

УДК 533.9.08

О СВЯЗИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ТРАССЕ GPS-СИГНАЛОВ И ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЛИНИИ 630 НМ

С. М. Грач^{1*}, И. А. Насыров^{2,1}, Д. А. Козогин^{2,1}, А. В. Шиндин¹, В. О. Дементьев²,
Е. Н. Сергеев¹, А. Д. Акчурин²

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Представлены результаты одновременных измерений полного электронного содержания ионосферы на трассе сигналов GPS и искусственного оптического свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода (длина волны $\lambda = 630$ нм), выполненных при воздействии на ионосферу радиоизлучением станда «Сура». С большой степенью вероятности можно утверждать, что при пересечении траекторией распространения сигнала «навигационный спутник—GPS-приёмник» пятна искусственного свечения максимальная яркость последнего на луче зрения оптического прибора на навигационный спутник наблюдалась в области минимума полного электронного содержания.

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением в его области отражения образуются неоднородности электронной концентрации с размерами от десятков сантиметров до десятков километров [1, 2]. Диагностика крупномасштабной (с размерами поперёк геомагнитного поля $l_{\perp} \gtrsim 0,5$ км) структуры возмущённой мощной радиоволновой области ионосферы осуществляется с помощью её просвечивания декаметровым радиоизлучением космических радиоисточников, а также ультракоротковолновыми (УКВ) сигналами низкоорбитальных [3] и геостационарных спутников, с помощью спутниковой радиотомографии [4], измерений электронной концентрации *in situ* при пролёте космических аппаратов и геофизических ракет через возмущённую область и над ней (см. обзоры [1, 2] и цитированную там литературу).

Другим эффективным методом исследования крупномасштабной структуры возмущённой области ионосферы является измерение её искусственного оптического свечения. Оптическое излучение возникает при переходе электронов с возбуждённых уровней атомов, молекул и ионов на более низкие энергетические уровни. Возбуждение соответствующих уровней происходит при столкновениях атомов с электронами, энергия которых превышает потенциал возбуждения этих уровней, а также в результате ионно-молекулярных реакций, при которых выделяется энергия, достаточная для возбуждения одного из атомов, в частности при диссоциативной рекомбинации молекул. Увеличение интенсивности оптического свечения при воздействии волны накачки (искусственное оптическое свечение) связано с ускорением электронов плазменными волнами, возникающими при развитии различных параметрических неустойчивостей в поле волны накачки с обыкновенной поляризацией. Наиболее низким потенциалом возбуждения (1,96 эВ) обладает уровень атомарного кислорода $O(^1D)$. Переход электрона с этого уровня в основное состояние $O(^3P)$ отвечает красной линии атомарного кислорода ($\lambda = 630$ нм). Радиационное время жизни этого уровня $\tau_T(O(^1D)) = 107$ с [5]. Изображения возмущённой области ионосферы в линии

* sgrach@rf.unn.ru

630 нм, зарегистрированные с помощью ПЗС-камер с соответствующими светофильтрами, указывают на существование крупномасштабной структуры пятен свечения с угловыми размерами порядка $1^\circ \div 10^\circ$ (это отвечает размерам порядка $5 \div 50$ км на высотах $250 \div 280$ км над поверхностью Земли), иногда перемещающейся (дрейфующей) в пространстве при длительном нагреве [6–12].

Крупномасштабные неоднородности с размерами $5 \div 50$ км могут также эффективно изучаться с помощью двухчастотного радиопросвечивания сигналами навигационных спутников систем GPS или ГЛОНАСС микроволнового диапазона. При распространении через ионосферу у таких сигналов появляется дополнительный набег фазы, обусловленный дисперсией радиоволн в плазме и линейно связанный с полным электронным содержанием (ПЭС) на траектории их распространения [13, 14]. С начала 80-х годов прошлого века данный метод используется для определения ПЭС в ионосфере в естественных условиях, а с 2007 года началось активное использование спутников системы GPS для определения ПЭС в ионосфере во время экспериментов по воздействию на неё мощным коротковолновым радиоизлучением. Такие исследования проводились на стендах НААРР и «Сура» [15–25]. В этом случае навигационные спутники пересекают диаграмму направленности антенных систем нагревных стендов и тем самым осуществляют радиосканирование искусственных ионосферных неоднородностей, стимулированных воздействием волны накачки. Время сканирования возмущённой области ионосферы определяется скоростью перемещения точки пересечения радиотрассы спутник–наземный приёмный пункт с модифицированной областью ионосферы (подыоносферной точки), и, в зависимости от ширины диаграммы направленности нагревного стенда, составляет $25 \div 50$ мин.

