камеры S1C/079-FP(FU), оснащённой светофильтром на длину волны $\lambda = 630$ нм (полоса пропускания $\Delta\lambda_{0,5} = 10$ нм, коэффициент пропускания 65 %) и светосильным объективом NC-2 (отношение апертуры объектива к фокусному расстоянию 1 : 1, фокусное расстояние 35 мм) с полем зрения $20,6^\circ$. Изображение в фокальной плоскости фиксировалось на ПЗС-матрице с размером $12,6 \times 12,6$ мм (576×578 пикселей), размер пикселя составляет 22 мкм. Во время работы камеры время экспозиции составляло 15 с и применялось бинирование по четырём пикселям в группе 2×2 . Видеосигнал регистрировался и обрабатывался с помощью 14-битного аналого-цифрового преобразования.

Дальнейший анализ изображений сводился к следующему. С помощью специально созданной (при регистрации снимков белой равномерно освещённой матовой поверхности) матрицы коррекции яркости устранялась регулярная неравномерность освещённости по полю зрения, вносимая объективом; с помощью карты звёздного неба определялась ориентация камеры. Далее, из набора снимков выбирались опорные кадры, зарегистрированные непосредственно перед включением стенда «Сура», на которых заведомо отсутствовало влияние мощных радиоволн на яркость свечения. Для всех остальных снимков формировались темновые кадры с помощью усреднения с определёнными весами двух ближайших опорных кадров. При этом каждый из опорных кадров поворачивался в соответствии с вращением небесной сферы относительно полюса мира таким образом, чтобы положение звёзд на них совпало с положением звёзд на анализируемом снимке. Веса при суммировании определялись интервалами времени между анализируемым снимком и опорными кадрами.

После этого из анализируемого кадра вычитался темновой кадр. В результате достигалась плавная компенсация излучения звёзд и фонового свечения атмосферы, и на итоговом изображении оставались только изменения яркости свечения, вызванные излучением стенда «Сура» и быстрыми изменениями прозрачности атмосферы и помехами (спутниками, метеорами и т. п.). И наконец, для сглаживания шумов использовалась текущая медианная фильтрация по полю снимка. Сравнение полученных изображений с картой звёздного неба и каталогом звёзд использовалось также для калибровки ПЗС-камеры и определения яркости свечения ночного неба. Примеры портретов ночного неба приведены на рис. 3–7.

Кроме того, в экспериментах использовался мобильный фотометрический комплекс Казанского (Приволжского) федерального университета, который обеспечивает одновременную регистрацию оптического свечения в линиях 557,7 и 630 нм, точную привязку времени системы к мировому времени UTC посредством приёма сигналов ГЛОНАСС/GPS и синхронный с оптическими измерениями приём радиосигналов стенда «Сура» по коротковолновому каналу.

В качестве дополнительной диагностики параметров ионосферы и процессов, протекающих в возмущённой области, использовались данные вертикального зондирования ионосферы (с последующим моделированием распространения волны накачки) и измерений искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Напомним, что искусственное радиоизлучение представляет собой слабую шумовую компоненту с характерной структурой в спектре отражённого от ионосферы сигнала волны накачки и является продуктом трансформации плазменных волн в элек-

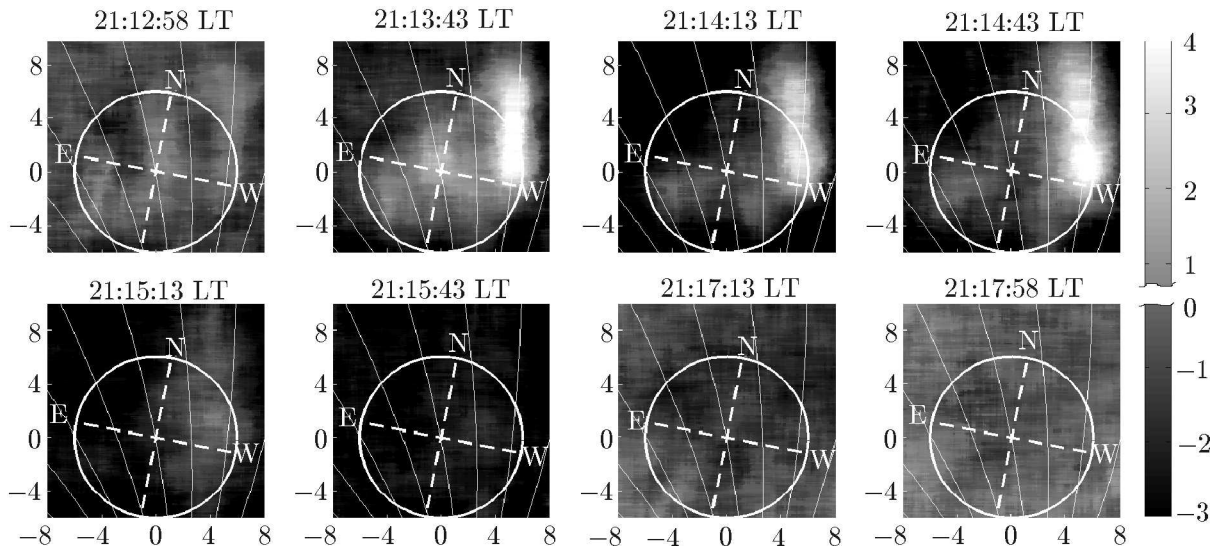


Рис. 3. Последовательность изображений ночного неба во время и после окончания двухминутного квазинепрерывного воздействия на ионосферу радиоизлучением стенда «Сура» 04.09.2010 (вертикальное излучение нагревной волны с частотой $f_0 = 4375$ кГц). Координаты по осям указаны в градусах поля зрения камеры, яркость — в единицах АЦП камеры после вычитания темнового кадра, 1 единица соответствует примерно 2,6 Рл. Как и на рис. 4–6, начало координат соответствует прямолинейной проекции центрального луча диаграммы направленности стенда «Сура» на небосвод, белая окружность — границам диаграммы ($12^\circ \times 12^\circ$). Показаны также географические стороны света и проекции силовых линий геомагнитного поля на небосвод. Время экспозиции — 15 с, указанное сверху снимков время соответствует началу экспозиции

тромагнитные в возмущённой области ионосферы. Аппаратура для регистрации ИРИ в широком диапазоне частот (до 300 кГц) с высоким временным разрешением (не хуже 0,5 мс) описана, например, в [31].

Режимы излучения стенда «Сура» подбирались с учётом характерных времён физических процессов, протекающих в возмущённой области ионосферы с учётом следующих соображений. Во-первых, длительность квазинепрерывной последовательности импульсов с малой скважностью ($\tau_q = 1,5 \div 3,0$ мин) заметно превышает характерное время возбуждения ($1 \div 10$ с) мелко-масштабных ($l_\perp \sim 1 \div 50$ м) вытянутых вдоль магнитного поля ($l_\parallel \sim 5 \div 30$ км) неоднородностей электронной концентрации и плазменных (верхнегибридных) волн в процессе развития тепловой параметрической неустойчивости [32–34] и достаточна для возбуждения крупномасштабных ($l_\perp \sim 1 \div 10$ км) неоднородностей плазмы в результате самофокусировочной неустойчивости [35–38]. Во-вторых, величина τ_q сравнима с радиационным временем жизни $\tau_r(O(^1D))$. Таким образом, за время излучения квазинепрерывного радиосигнала (квазинепрерывной посылки) успевают развиваться искусственная верхнегибридная турбулентность и крупномасштабные неоднородности плазмы, а яркость свечения в красной линии — достигнуть уровня, близкого к стационарному.

За время короткой паузы (30 мс) во время квазинепрерывной посылки неоднородности электронной концентрации и яркость свечения в линиях 630 и 557,7 нм практически не релаксируют, тогда как плазменные волны успевают полностью затухнуть (за $3 \div 10$ мс), а время их возбуждения и выхода на стационарный уровень интенсивности после включения волны накачки при «приготовленных» мелко-масштабных неоднородностях плазмы составляет всего $1 \div 10$ мс [39].

При переходе от квазинепрерывного режима воздействия к импульсному с большой скважностью средняя мощность волны накачки оказывается недостаточной для поддержания мелко-масштабных неоднородностей плазмы, и они релаксируют за характерное время порядка $1 \div 20$ с

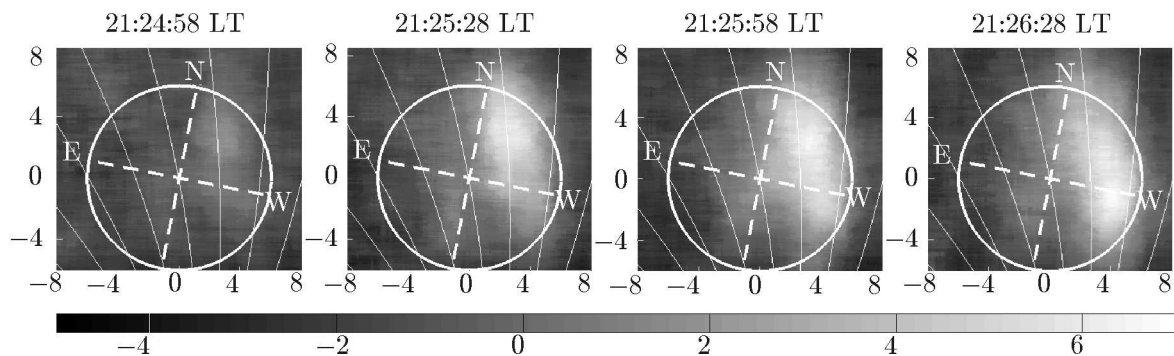


Рис. 4. Последовательность изображений ночного неба во время двухминутного квазинепрерывного воздействия на ионосферу радиоизлучением стенда «Сура» 04.09.2010 на частоте $f_0 = 4375$ кГц, сеанс 21:25:00–25:31:00 LT

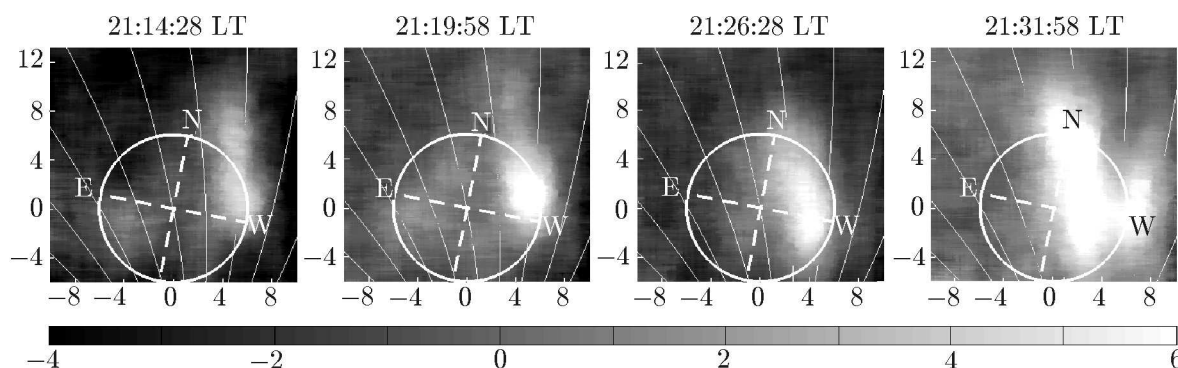


Рис. 5. Оптические изображения ночного неба, зарегистрированные 04.09.2010 во второй половине 4-х последовательных 2-минутных квазинепрерывных посылок радиоизлучения стенда «Сура» (период повторения посылок 6 минут)

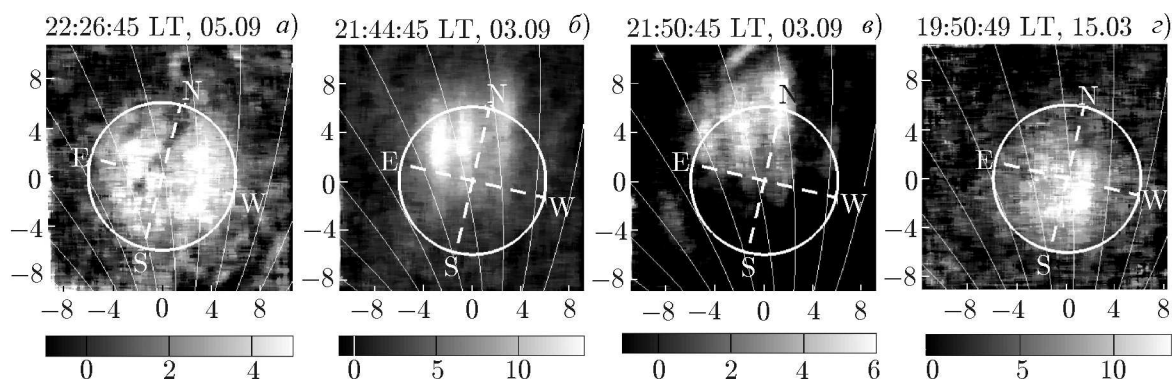


Рис. 6. Примеры оптических изображений, зарегистрированных 03–05.03.2010 (a–в) и 15.03.2010 (z) в конце двухминутных квазинепрерывных посылок радиоизлучения стенда «Сура» для различных ионосферных условий. Время и дата регистрации изображений указаны сверху рисунков. Одна единица АЦП камеры соответствует приблизительно 2,7 Рл 03.09.2010 и 05.09.2010 (a–в) и 3,2 Рл 15.03.2010 (z)

(в тёмное время суток времена релаксации заметно увеличиваются и могут превышать 100 с). В то же время, мощности и длительности короткого импульса хватает для возбуждения интенсивных верхнегибридных волн при рассеянии волны накачки на релаксирующих неоднородностях. Измерения искусственного радиоизлучения ионосферы при таких режимах воздействия позволяют эффективно диагностировать верхнегибридную турбулентность, см. например [24, 39–43].

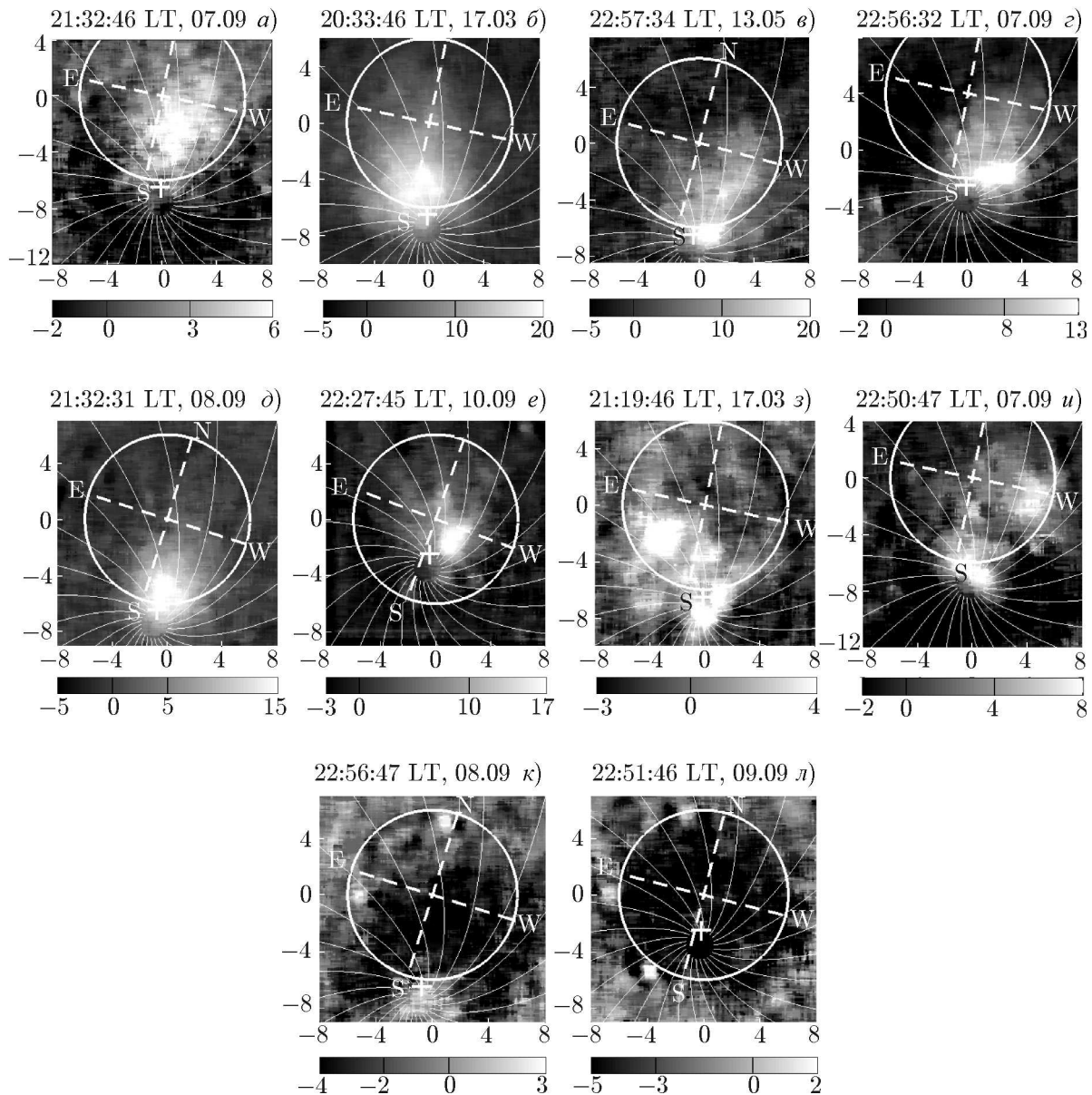


Рис. 7. Примеры оптических изображений, зарегистрированных в 2010 году в конце двухминутных квазинепрерывных посылок радиоизлучения при наклоне диаграммы направленности станда «Сура» на юг на 12° (а–д, з–к) и на 16° (е, л). Частоты волны накачки $f_0 = 5\,375$ кГц (а), $f_0 = 4\,300$ кГц (б, з), $f_0 = 4\,785$ кГц (в), $f_0 = 4\,740$ кГц (г, д, и), $f_0 = 4\,375$ кГц (е, у, к). Время и дата регистрации изображений указаны сверху панелей. Крест соответствует направлению луча зрения в магнитный зенит. Одна единица АЦП камеры соответствует приблизительно 2,4 Рл (а, б, г, з, и); 2,6 Рл (д, е, к, л) и 3,6 Рл (в)

После релаксации мелкомасштабных неоднородностей плазмы в паузе между квазинепрерывными посылками радиоизлучения станда (3÷4,5 мин в нашем эксперименте), либо при «холодном старте» (в отсутствие приготовленных мелкомасштабных неоднородностей) во время коротких радиоимпульсов в результате развития стрикционной параметрической неустойчивости эффективно возбуждаются ленгмюровские плазменные волны, ответственные за генерацию ряда спектральных компонент искусственного радиоизлучения ионосферы.