Таким образом, масштабы неоднородностей в возмущённой области ионосферы, определяемые с помощью измерений ПЭС, и характерные размеры пятен искусственного свечения оказываются близкими. В связи с этим вызывает несомненный интерес исследование корреляции величины вариаций ПЭС при пролёте навигационных спутников и яркости искусственного свечения в возмущённой области, т.е. определение того, где именно генерируется искусственное свечение: в области повышенной или пониженной электронной концентрации. Например, в экспериментах на стенде НААРР при эффективной мощности воздействия около 1 200 МВт в режиме 10 с нагрев, 10 с пауза ($[+10; -10]$ с) вблизи третьей гармоники электронной гирочастоты и при пошаговом увеличении мощности каждые 10 с от 425 до 1 700 МВт вблизи четвёртой гармоники наблюдалось увеличение ПЭС на $0,05 \div 0,06$ TECU¹, коррелированное с циклами воздействия [16, 22]. Скорее всего, увеличение ПЭС в экспериментах на стенде НААРР связано с дополнительной ионизацией ионосферной плазмы ускоренными электронами, которые образуются при больших мощностях нагрева [26–28]. В этом случае естественно ожидать увеличения яркости свечения во время воздействия. В экспериментах, проводившихся на стенде «Сура» при существенно меньших мощностях воздействия ($60 \div 120$ МВт), сканирование возмущённой области сигналами GPS выявило вариации ПЭС с наблюдаемыми характерными периодами $300 \div 1\,200$ с и амплитудами до 0,6 TECU, которые не коррелируют с циклами воздействия волны накачки на ионосферу [17, 18, 23–25]. Данные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что во время воздействия на ионосферу в пределах диаграммы направленности стенда формируется крупномасштабная ионосферная неоднородность с масштабом поперёк луча зрения $10 \div 60$ км. Поскольку при таких мощностях заметной дополнительной ионизации не наблюдается, следует ожидать рефракции волны накачки в область пониженной концентрации ионосферной плазмы и, следовательно, более эффективного ускорения электронов и генерации искусственного оптического свечения в этой области.

Первая попытка осуществить анализ одновременных измерений ПЭС и яркости оптического свечения была сделана в работе [11], результаты которой обсуждаются в дальнейших разделах.

¹ TECU — общепринятая единица измерения ПЭС; $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$.

Целью данной работы является продолжение такого анализа, т. е. исследование корреляции поведения ПЭС ионосферы на трассе сигналов GPS и искусственного оптического свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода (630 нм) вдоль траектории подыоносферной точки как по данным экспериментов [11], так и по более поздним измерениям. Ниже в разделе 1 описаны методика постановки экспериментов и условия их проведения, а также используемое диагностическое оборудование и методика обработки экспериментальных данных. Результаты анализа данных и их обсуждение приведены в разделе 2 и в Заключение.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на стенде «Сура» (р/п Васильсурск, Нижегородская область, географические координаты $56,15^\circ$ с. ш., $46,10^\circ$ в. д., магнитное склонение $71,5^\circ$) в 2010–2016 годах. Всего было проведено четырнадцать экспериментальных кампаний, в которых было выполнено более ста сеансов измерений искусственного оптического свечения. Постановка экспериментов по синхронным измерениям сигналов GPS и искусственного свечения ионосферы требует выполнения сразу нескольких внешних условий. Во-первых, измерения оптического свечения проводятся в тёмное время суток (эксперименты могут начинаться с наступлением астрономических сумерек, приблизительно через 1,5 часа после захода Солнца) в период, близкий к новолунию, и требуют ясной погоды. Во-вторых, волна накачки должна иметь обыкновенную поляризацию, а её частота f_0 должна быть ниже критической частоты F_2 -слоя ионосферы ($f_0 F_2$) в течение достаточного длительного времени (15–50 мин, пока навигационный спутник GPS/ГЛОНАСС находится в пределах диаграммы направленности стенда). При $f_0 > f_0 F_2$ эффективность возбуждения искусственных возмущений ионосферной плазмы существенно снижается или возбуждение полностью прекращается². В-третьих, для проведения радиосканирования возмущённой области ионосферы GPS-сигналами необходимо, чтобы навигационный спутник пролетел над возмущённой областью, а оптическое оборудование должно быть ориентировано таким образом, чтобы вся траектория движения спутника через диаграмму направленности стенда фиксировалась на снимаемых ПЗС-камерой кадрах. И, наконец, пролёт спутника и, соответственно, регистрация ПЭС должны проводиться синхронно с оптическими измерениями. За указанное время наблюдений ионосферные и погодные условия позволили провести лишь пять синхронных сеансов измерения вариаций ПЭС и искусственного свечения в линии $\lambda = 630$ нм при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением.