Как верхнегибридные, так и ленгмюровские плазменные волны могут эффективно ускорять электроны до энергий, превышающих потенциал возбуждения состояний атома кислорода $O(^1D)$ и $O(^1S)$, а длительности радиоимпульса $\tau_p \sim 20$ мс вполне достаточно для формирования стационарной функции распределения ускоренных электронов при достаточно протяжённой по высоте области взаимодействия волны накачки с ионосферной плазмой [44–48]. В то же время, длительность импульса τ_p мала по сравнению с радиационными временами жизни $\tau_r(O^1D)$ и $\tau_r(O^1S)$, и яркость оптического свечения ионосферы во время импульсного воздействия радиоволной должна быть ниже, чем во время квазинепрерывного нагрева, приблизительно в τ_p/τ_r раз. Если для красной линии отношение $\tau_p/\tau_r(O^1S) \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-4}$, и влияние волны накачки на яркость оптического свечения ионосферы во время импульсной работы нагревного стенда практически невозможно обнаружить, то для зелёной линии ожидаемое снижение яркости $\tau_p/\tau_r(O^1S) \approx 20$. В этом случае при достаточно чувствительной регистрирующей аппаратуре можно следить за корреляцией динамики искусственного радиоизлучения (и, следовательно, мелкомасштабных неоднородностей плазмы) и оптического свечения ионосферы. Оптическое свечение в зелёной линии во время воздействия короткими радиоимпульсами с большой скважностью наблюдалось в нескольких экспериментах [23–25].

Далее, в тёмное время суток крупномасштабные неоднородности электронной концентрации в ионосфере релаксируют заметно медленнее, и за 3–4,5 мин между квазинепрерывными посылками их амплитуда практически не изменяется. В то же время, крупномасштабная структура пятен искусственного оптического свечения ионосферы (или наоборот, области подавления свечения при воздействии короткой радиоволной) должна так или иначе коррелировать с крупномасштабной неоднородной структурой возмущённой области ионосферы. Таким образом, измерения оптического свечения в течение достаточно длительного времени (серии квазинепрерывных посылок мощного радиоизлучения с паузами) позволяют изучать как местоположение, форму и размеры неоднородностей электронной концентрации, так и их перемещение (дрейф) в ночной ионосфере [5, 15, 27].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Свечение в красной линии. Вертикальное излучение нагревной волны

15 и 16 марта и 3–5 сентября 2010 года диаграмма направленности стенда «Сура» была ориентирована вертикально вверх, аналогичным образом были выставлены оптические инструменты. Результаты исследований влияния мощной радиоволны на свечение в красной линии атомарного кислорода ($\lambda = 630$ нм) представлены на рис. 2–6. На рис. 2 приведён временной ход яркости свечения (в относительных единицах), усреднённого по 11-ти 6-минутным циклам воздействия (2 мин — квазинепрерывное излучение волны накачки, 4 мин — воздействие короткими импульсами), полученный в 21:49–22:55 LT 05.09.2010. На рис. 3 и 4 показана последовательность обработанных по описанной выше методике изображений ночного неба во время и после окончания двухминутных квазинепрерывных посылок радиоизлучения 04.09.2010, для циклов воздействия в 21:13:00–21:19:00 LT и 21:25:00–21:31:00 LT. Также, как и на последующих рисунках, время экспозиции одного изображения составляет 15 с, указанноеверху панелей время соответствует началу экспозиции. Направление на север соответствует верхнему краю изображения, на восток — левому. Координаты указаны в градусах поля зрения камеры, начало координат на изображениях соответствует прямолинейной проекции оси диаграммы направленности стенда «Сура» на небесную сферу, окружность — границам диаграммы шириной $12^\circ \times 12^\circ$ по уровню -3 дБ. Яркость оптического свечения показана в единицах АЦП камеры после вычитания темнового

кадра. Показаны также географические стороны света и проекции силовых линий геомагнитного поля на поле зрения камеры на высоте 250 км, построенные по модели IGRF [47]. Отметим, что на стенде «Сура» существует систематический сдвиг диаграммы направленности по отношению к номинальному примерно на 2° к югу, связанный, по-видимому, с уклоном поверхности Земли в месте расположения стенда [27], что необходимо учитывать при анализе снимков.

На рис. 5 представлены обработанные оптические изображения, зарегистрированные 04.09.2010 во второй половине 4-х последовательных двухминутных квазинепрерывных посылок (период повторения посылок — 6 минут), за 15÷45 секунд до их окончания. Различные моменты регистрации изображений в течение 6-минутного цикла, выбранных для представления, определялись с учётом помеховой обстановки. Примеры изображений, зарегистрированных 15 марта и 3–5 сентября 2010 года в конце двухминутных квазинепрерывных посылок при различных ионосферных условиях и имеющих различную структуру, представлены на рис. 6.

Из рис. 2 видно, что под действием мощного радиоизлучения яркость свечения в линии $O(^1D) \rightarrow O(^3P)$ увеличивается с характерным временем, близким к радиационному времени жизни $\tau_r(O(^1D))$, и 2-х минут воздействия недостаточно для насыщения уровня яркости. При 3-х минутных циклах квазинепрерывного воздействия стационарный уровень свечения достигался приблизительно за 2,5 минуты. Характерное время релаксации оптического свечения после выключения квазинепрерывной посылки радиоизлучения гораздо короче и составляет примерно 30 с, причём после релаксации оптического свечения наблюдается небольшое увеличение фоновое уровня яркости. Такой временной ход яркости свечения линии $O(^1D) \rightarrow O(^3P)$ (медленное нарастание, быстрая релаксация, затем кратковременный подъём фона или замедление релаксации) наблюдался в большинстве сеансов воздействия как при вертикальном, так и при наклонном падении волны накачки на ионосферу, причём время релаксации излучения варьировалось в пределах от 20 до 30 с.

Процесс развития и релаксации области свечения в ионосфере для сеанса 04.09.2010 в 21:13:00–21:19:00 LT показан на рис. 3. Видно, что искусственное оптическое свечение наблюдается уже в первые 15 с воздействия. Область свечения представляет собой серию полос (страт), вытянутых вдоль проекций силовых линий геомагнитного поля $\mathbf{B}$, с поперечными и продольными угловыми размерами $1^\circ \div 2^\circ$ и $8^\circ \div 10^\circ$ соответственно, причём свечение усиливается со временем только в одной из этих полос (западной). Видно также, что вокруг пятен искусственного свечения несколько снижается фоновая яркость.

После перевода нагревного стенда в импульсный режим (21:15:00 LT) наряду с быстрой релаксацией искусственного оптического свечения (оно практически не наблюдается уже на кадре с началом экспозиции в 21:15:43 LT) восстанавливается и даже несколько увеличивается фон. В сеансе воздействия 04.09.2010 в 21:25:00–21:31:00 LT (рис. 4) пятно искусственного свечения развивается по иному сценарию. Полоса свечения по-прежнему вытянута вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$ и сдвинута к западу относительно центра диаграммы направленности, но сначала, причём за достаточно короткое время $\tau < \tau_r(O(^1D))$, свечение развивается в северной части полосы. Максимальная по полю снимка яркость свечения $b \approx 20$ Рл достигается здесь через 50÷60 с после включения квазинепрерывного радиоизлучения примерно на 3° севернее центра диаграммы направленности стенда. Позднее, за время порядка $\tau_r(O(^1D))$ (правый кадр на рис. 4, зарегистрированный через 90÷105 с после включения квазинепрерывного радиоизлучения) максимальная яркость $b \approx 17,5$ Рл достигается практически на «экваторе» диаграммы направленности стенда, тогда как в северной части яркость несколько уменьшается. Такой сценарий развития оптического свечения наблюдался в нескольких сеансах воздействия и реализовывался при достаточно больших высотах точки отражения радиоволны в ионосфере. В частности, в экспериментах 04.09.2010 критическая частота ионосферы f_{0F_2} не поднималась выше 4,4 МГц, а высота отражения волны

накачки превышала 300 км.

Кроме этого, на последовательности 4-х кадров 04.09.2010, приведённых на рис. 5, «основное» пятно оптического свечения перемещалось от сеанса воздействия к сеансу на восток с небольшой угловой скоростью порядка $1^\circ \div 1,5^\circ$ за 6 минут, что соответствует линейной скорости примерно $7 \div 15$ м/с на высоте 250 км. На последнем кадре последовательности появилась дополнительная полоса свечения за западным краем проекции диаграммы направленности стенда «Сура». В дальнейшем (как установлено из последующих, не приведённых на рис. 5 снимков) именно в этой, «новой» полосе сосредотачивается основное искусственное оптическое свечение, и она дрейфовала от сеанса к сеансу на восток приблизительно с той же скоростью до конца наблюдений в 21:55 LT, когда критическая частота ионосферы f_{0F_2} опустилась ниже рабочей частоты стенда $f_0 = 4375$ кГц. Максимальная по полю снимка яркость искусственного оптического свечения варьируется на изображениях, приведённых на рис. 5, в пределах $b \approx 11 \div 24$ Рл над фоном. Минимальная яркость $b \approx 11$ Рл на первом снимке и дальнейшее её увеличение (по отношению к фоновой) связаны, скорее всего, с уменьшением фона свечения ночного неба во времени в после-заходные часы.

На рис. 6 представлены примеры портретов возмущённой области ионосферы в линии 630 нм, зарегистрированных 15.03, 03.09 и 05.09.2010 и имеющих структуру, отличную от представленной на рис. 5. В частности, на кадрах, зарегистрированных 15.03.2010 и 05.09.2010 (рис. 6а, г), область свечения расположена приблизительно в центре диаграммы направленности стенда, но вытянутые вдоль магнитного поля **В** полосы наблюдаются только на рис. 6а, там, где максимальная яркость свечения составляет $b \approx 15$ Рл.

Высота отражения волны накачки на частоте $f_0 = 4375$ кГц в 22:30 LT 05.09.2010 (рис. 6а) составляла 250 км, во время эксперимента 15.03.2010 ($f_0 = 4300$ кГц, рис. 6г) — 280 км. Следует отметить, что в эксперименте 15.03.2010 рабочая частота стенда была близка к критической частоте ионосферы f_{0F_2} , и область верхнего гибридного резонанса волны накачки, где $f_0^2 \approx f_{pe}^2 + f_{ce}^2$, была расположена заметно ниже уровня отражения, на высоте порядка 255 км. На изображениях 03.09.2010 при частоте волны накачки $f_0 = 4375$ кГц (рис. 6б, в) высота отражения увеличивалась от 265 до 280 км. На этих снимках область искусственного свечения смещена к северу на $3^\circ \div 6^\circ$ относительно центра диаграммы направленности тем больше, чем выше высота отражения нагревной волны. Вытянутые вдоль магнитного поля полосы оптического свечения присутствуют на этих снимках. Они имеют размер $0,5^\circ \div 2^\circ$, а расстояние между ними составляет $1^\circ \div 3^\circ$. Максимальная яркость оптического свечения на рис. 6б, в составляет $b \approx 40$ Рл и $b \approx 37$ Рл соответственно.

2.2. Свечение в красной линии. Наклонное излучение нагревной волны

17 марта, 13 мая, 7 и 8 сентября 2010 года диаграмма направленности стенда «Сура» наклонялась на 12° к югу от вертикали в плоскости магнитного меридиана, 9 и 10 сентября 2010 года — на 16° . На рис. 7 представлены различные типы оптических изображений облучавшейся стендом «Сура» области небосвода, обработанные по описанной выше методике. Крест на снимках соответствует «магнитному зениту» — лучу зрения вдоль геомагнитного поля **В**. Можно различить четыре типа изображений.

Во-первых, это достаточно протяжённое (порядка $4^\circ \times 4^\circ$) пятно искусственного свечения, с небольшой яркостью ($b \lesssim 15$ Рл), расположенное несколько южнее центра проекции диаграммы направленности стенда на небосвод. Такое пятно наблюдалось в эксперименте 07.09.2010 при наклоне диаграммы направленности стенда на юг на 12° и частоте волны накачки $f_0 = 5375$ кГц в течение четырёх циклов воздействия с 21:25 до 21:45 LT (см. рис. 7а).

Во-вторых, в большинстве сеансов воздействия (в том числе 07.09.2010 после перестройки частоты волны накачки на $f_0 = 4740$ кГц) наблюдалось компактное пятно (угловой размер не превышает 2°), как правило, с большей яркостью, расположенное либо непосредственно в магнитном зените, либо несколько севернее него (не более, чем на $0,5^\circ$) вне зависимости от того, наклонена диаграмма направленности стенда на 12° или на 16° . При этом по линии восток–запад пятно остаётся достаточно протяжённым ($3^\circ \div 4^\circ$), а в северном направлении, вдоль проекций силовых линий геомагнитного поля, наблюдается менее яркий, но достаточно заметный «хвост» пятна свечения. Такая структура наблюдается на рис. 7б–е. Наиболее интенсивное искусственное свечение в линии 630 нм в магнитном зените зарегистрировано 13.05.2010 в период 22:57–23:10 LT, его средняя по полю яркость составила $70 \div 90$ Рл, а пиковые значения достигали $160 \div 190$ Рл (рис. 7в). Отметим, что во всех сеансах воздействия, когда пятно искусственного оптического свечения наблюдалось в магнитном зените, в соответствии с ионосферными условиями использовалась волна накачки с частотой в диапазоне $4300 \text{ кГц} < f_0 < 4785 \text{ кГц}$.

В третьих, на ряде снимков (см. рис. 7з, и) области искусственного оптического свечения имеют вид набора достаточно мелких пятен ($1^\circ \div 3^\circ$) с яркостью $15 \div 25$ Рл, самое яркое из которых расположено в магнитном зените. Такая картина наблюдается достаточно редко, а представленные на рис. 7 снимки были зарегистрированы в последние сеансы воздействия, в которых наблюдалось свечение. Ионограммы, зарегистрированные близко по времени к этим сеансам, демонстрируют существование интенсивного ионосферного слоя с развитыми неоднородностями различных масштабов (F_{spread}), а критическая частота ионосферы f_{0F_2} в этот период близка к частоте нагревной волны f_0 . Отметим также, что в те дни, когда при уменьшении критической частоты f_{0F_2} подавлялось фоновое оптическое свечение ионосферы под действием излучения стенда (см. ниже), пятнистая структура, как правило, не наблюдалась.

Наконец, в-четвёртых, во время экспериментов 07.09–10.09.2010 во время квазинепрерывного воздействия радиоизлучением наблюдалось подавление естественного фона оптического свечения, глубина подавления достигала в некоторых сеансах $10 \div 15$ Рл. Яркие примеры такого влияния мощного коротковолнового радиоизлучения на оптическое свечение ионосферы приведены на рис. 7к, л. Следует отметить также, что в ряде сеансов воздействия 07.09 и 08.09.2010 наряду с генерацией искусственного оптического свечения, на периферии возмущённой области наблюдалось подавление оптического фона (см. рис. 7г, е).

«Смена знака» воздействия мощной радиоволны с генерации искусственного оптического свечения на подавление фона обнаружена нами с помощью анализа сигналов фотометра (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что подъём яркости оптического свечения во время квазинепрерывного излучения стенда «Сура» на частоте $f_0 = 5375$ кГц в 21:49 LT сменяется её уменьшением при переходе на частоту $f_0 = 5355$ кГц. После перестройки стенда на более низкую частоту $f_0 = 4740$ кГц в 22:43 LT снова наблюдалось искусственное свечение.

Как правило, за уменьшением оптической фоновой яркости во время излучения стенда после отключения передатчиков следует её временное увеличение (порядка нескольких процентов) над стационарным средним значением. Это дополнительное «послесвечение» присутствует и в тех сеансах, где мощное радиоизлучение значительно усиливает свечение в линии 630 нм: либо неявно в виде отклонения релаксации яркости свечения от экспоненциальной временной зависимости, либо явно в виде дополнительного временного максимума яркости после отключения передатчиков (см. рис. 2). Смена искусственного свечения ионосферы на подавление оптического фона во время квазинепрерывного воздействия радиоизлучением наблюдалась, когда критическая частота ионосферы f_{0F_2} уменьшалась до значений, превышающих рабочую частоту стенда «Сура», не более чем на $0,5$ МГц. В эксперименте 09.09.2010 при частоте излучения стенда $f_0 = 4375$ кГц в течение всего эксперимента с 21:00 до 23:07 LT величина f_{0F_2} не превышала $4,8$ МГц. Искус-

ственное оптическое свечение в этот день не наблюдалось вовсе, а фоновое свечение подавлялось сильнее с уменьшением критической частоты f_{0F_2} .

Отметим в заключение, что в случае $f_{0F_2} < f_0$ ни искусственного подавления оптического фона, ни оптического свечения, ни искусственного радиоизлучения ионосферы не наблюдалось ни при вертикальном, ни при наклонном излучении нагревной волны.