Для воздействия на ионосферу во всех экспериментах использовалась волна с обыкновенной поляризацией. Частота волны накачки выбиралась из условия $f_0 \lesssim f_0 F_2$ и варьировалась от 4,30 (минимальная рабочая частота стенда «Сура») до 5,64 МГц. Эффективная излучаемая мощность ($P_{\text{эфф}}$) на выбранных частотах составляла 65–120 МВт. Три из пяти удачных сеансов (15.03.2010, 24.08.2014 и 26.08.2014) были проведены при излучении волны накачки вертикально вверх (В) и два при наклоне диаграммы направленности на 12° от зенита на юг в плоскости магнитного меридиана (17.03.2010 и 12.03.2013). В этом случае пятно свечения обычно наблюдается в области «магнитного зенита» [10], который соответствует лучу зрения вдоль магнитного поля (МЗ). Параметры вышперечисленных сеансов измерений представлены в табл. 1.

Регистрация сигналов от навигационных спутников и, соответственно, измерения ПЭС осуществлялись с помощью специализированного приёмника «Prego-T», расположенного в непосредственной близости от антенной системы стенда «Сура». Для определения ПЭС использовалась

² Более точное условие эффективного возбуждения искусственных ионосферных возмущений таково: $f_0 < (f_0 F_2^2 + f_{ce}^2)^{1/2}$, где f_{ce} — электронная циклотронная частота, т. е. частота волны накачки должна быть ниже верхнегибридной частоты в максимуме концентрации плазмы в слое.

Таблица 1. Параметры сеансов измерений

| День наблюдения / № спутника GPS | Время пролёта спутника через поле зрения ПЗС камеры, (УТ), ч:мин | Время пролёта спутника через диаграмму направленности, (УТ), ч:мин | Режим излучения накачки, мин | Частота волны накачки f_0 , МГц | Направление излучения волны накачки |
|----------------------------------|--|--|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 15.03.2010 / № 08 | 17:11–17:54 | 17:17–17:42 | [+2; –4] | 4,30 | В |
| 17.03.2010 / № 28 | 17:50–18:38 | 18:02–18:29 | [+3; –3]; [+2; –4] | 4,30 | МЗ |
| 12.03.2013 / № 09 | 17:09–17:54 | 17:15–17:40 | [+7; –3] | 4,74 | МЗ |
| 24.08.2014 / № 32 | 19:07–19:50 | 19:18–19:41 | [+3; –3]; [+8; –4] | 4,74 | В |
| 26.08.2014 / № 32 | 19:00–19:42 | 19:10–19:32 | [+3; –3]; [+8; –4] | 5,64 | В |

методика, описанная в работах [11, 18–20, 24]. Регистрация сигналов навигационных спутников осуществлялась с частотой 1 Гц, что позволяло детектировать неоднородности с поперечными масштабами не менее 0,5 км на высоте возмущённой области ионосферы.

Синхронно с измерениями вариаций ПЭС также в непосредственной близости от антенной системы проводились измерения оптического свечения в красной линии атомарного кислорода (630 нм) с помощью ПЗС-камеры S1C/079-FP(FU) с полем зрения $20,6^\circ$, оснащённой соответствующим светофильтром с полосой пропускания $\Delta\lambda_{0,5} = 10$ нм. Регистрация портретов ночного неба проводилась с выдержкой 15 с, размер кадров составлял 288×288 пикселей [10, 29].