2.3. Свечение в зелёной линии

Свечение в зелёной линии атомарного кислорода ($\lambda = 557,7$ нм, переход $O(^1S) \rightarrow O(^1D)$) обладает существенно большим потенциалом и меньшим сечением возбуждения, чем свечение в красной линии (см., например, [16]). Поэтому яркость искусственного свечения в зелёной линии оказывается приблизительно в $5 \div 10$ раз ниже яркости в красной [15, 16, 26]. В связи с этим естественные флуктуации яркости свечения в зелёной линии, связанные с вариациями прозрачности атмосферы, часто маскируют вариации яркости свечения за счёт воздействия мощными радиоволнами, и для успешных измерений в зелёной линии нужны более благоприятные погодные и ионосферные условия. Например, на рис. 1 влияние станда «Сура» на свечение в зелёной линии практически незаметно.

Тем не менее, в экспериментах 2010 года на станде «Сура» в ряде сеансов искусственное свечение в зелёной линии было зарегистрировано. Свечение в зелёной линии атомарного кислорода регистрировалось с помощью фотометров. Фрагмент записи сигнала фотометров 16.03.2010 в зелёной и красной линиях приведён на рис. 8. На рис. 8 наряду с заметным увеличением яркости свечения в красной линии (приблизительно $10 \div 11$ % от фоновой) во время непрерывного излучения станда «Сура» имеет место также меньшее по величине (на $4 \div 5$ % от фона) увеличение интенсивности свечения в зелёной линии. В других сеансах воздействия яркость искусственного свечения в зелёной линии не превышала $1 \div 2$ % от фоновой яркости, а в ряде сеансов наблюдалось подавление свечения приблизительно на ту же величину. На рис. 8 яркость свечения приведена в произвольных единицах, кроме того, среднее значение фоновой яркости для наглядности смещено относительно оси ординат. Расчёт параметров шумовой дорожки фотометра показывает, что яркость свечения в линии $557,7$ нм в сеансе, представленном на рис. 8, увеличивается не более, чем на 10 Рл.

Как указано в разделе 1, при использованном режиме воздействия радиоизлучением возможна регистрация искусственного свечения в зелёной линии во время излучения коротких импульсов волны накачки с большой скважностью. В экспериментах 2010 года такой эффект наблюдался в ряде сеансов воздействия. Следует отметить, что для выделения оптического свечения, инициированного короткими радиоимпульсами, приходится проводить усреднение по моментам времени, отстоящим друг от друга на период повторения импульсов. При этом полная длительность временного интервала усреднения и начало этого интервала по отношению к окончанию предыдущего интервала квазинепрерывного воздействия радиоизлучением должны выбираться в соответствии с длительностью существования вытянутых вдоль магнитного поля неоднородностей плазмы, которая, в свою очередь, определяется по измерениям искусственного радиоизлучения ионосферы [24, 25].

Пример регистрации свечения в зелёной линии атомарного кислорода во время сеанса воздействия 07.09.2010 в 21:13–21:19 LT (21:13–21:15 LT — квазинепрерывное воздействие, 21:15:00–21:19:00 LT — импульсное излучение волны накачки) приведён на рис. 9. На рисунке показано усреднённое за время 21:17:40–21:18:20 LT изменение яркости свечения в течение периода повторения радиоимпульсов $T_p = 2$ с, кроме того, прямоугольником отмечено время излучения радиоимпульса. Видно, что приблизительно через 0,1 с после окончания радиоимпульса с длительностью

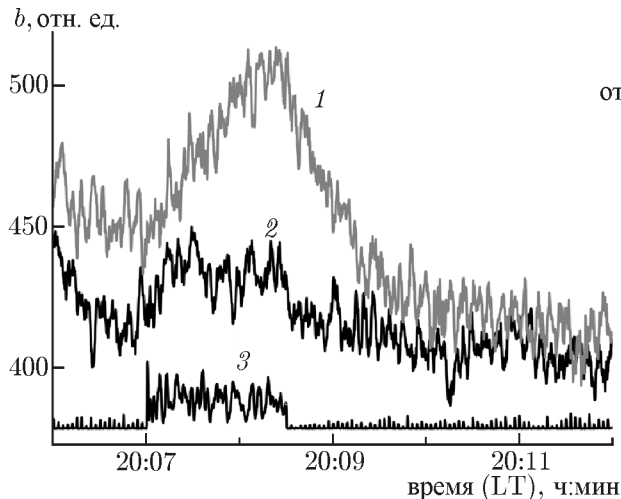


Рис. 8. Фрагмент записи сигнала фотометров в красной ($\lambda = 630$ нм, кривая 1) и зелёной ($\lambda = 557,7$ нм, кривая 2) линиях атомарного кислорода 16.03.2010. Время накопления 0,25 с, текущее усреднение по 11 отсчётам (2,5 с). Кривая 3 соответствует сигналу станда «Сура». Вертикальное излучение волны накачки с частотой $f_0 = 4300$ кГц

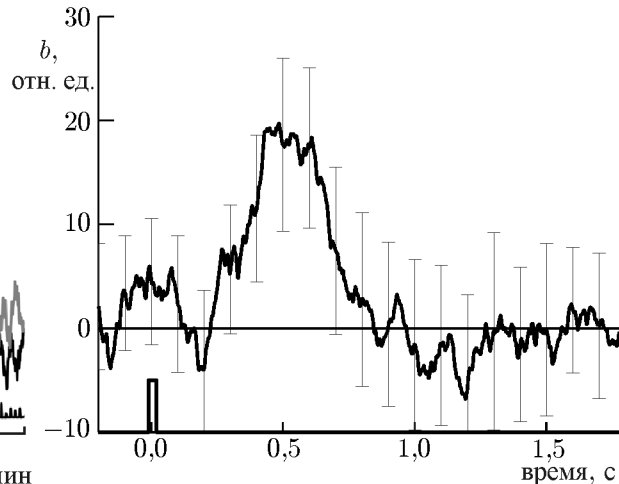


Рис. 9. Сигнал фотометра в зелёной линии ($\lambda = 557,7$ нм) во время импульсного излучения станда «Сура» 21:17:40–21:18:20 LT 07.09.2010, усреднённый по 30 последовательным периодам повторения импульсов. Длительность импульсов $\tau_p = 30$ мс, период повторения $T_p = 2$ с. Время излучения радиоимпульса с длительностью 30 мс показано прямоугольником на оси абсцисс. Текущее усреднение по 251 отсчёту (0,25 с). Начало оси ординат соответствует среднему значению сигнала фотометра в отсутствие искусственного оптического свечения

$\tau_p = 30$ мс яркость свечения увеличивается приблизительно на 1,5% над средней фоновой. Длительность такого увеличения свечения составляет порядка 0,3 с $\lesssim \tau_r(O(^1S))$. В другие отрезки времени импульсной работы станда (21:15:00–21:19:00 LT) такого увеличения яркости свечения обнаружить не удалось. Следует отметить, что в предыдущих экспериментах, где отмечалось увеличение яркости свечения в зелёной линии, эффект наблюдался сразу или через 1–2 мин после окончания квазинепрерывных посылок [24, 25], а в [23] использовалось только импульсное радиоизлучение. Искусственное свечение в зелёной линии при непрерывном воздействии на ионосферу радиоизлучением станда «Сура» ранее зарегистрировать не удавалось.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 2010 году проведено 3 серии экспериментов по исследованию влияния воздействия мощного коротковолнового радиоизлучения станда «Сура» на излучение ионосферы в оптическом диапазоне на длинах волн $\lambda = 630$ нм и $\lambda = 557,7$ нм. Частота волны накачки в экспериментах составляла $f_0 = 4300 \div 5375$ кГц, эквивалентная мощность излучения варьировалась от 60 до 100 МВт. Стенд «Сура» уступает по своему потенциалу нагревным стендам EISCAT (г. Тромсё, Норвегия, максимальная эффективная мощность 1200 МВт) и HAARP (Гакона, Аляска, США, максимальная эффективная мощность 3600 МВт). Возможно, что это, наряду с большим влиянием естественных флуктуаций параметров ионосферы, является одной из причин достаточно редкого наблюдения заметного влияния воздействия излучения станда на яркость свечения в зелёной линии ($\lambda = 557,7$ нм), обладающей достаточно высоким потенциалом возбуждения (4,17 эВ).

В то же время, в [15] сообщается о достаточно уверенном наблюдении искусственного свечения в этой линии (до 10 Рл в среднем в пятне свечения) на стенде НААРП при достаточно низкой мощности воздействия (10 МВт) на частоте $f_0 = 2750$ МГц, близкой ко второй гармонике электронной циклотронной частоты $2f_{ce}$. При этом также наблюдалось искусственное свечение в линии $\lambda = 777,4$ нм (разрешённый переход $O^5P \rightarrow O(^5S^0)$) с более высоким потенциалом возбуждения 10,7 эВ. В наших измерениях на стенде «Сура» впервые было зарегистрировано искусственное свечение в линии $\lambda = 557,7$ нм во время длительного (квазинепрерывного) излучения стенда, а также в добавление к результатам экспериментов [23–25] получены новые данные о поведении искусственного оптического свечения во время импульсного излучения волны накачки. Результаты более детального анализа данных измерений свечения в линии $\lambda = 557,7$ нм будут опубликованы отдельно.

Результаты измерений искусственного свечения в красной линии ($\lambda = 630$ нм) показали следующее.

1) Время нарастания яркости свечения в красной линии близко к радиационному времени жизни возбуждённого состояния $\tau_r(O(^1D)) = 107$ с, и двух минут воздействия недостаточно для насыщения яркости свечения. Характерное время релаксации искусственного свечения после выключения квазинепрерывной посылки волны накачки оказывается меньшим и составляет $20 \div 30$ с, причём после релаксации оптического свечения немного увеличивается фоновый уровень яркости. В ряде сеансов в ходе вертикального квазинепрерывного излучения волны накачки область максимальной яркости оптического свечения с размером $2^\circ \times 2^\circ$ перемещалась с севера на юг вдоль полос, вытянутых вдоль геомагнитного поля **В**. Максимальная яркость искусственного свечения по полю снимка варьировалась в пределах $10 \div 50$ Рл над фоном, максимальные значения яркости за всё время наблюдений были зарегистрированы в эксперименте 13.05.2010 и достигали в среднем $70 \div 90$ Рл, при пиковых значениях порядка $160 \div 190$ Рл.

2) При вертикальном излучении волны накачки развитие области искусственного свечения происходит в виде полос (страт), вытянутых вдоль проекций силовых линий геомагнитного поля **В** на небосвод, с поперечными и продольными угловыми размерами $1^\circ \div 2^\circ$ и $6^\circ \div 8^\circ$ соответственно. Такая картина имеет место при максимальных уровнях яркости свечения, не превышающих 15 Рл. При большей яркости стратификация пятна свечения слабо различима на снимках, и пятно искусственного свечения является практически изотропным.

3) При высотах отражения волны накачки порядка 250 км область искусственного свечения расположена вблизи центра прямолинейной проекции диаграммы направленности стенда на небосвод (с учётом систематического сдвига на 2° на юг). При увеличении высоты отражения пятно свечения смещается к северу, смещение может достигать $6^\circ \div 8^\circ$.

4) В ряде экспериментов пятно свечения дрейфовало по линии восток–запад с небольшой скоростью около 10 м/с в течение нескольких последовательных 6-минутных циклов воздействия.

5) При наклоне диаграммы направленности стенда на 12° к югу и частоте нагревной волны $f_0 = 5375$ кГц пятно свечения наблюдалось вблизи центра прямолинейной проекции диаграммы направленности на небосвод (с учётом её систематического сдвига к югу). При наклонах диаграммы на 12° и на 16° к югу и частотах волны накачки $4300 \leq f_0 \leq 4785$ кГц пятно свечения располагалось вблизи магнитного зенита (в направлении магнитного поля **В**). В последнем случае в ряде сеансов наряду с изотропным пятном с диаметром $1,5^\circ \div 2^\circ$ регистрировался менее яркий «хвост» свечения, вытянутый на $4^\circ \div 6^\circ$ к северу вдоль проекций магнитных силовых линий. В экспериментах 17.03 и 07.09.2010 при уменьшении критической частоты ионосферы до значений $f_{0F_2} \approx f_0$ и развитии слоя F_{spread} область свечения расслаивалась на разнесённые по полю снимков пятна.

6) В сентябре 2010 года при наклоне диаграммы направленности стенда на юг во время по-

слезаходного уменьшения критической частоты ионосферы f_{0F_2} до значений, превышающих рабочую частоту станда «Сура» не более, чем на 0,5 МГц, наблюдалась «смена знака» воздействия волны накачки на оптическое свечение ионосферы: генерация искусственного свечения ионосферы сменялась подавлением фонового свечения ночного неба. Как правило, после отключения станда «Сура» за уменьшением яркости свечения следовало её временное увеличение на несколько процентов над стационарным средним фоновым значением. Это дополнительное «послесвечение» присутствовало и в тех сеансах, когда наблюдалось искусственное свечение в линии 630 нм. Кроме того, во время воздействия радиоизлучением уменьшался оптический фон сбоку от пятна искусственного свечения.

Детальная интерпретация полученных результатов не входит в цели настоящей работы. Часть результатов по свечению в линии 630 нм подтверждает результаты, полученные с помощью ПЗС-камеры SBIG ST9E в эксперименте 15.09.2004 при вертикальном излучении волны накачки [27]. Это эффекты стратификации пятна свечения на вытянутые вдоль магнитного поля полосы при умеренных уровнях яркости, смещение пятна на север при увеличении высоты отражения волны накачки, начало развития свечения в северной части проекции диаграммы станда на небосвод, дрейф пятна свечения по линии восток–запад. В работе [27] подробно обсуждаются перечисленные эффекты. Отметим здесь лишь несколько существенных моментов, отослав читателя за деталями к [27].

Согласно [6, 11, 12] оптическое свечение генерируется на высотах 220–270 км, где достаточно высока концентрация атомов кислорода, тогда как ускорение электронов до необходимых энергий $\mathcal{E} > 2$ эВ — в области отражения волны накачки, точнее — в области её верхнего гибридного резонанса. При подъёме области ускорения до высот, превышающих 270 км, энергичным электронам для возбуждения достаточного числа атомов кислорода и перевода их в состояние $O(^1D)$ необходимо попасть в более низкие и, следовательно, плотные слои атмосферы. Поскольку электроны движутся вниз вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$, а оно, в свою очередь, наклонено к северу, то в эксперименте наблюдается видимое смещение пятна к северу при высокой ионосфере. Как показывают расчёты для условий эксперимента, если бы смещение оптического пятна было обусловлено отклонением групповой траектории лучей волны накачки обыкновенной поляризации к северу вблизи точки отражения, то смещение пятна свечения было бы гораздо большим, а в области верхнего гибридного резонанса такое отклонение несущественно. Перемещение пятна оптического свечения на юг, отмеченное на рис. 4, также связано с движением электронов вдоль магнитных силовых линий и тем фактом, что время жизни атома кислорода в состоянии $O(^1D)$ в интервале высот 220–270 км составляет 20–30 с и мало по сравнению с радиационным временем $\tau_r(O(^1D)) = 107$ с. Уменьшение времени жизни возбуждённых атомов определяется их «гашением» в межатомных столкновениях, более частых в более низких слоях [28]. Поскольку формирование функции распределения электронов в результате их ускорения плазменными волнами и их проникновение в более низкие слои происходит существенно быстрее гашения, то сначала возбуждённые атомы кислорода появляются (а, следовательно, и свечение в линии 630 нм генерируется) на более низких высотах, а уже затем на больших высотах, где время жизни атома в состоянии $O(^1D)$ приближается к радиационному. С уменьшением времени жизни возбуждённых атомов $O(^1D)$ при уменьшении высоты связана также быстрая по сравнению с временем $\tau_r(O(^1D))$ релаксация свечения в линии 630 нм после выключения квазинепрерывного излучения волны накачки.

Стратификация пятна свечения на снимках на вытянутые вдоль проекций магнитного поля структуры с поперечным к магнитному полю $\mathbf{B}$ угловым размером $0,5^\circ \div 2^\circ$ (на высоте порядка 250–300 км это соответствует линейному размеру $l_\perp \sim 2 \div 10$ км) и продольным размером $3^\circ \div 6^\circ$ ($l \sim 15 \div 30$ км) связаны, скорее всего, с самофокусировочной неустойчивостью волны накачки.

ки, 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 [9, 22, 36–38, 44]. Там же, естественно, более эффективно возбуждаются плазменные волны и ускоряются электроны, в результате столкновений с которыми появляются атомы в состояниях $O(^1D)$ и $O(^1S)$.

Электроны разлетаются из области ускорения, как уже указывалось, вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$, поэтому продольный размер области свечения можно оценить как $l_{\parallel} \sim l / \cos(71,5^\circ) \sim \sim 50 \div 90$ км ($71,5^\circ$ — магнитное наклонение). Такая оценка справедлива, если характерный поперечный размер оптического пятна в плоскости геомагнитного меридиана $l_{\perp m} \approx l_{\perp}$, т. е. неоднородности плазмы изотропны в плоскости, ортогональной магнитному полю $\mathbf{B}$, что имеет место при распространении волны накачки вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$ [38]. В этом случае неоднородности плазмы имеют вид цилиндров, вытянутых вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$. При распространении волны накачки под конечным углом к магнитному полю $\mathbf{B}$ в плоскости геомагнитного меридиана неоднородности плазмы представляют собой листы в плоскости магнитного меридиана с поперечным размером $l_{\perp m} > l_{\perp}$ и толщиной в поперечной меридиану плоскости порядка $l_{\perp}$. При этом оценка, приведённая выше для изотропной в поперечной магнитному полю $\mathbf{B}$ плоскости неоднородности, представляет собой верхнюю границу продольного размера области свечения.

Другой причиной фокусировки волны накачки и, следовательно, стратификации пятна свечения в красной линии могут служить неоднородности (области пониженной концентрации плазмы) естественного происхождения в возмущённой области ионосферы. По-видимому, такая ситуация имела место в экспериментах 04.09.2010, когда фокусировка происходила в западной части диаграммы направленности станда, а не в центре её, где плотность потока энергии волны накачки максимальна. Наблюдаемое перемещение пятна свечения в восточном направлении от сеанса к сеансу связано с дрейфом плазмы в скрещённых электрическом и магнитном полях [6, 21].