Для совместного анализа вариаций ПЭС и искусственного оптического свечения осуществлялась пространственно-временная привязка (наложение) траекторий пролёта спутника и портретов ночного неба в линии 630 нм, а также определение временного хода яркости свечения и ПЭС вдоль траектории спутника. Кроме этого, по портретам ночного неба находилось положение максимума интенсивности свечения по полю кадра и его временной ход. Технические детали привязки портретов к небесным координатам, местному времени и траекториям спутников, а также описание методики выделения сигналов искусственного оптического свечения можно найти в работах [11, 30].

Для устранения влияния шумов и мелкомасштабных вариаций в возмущённой области ионосферы каждому значению ПЭС ставилось в соответствие медианное значение яркости свечения по квадрату 11×11 пикселей на определённом снимке, что соответствовало линейному размеру $3 \div 5$ км на высоте 300 км с центром в точке, где в данный момент находился спутник. Этот размер приблизительно в четыре раза больше эквивалентного расстояния на снимке, которое преодолевает спутник (подыоносферная точка) за время экспозиции (15 с).

Состояние ионосферы во время проведения измерений контролировалось при помощи ионозонда. Кроме этого, для оперативной диагностики состояния ионосферы регистрировалось её искусственное радиоизлучение. Измерения искусственного радиоизлучения позволяют оценивать эффективность возбуждения плазменной турбулентности в возмущённой области ионосферы и степень близости частоты f_0 к гармоникам электронной гирочастоты nf_{ce} ($n = 3, 4$) и к частоте f_{oF_2} в реальном времени [31, 32].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах 2010 года использовались режимы воздействия на ионосферу с достаточно коротким шестиминутным периодом следования импульсов ([+2; –4] мин и [+3; –3] мин, см. соответствующий столбец 4 в табл. 1). Данные режимы воздействия позволили измерять местоположение пятна искусственного свечения на небосводе в зависимости от наклона диаграммы направленности нагревного стенда, а также определять временные характеристики развития (во

время включения волны накачки) и гашения (во время паузы) пятна искусственного оптического свечения [10, 11]. Однако синхронные измерения ПЭС не выявили вариаций с шестиминутным или близкими к этому периодами; наблюдались более медленные волнообразные вариации ПЭС с периодами от $8 \div 12$ мин до $40 \div 50$ мин.

Такие вариации ПЭС могут быть обусловлены тем, что во всех сеансах нагрев ионосферы начинался задолго до влёта спутника в пределы поля зрения ПЗС-камеры. Поскольку времена релаксации крупномасштабных неоднородностей с размерами $10 \div 50$ км в тёмное время суток после выключения волны накачки могут составлять 20 и более минут, можно предположить, что к моменту влёта спутника в диаграмму направленности интенсивность крупномасштабных неоднородностей достигала стационарного уровня и не изменялась в паузах излучения волны накачки.

С другой стороны, из анализа портретов ночного неба, приведённых в статье, следует, что от цикла к циклу излучения волны накачки крупномасштабное пятно искусственного оптического свечения возникает практически в одних и тех же пространственных координатах, т. е. его положение слабо изменяется в течение эксперимента. Исключение представляет собой эксперимент 24.08.2014, в котором пятно сместилось к западу, а яркость его увеличилась после того, как подыоносферная точка уже покинула возмущённую область ионосферы. Исходя из этого можно считать, что крупномасштабные ионосферные неоднородности, регистрируемые по вариациям ПЭС, «вморожены» в пределах диаграммы направленности стенда «Сура».

Таким образом, при анализе корреляции ПЭС и яркости искусственного оптического свечения навязанная режимом излучения стенда модуляция яркости с периодом (6 мин) более коротким, чем периоды вариаций ПЭС на траектории подыоносферной точки, создаёт дополнительные трудности.

Исходя из предположения о «вмороженности», в работе [11] была предложена методика реконструкции портретов ночного неба для приведения динамики вариаций динамики средней яркости свечения к характерным периодам вариаций ПЭС. При этом в качестве опорных брались изображения, зарегистрированные в моменты максимальной интенсивности свечения. Далее, путём линейной интерполяции по времени, восстанавливались изображения, зарегистрированные во временных интервалах между опорными изображениями. Считалось, что на портретах ночного неба, полученных во время пауз, пятно искусственного оптического свечения не релаксирует и спутник проходит над ним. Таким образом, из графика интенсивности свечения вдоль траектории движения спутника удалялись осцилляции, связанные с включением/выключением волны накачки. На основе анализа вариаций ПЭС и реконструированной средней интенсивности искусственного оптического свечения для двух сеансов измерений (15.03.2010 и 17.03.2010) в работе [11] был сделан вывод, что имеет место совпадение максимальной интенсивности искусственного оптического свечения с минимумом ПЭС.

В данной работе для исследования корреляции искусственного оптического свечения и ПЭС мы использовали иную методику. Это обусловлено следующими соображениями. Во-первых, условия экспериментов заметно отличаются для различных сеансов. В трёх случаях волна накачки излучалась вертикально вверх (15.03.2010, 24.08.2014 и 26.08.2014), а в двух — в направлении магнитного зенита (17.10.2010 и 12.03.2013). Существенно отличались в различных экспериментах как значения критической частоты f_{oF_2} , так и темп её послезаходного спада, в частности, 15.03.2010 (см. рис. 1) критические частоты упали ниже частоты волны накачки (4,3 МГц) раньше, чем спутник вошёл в поле зрения ПЗС-камеры. Начиная с 2013 года в эксперименте использовались режимы с более длинными временами (и соответственно, периодами) излучения волны накачки (см. табл. 1) во время пролёта спутника через диаграмму направленности для того, чтобы минимизировать влияние модуляции яркости свечения, связанной с включением/выключением

накачки. В то же время, дальнейшее увеличение периода излучения было нецелесообразным, поскольку для выделения яркости искусственного свечения необходима достаточно частая регистрация кадров при отсутствии воздействия и после релаксации возбуждённых атомов. Далее, при перемещении спутника через диаграмму направленности подыоносферная точка могла двигаться как вблизи центра крупномасштабной неоднородности, так и на её периферии, а в некоторых случаях минимум ПЭС имел место во время паузы в излучении волны накачки. Таким образом, применение статистических методов анализа результатов оказалось невозможным, а простая реконструкция — недостаточно эффективной. Потому далее каждый из анализируемых циклов рассматривается как отдельное событие.

В эксперименте 15 марта 2010 года воздействие на ионосферу осуществлялось на частоте $f_0 = 4,3$ МГц с эффективной мощностью $P_{эфф} \approx 120$ МВт в режиме $[+2; -4]$ мин с 16:30 до 17:27 UT.

Результаты представлены на рис. 1. На рис. 1а дана серия портретов ночного неба, полученных во время включения волны накачки, с нанесённой на них траекторией движения и положением спутника GPSN⁰08 в моменты регистрации изображения, а также сечением диаграммы направленности антенной системы стенда «Сура» на уровне половинной мощности без учёта рефракции волны накачки в ионосфере. Вверху каждого кадра указано время начала экспозиции. На рис. 1б представлены данные измерений ПЭС после удаления естественных трендов δI и интенсивности (яркости) искусственного оптического свечения b в относительных единицах аналого-цифрового преобразователя ПЗС-камеры. Чёрная сплошная линия соответствует средней интенсивности свечения по площадке 11×11 пикселей с центром в области максимума яркости, красная — средней по области 11×11 пикселей интенсивности свечения на луче зрения на спутник (маркер на портретах ночного неба). Центр этой области перемещается по траектории со скоростью движения проекции спутника на кадр. На рис. 1в показан временной ход критической частоты f_{oF_2} и частоты воздействия f_0 . Моменты времени, для которых представлены портреты ночного неба, отмечены на рис. 1б вертикальными стрелками.

Во время пролёта спутника через поле зрения камеры стенд излучал в непрерывном режиме в течение трёх циклов (17:13–17:15, 17:19–17:21 и 17:25–17:27 UT). Кроме этого, на рис. 1 приведены два более ранних цикла воздействия (17:01–17:03 и 17:07–17:09 UT), взятые в те временные промежутки, когда спутник ещё не влетел в поле зрения камеры, зато наблюдался эффект генерации свечения. Режим работы стенда показан на рис. 1б, в серыми прямоугольниками.