Эффект смещения пятна свечения в линии 630 нм дополнительно на $4^\circ \div 5^\circ$ к югу от центра диаграммы направленности станда при её наклоне на юг на 12° был обнаружен в разовом эксперименте 17.09.2004 [27] (один двухминутный цикл непрерывного воздействия) и требовал дополнительной проверки. В серии экспериментов 2010 года было установлено, что при частоте нагревной волны $f_0 = 5375$ кГц, $f_0 \geq 4f_{ce}$ (f_{ce} — электронная циклотронная частота) пятно свечения располагалось несколько южнее центра проекции диаграммы направленности на небосвод и заметно севернее магнитного зенита. Соотношение частот f_0 и $4f_{ce}$ определялось по характерному спектру искусственного радиоизлучения ионосферы при $f_0 > nf_{ce}$, см., например, [40–42]. При частоте нагревной волны $f_0 \leq 4785$ кГц оптическое пятно наблюдалось вблизи магнитного зенита (см. рис. 7). В экспериментах 17.03 и 07.09.2010 при уменьшении критической частоты ионосферы и развитии слоя F_{spread} пятно свечения расслаивалось. При наблюдениях 08.09.2010 пятно искусственного свечения было расположено в магнитном зените во время всего времени генерации мощного радиоизлучения. При наклоне диаграммы направленности станда на юг на 16° (10.09.2010) пятно всегда находилось в магнитном зените. Таким образом, эффект магнитного зенита, обнаруженный на полярных нагревных стандах EISCAT и HAARP (магнитное наклонение 78° и 76° соответственно) и заключающийся в усилении различных эффектов воздействия при направлении диаграммы направленности станда вдоль магнитного поля [7, 9, 10, 13], на стенде «Сура» (наклонение $71,5^\circ$) проявляется в перемещении пятна искусственного оптического свечения в магнитный зенит при различных углах наклона диаграммы направленности к югу и существует при достаточно низких частотах волны накачки.

Согласно [9, 48] эффект магнитного зенита связан с усилением модификации ионосферы при запылении пучка мощных радиоволн, направленного вдоль магнитных силовых линий, в вытянутой вдоль магнитного поля каверне (полости) электронной концентрации вследствие самофоку-

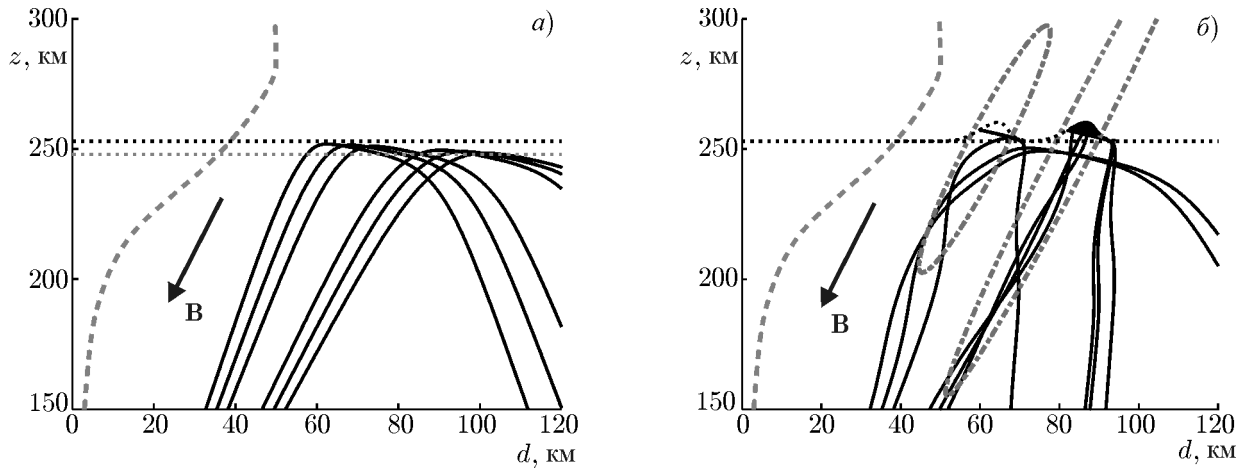


Рис. 10. Траектории лучей волны накачки с частотой $f_0 = 4740$ кГц в плоскости магнитного меридиана (здесь z — высота, d — горизонтальное расстояние от точки выхода луча в плоскости магнитного меридиана). Для расчёта использованы данные ионограммы вертикального зондирования 08.09.2010 в 21:23 LT, восстановленный профиль электронной концентрации приведён на панелях штриховой линией. Панель *a* соответствует плоскостойкой ионосфере, панель *б* — ионосфере с «добавленными» неоднородностями электронной концентрации (показаны серыми штрих-пунктирными линиями). Стрелкой показано направление магнитного поля, чёрными точками показан уровень отражения волны накачки, серыми (*a*) — уровень верхнего гибридного резонанса волны накачки. Высота отражения волны накачки (в случае плоской ионосферы) — 253 км, высота верхнего гибридного резонанса — 248 км. Расчёт проведён для лучей с углами выхода к вертикали (слева направо) $12,5^\circ$; $13,5^\circ$; $14,5^\circ$; $17,5^\circ$; $18,5^\circ$ и $19,5^\circ$.

сировочной неустойчивости. Отметим также, что возбуждение крупномасштабных неоднородностей в магнитном зените на стенде «Сура» наблюдалось с помощью просвечивания возмущённой области ионосферы сигналами пролётных искусственных спутников Земли [49]. Для выяснения причины отсутствия эффекта магнитного зенита при частоте нагревной волны $f_0 = 5375$ кГц в условиях стенда «Сура» — связано ли это с близостью частоты f_0 к циклотронной гармонике $4f_{ce}$, либо просто с большей величиной f_0 — требуются дополнительные эксперименты в условиях достаточно высоких критических частот в тёмное время суток. Такие условия могут иметь место в максимуме солнечной активности в 2012–2013 годах.

Далее, для ответа на вопрос об условиях возбуждения искусственного оптического свечения и положении пятна свечения на небосводе необходим расчёт траекторий распространения волны накачки в условиях эксперимента с модельным включением неоднородностей концентрации плазмы (областей пониженной концентрации), отвечающих за фокусировку волны накачки. Пример такого расчёта приведён на рис. 10 для частоты волны накачки $f_0 = 4740$ кГц и условий эксперимента 08.09.2010, когда пятно оптического свечения находилось в магнитном зените (см. рис. 7). Для расчёта использовались данные ионозонда, полученные в 21:24 LT, через 3 мин после выключения квазинепрерывного излучения стенда. Из рис. 10 видно, что в плоскостойкой ионосфере (в отсутствие фокусирующих неоднородностей, рис. 10*a*) не наблюдается каких-либо особенностей траекторий лучей, которые могли бы отклонить поток энергии волны накачки в сторону магнитного зенита. Отклонение лучей с углами выхода к вертикали $12,5^\circ$, $13,5^\circ$ и $14,5^\circ$ (близких к центральному лучу диаграммы) вследствие рефракции не превышает на восходящем участке траектории 1° на уровне верхнего гибридного резонанса и 2° в наивысшей точке траектории луча, т. е. в такой среде пятно свечения должно находиться близко к центру диаграммы направленности стенда при наклоне последней на $12^\circ \div 14^\circ$ на юг. Расчёт с учётом модельных

вытянутых вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$ неоднородностей с отклонением электронной концентрации

$$\Delta N = \Delta N_0 \exp \left(-\frac{x^2}{l_m^2} - \frac{y^2}{l^2} - \frac{z^2}{l_{\parallel}^2} \right),$$

расположенных под углами к вертикали от 12° до $18,5^\circ$ (рис. 10б) показывает, что лучи с углами выхода к вертикали $17,5^\circ$; $18,5^\circ$ и $19,5^\circ$ эффективно захватываются и фокусируются неоднородностью, расположенной в магнитном зените, в отличие от лучей с меньшими углами выхода.

Для расчётов брались неоднородности плазмы с центром ($z = 0$) на высоте $h = 250$ км, относительной глубиной $\Delta N/N(z = 0) = -10\%$, поперечным размером в плоскости магнитного меридиана и поперёк него $l_m = l = 5$ км и продольными размерами соответственно $l_{\parallel} = 50$ км и 100 км. Необходимо отметить, что большая эффективность захвата/фокусировки наблюдается при большей длине неоднородностей. В свою очередь, лучи с меньшими углами выхода ($12,5^\circ$; $13,5^\circ$ и $14,5^\circ$) дополнительно отклоняются к югу. Увеличение длины вытянутых вдоль магнитного поля искусственных ионосферных неоднородностей плазмы с поперечными размерами $50 \div 100$ м в ночное время отмечалось в эксперименте [43]. Тем не менее, для детальной интерпретации и исследования закономерностей эффекта магнитного зенита в условиях экспериментов на стенде «Сура» необходимы дальнейшие модельные расчёты траекторий радиолучей с учётом реальных ионосферных условий и сопоставление их с данными регистрации искусственного оптического свечения.