На всём представленном на рис. 1 временном отрезке критическая частота ионосферы f_{oF_2} монотонно убывала и была ниже частоты волны накачки f_0 примерно на $0,1 \div 0,5$ МГц. Однако во время первых трёх циклов воздействия (17:01–17:03, 17:07–17:09 и 17:13–17:15 UT) регистрировалось искусственное радиоизлучение ионосферы и возбуждалось её искусственное свечение. Во время цикла воздействия 17:19–17:21 искусственное радиоизлучение было слабым, но возбуждение искусственного оптического свечения ещё наблюдалось (чёрная кривая на рис. 1б и портрет 17:20:02 на рис. 1а). Во время последнего цикла воздействия (17:25–17:27 UTC) искусственное оптическое свечение не возбуждалось, критическая частота f_{oF_2} упала ниже частоты f_0 более, чем на $0,5$ МГц, и искусственное радиоизлучение не регистрировалось. В связи с этим в 17:27 UT воздействие на ионосферу было прекращено, ПЗС-камера выключена. Однако регистрация ПЭС продолжалась в автоматическом режиме (синяя линия на рис. 1б). Вариаций ПЭС, коррелирующих с циклами включения волны накачки, на рис. 1 не наблюдается. Тем не менее, в течение всего представленного временного интервала регистрируются волнообразные осцилляции ПЭС с периодом $20 \div 25$ мин и магнитудой около $0,4$ TECU. Учитывая приведённые выше соображения, можно считать, что к моменту влёта спутника в диаграмму направленности стенда интенсивность крупномасштабных неоднородностей достигла стационарного уровня и не изменялась в паузах между циклами воздействия.