В экспериментах 2010 года нами обнаружен эффект смены знака воздействия волны накачки на оптическое свечение ионосферы. Такое поведение яркости свечения может быть объяснено при корректном учёте, наряду с ускорением, электронов нагрева плазмы мощной волной и температурной зависимости коэффициента диссоциативной рекомбинации $\alpha_{\text{эф}}$ — процесса, в результате которого также образуются атомы кислорода в возбуждённом состоянии $O(^1D)$ [1, 3, 28]. Качественно эффект уменьшения фоновой яркости во время воздействия мощной радиоволной объясняется уменьшением коэффициента $\alpha_{\text{эф}}$ с ростом температуры электронов ($\alpha_{\text{эф}}(T_e) \propto T_e^{-1/2}$), а последующее небольшое увеличение яркости обусловлено накоплением ионов молекулярного кислорода O_2^+ за время действия нагревной радиоволны.

Детальное изложение наших исследований конкуренции влияния ускорения и нагрева электронов на оптическое свечение ионосферы выходит за рамки настоящей работы. Часть полученных результатов изложена нами в [29]. Отметим лишь, что, во-первых, при достаточно высоких критических частотах ионосферы генерация искусственного оптического свечения, связанного с ускорением электронов, преобладает над подавлением оптического фона в области с размером, меньшим, чем размер прямолинейной проекции диаграммы направленности излучения стенда на небосвод, и тёмного пятна, связанного с нагревом электронов. Во-вторых, основную роль не только в ускорении электронов, но и в их нагреве играют плазменные волны, возбуждаемые волной накачки, а не сама волна накачки. Этот факт следует из одновременного с оптическими измерениями наблюдений искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ), являющегося продуктом конверсии плазменных волн в электромагнитные [24, 39]. В наших экспериментах искусственное радиоизлучение наблюдалось как во время искусственного оптического свечения, так и при подавлении свечения ионосферы. При прекращении генерации искусственного радиоизлучения ни один из этих эффектов уже не наблюдался.

Как уже указывалось, искусственное оптическое свечение должно генерироваться в областях с повышенной интенсивностью волны накачки и плотностью энергии плазменных волн и, следовательно (вследствие самофокусировки либо фокусировки на естественных неоднородностях), пониженной электронной концентрации. При увеличении мощности волны накачки $P_{\text{эф}}$ эффективность ускорения электронов должна возрастать, и искусственное оптическое свечение должно

преобладать над снижением фона в линии 630 нм уже во всей области засветки ионосферы мощной волной, а свечение в линии 557,7 нм наблюдаться более надёжно. Более того, энергия ускоренных электронов должна превышать более высокие потенциалы возбуждения состояний атомов и ионов $O(3p^3P)$, 11 эВ; $N_2^+(B^2\Sigma_u^-)$, 18 эВ, а также потенциалы ионизации основных нейтральных компонент ионосферы (атомарного кислорода O, 13,6 эВ и молекулярного азота N_2 , 15,6 эВ). Это должно приводить к генерации свечения в линиях с $\lambda = 844,6$; 427,8 нм [16], к дополнительной ионизации ионосферной плазмы и, наоборот, повышению электронной концентрации в области сильного поля волны накачки. Отметим, что слабая дополнительная ионизация ионосферной плазмы наблюдалась в экспериментах на стенде «Сура» [50, 51]. При существенном повышении мощности нагревных стендов в последние годы (в настоящее время на стенде EISCAT мощность достигает 1200 МВт, а на стенде HAARP — 3600 МВт) эффекты дополнительной ионизации заметно преобладают над вытеснением плазмы, что приводит к образованию дополнительных ионосферных слоёв [19, 30] и существенно изменяет структуру пятна свечения [30, 52].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12–02–00513–а и 11–02–00125–а) и Министерства образования и науки РФ (госконтракт 16.518.11.7066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biondi A. A., Sipler D. P., Hake R. D. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, No 31. P. 6421.
2. Utlaut W. F., Cohen R. // Science. 1971. V. 174, No. 4006. P. 245.
3. Sipler D. P., Biondi M. A. // J. Geophys. Res. A. 1978. V. 83, No. 4. P. 1519.
4. Carlson H. C., Wickwar V. B., Mantas G. P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44. P. 1089.
5. Bernhardt P. A., Duncan L. M., Tepley C. A. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 7003.
6. Bernhardt P. A., Tepley C. A., Duncan L. M. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 9071.
7. Kosch M. J., Rietveld M. T., Hagfors T., Leyser T. B. // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. P. 2817.
8. Pedersen T. R., Carlson H. C. // Radio Sci. 2001. V. 36. P. 1013.
9. Gurevich A. V., Zybin K. P., Carlson H. C., Pedersen T. // Phys. Lett. A. 2002. V. 305. P. 264.
10. Pedersen T. R., McCarric M., Gerken E., et al. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, P. 1169.
11. Gustavsson B., Sergienko T., Rietveld M. T., et al. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 29105.
12. Kosch M. J., Rietveld M. T., Kavanagh A. J., et al. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. P. 2112.
13. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. A. 2003. V. 108, No. 4. P. 1141.
14. Kosch M. J., Rietveld M. T., Senior A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. Art. no. L12805.
15. Djuth F. T., Pedersen T. R., Gerken E. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. Art. no. 125001.
16. Gustavsson B., Sergienko T., Kosch M. J., et al. // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 1747.
17. Gustavsson B., Newsome R., Leyser T. B., et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Art. no. L20102.
18. Kendall E., Marshall R., Parris T., et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. no. A08306.
19. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. Art. no. L18107.
20. Bernhardt P. A., Scales W. A., Grach S. M., et al. // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. P. 1477.
21. Bernhardt P. A., Wong M., Huba J. D., et al. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 10657.
22. Kosch M. J., Pedersen T., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. no. A08304.
23. Гумеров Р. И., Капков В. Б., Комраков Г. П., Насыров А. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. С. 524.
24. Grach S. M., Sergeev E. N., Nasyrov A. M., et al. // Adv. Space Res. 2004. V. 34, No. 11. P. 2422.
25. Grach S. M., Sergeev E. N., Komrakov G. P., et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6522. Art. no. 652226.

26. Kosch M. J., Pedersen T., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. no. A06325.
27. Grach S. M., Kosch M. J., Yashnov V. A., et al. // Ann. Geophys. 2007. V. 25. P. 689.
28. Kalogerakis K. S., Slinger T. G., Kendall E. A., et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 2183.
29. Клименко В. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н. и др. // Сб. докл. XXIII Всерос. конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 23–26 мая 2011 г. Т. 2. С. 239.
30. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. no. L02106.
31. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Котов П. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 649.
32. Грач С. М., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 46.
33. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. С. 208.
34. Frolov V. L., Erukhimov L. M., Metelev S. A., Sergeev E. N. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 1997. V. 59. P. 2317.
35. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Митяков Н. А. и др. // Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 7.
36. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 81.
37. Gondarenko N. A., Ossakow S. L., Milikh G. M. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. no. A09304.
38. Васьков В. В., Гуревич А. В., Караштин А. Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. Т. 16. С. 549.
39. Grach S. M., Shvarts M. M., Sergeev E. N., Frolov V. L. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1233.
40. Thidé B., Sergeev E. N., Grach S. M., Leyser T. B., Carozzi T. D. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95, No. 25. Art. no. 255002.
41. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Котов П. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 649.
42. Norin L., Grach S. M., Leyser T. B., et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. A09314.
43. Сергеев Е. Н., Зыков Е. Ю., Акчурины А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2, С. 79.
44. Gurevich A. V., Dimant Ya. S., Milikh G. M., Vas'kov V. V. // J. Atm. Terr. Phys. 1985. V. 47. P. 1057.
45. Грач С. М., Митяков Н. А., Трахтенгерц В. Ю. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. С. 693.
46. Грач С. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 47, № 7. С. 651.
47. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point/index.html>.
48. Гуревич А. В., Зыбин К. П., Карлсон Х. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 772.
49. Terechshenko V. E., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325. P. 381.
50. Васьков В. В., Голян С. Ф., Гуревич А. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. С. 582.
51. Grach S. M., Komrakov G. P., Yurishchev M. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 883.
52. Kosch M. J., Rietveld M. T., Senior A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. Art. no. L12805.

Поступила в редакцию 9 февраля 2012 г.; принята в печать 27 февраля 2012 г.

**AIRGLOW DURING IONOSPHERIC MODIFICATIONS BY THE “SURA”
FACILITY RADIATION. EXPERIMENTAL RESULTS 2010**

*S. M. Grach, V. V. Klimenko, A. V. Shindin, I. A. Nasyrov, E. N. Sergeev,
V. A. Yashnov, and N. A. Pogorelko*

We present the results of the studies of the structure and dynamics of the perturbed ionospheric region above the “Sura” facility, which were carried out in 2010 using the measurements of ionospheric airglow of the night sky at red ($\lambda = 630$ nm) and green ($\lambda = 557.7$ nm) lines of atomic oxygen. The data on the vertical sounding of the ionosphere (with subsequent simulation of the pump-wave propagation) and the measurements of the stimulated ionospheric radio emission were used as additional diagnostics of ionospheric parameters and processes occurring in the perturbed region.