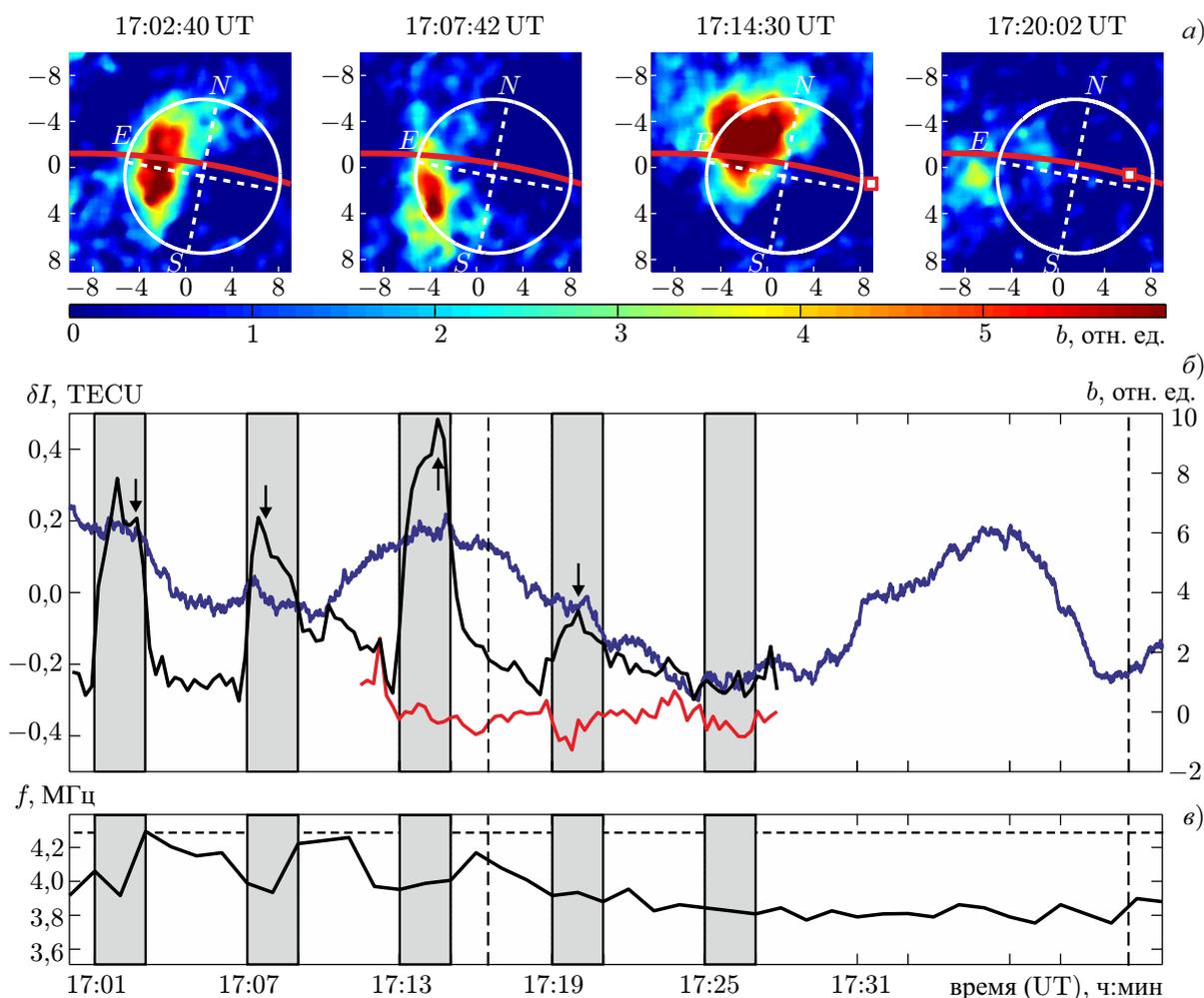


Рис. 1. Результаты совместных измерений ПЭС и искусственного оптического свечения 15.03.2010, при вертикальном воздействии. Верхняя панель — серия портретов ночного неба, полученных во время излучения волны накачки. На изображения нанесены траектория (красная линия) и положение спутника GPS № 08 (маркер) в моменты времени, отмеченные на панели б вертикальными стрелками. Белой окружностью показана проекция главного лепестка диаграммы направленности стэнда «Сура» на плоскость кадра. Координаты указаны в угловых градусах поля зрения камеры, яркость — в относительных единицах АЦП камеры. Панель б — 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). На панели в представлен временной ход критической частоты ионосферы f_{oF_2} по данным ионозонда «Циклон-GPS», расположенного в 170 км к востоку от стэнда, горизонтальной пунктирной линией отмечена частота волны накачки $f_0 = 4,3$ МГц. Серыми вертикальными прямоугольниками показан режим работы передатчиков стэнда «Сура», вертикальными пунктирными линиями — моменты влёта и вылета спутника в диаграмму направленности

Из анализа портретов ночного неба, представленных на рис. 1а (кадры 17:02:40, 17:07:42 и 17:14:30 UT), видно, что позиция пятна свечения вдоль линии восток–запад (т. е. поперёк движения спутника) остаётся приблизительно неизменной и находится вблизи восточной границы диаграммы направленности стэнда. Радиотрасса спутник GPS № 08—наземный приёмный пункт пересекает эту область в интервале времени 17:35–17:45 UT, когда воздействие на ионосферу и регистрация портретов ночного неба уже были прекращены. Поэтому однозначного ответа на

вопрос о связи вариаций ПЭС и положения пятна искусственного свечения сделать нельзя. Тем не менее, в это время наблюдается заметное уменьшение ПЭС до $\delta I \approx -0,25$ TECU, и из предположения о «вмороженности» крупномасштабных ионосферных неоднородностей в течение эксперимента следует, что генерация искусственного оптического свечения происходит в области ионосферы с пониженной электронной концентрацией.

Во время эксперимента 17 марта 2010 года диаграмма направленности антенной системы стенда «Сура» была наклонена на 12° на юг в плоскости магнитного меридиана, т. е. направлена в магнитный зенит. Как известно, при воздействии в магнитный зенит, возмущения, вызванные волной накачки (нагрев электронов, искусственное свечение, дополнительная ионизация, интенсивность неоднородностей), максимальны [7, 29, 33, 34], а при достаточно небольшом отклонении диаграммы направленности к югу от вертикали пятно искусственного свечения перемещается из зенита в магнитный зенит [9, 10, 35]. Воздействие на ионосферу осуществлялось на частоте $f_0 = 4,3$ МГц с $P_{\text{эфф}} = 120$ МВт в режимах [+3; -3] мин до влёта спутника в пределы диаграммы направленности и [+2; -4] мин во время нахождения спутника в пределах диаграммы направленности стенда.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Здесь дополнительно к трём панелям, аналогичным приведённым на рис. 1, добавлена панель с четырьмя портретами ночного неба в красной линии, зарегистрированными в цикле воздействия 18:19–18:21 UT.

Как видно из рис. 2, во время нахождения спутника GPS № 28 в пределах поля зрения ПЗС-камеры наблюдалось постепенное уменьшение критической частоты f_{oF_2} . По-видимому, с перестройкой ионосферы связано заметное падение максимальной интенсивности свечения в период с 17:49 до 18:04 UT (рис. 2б, чёрная линия). Во время цикла воздействия 18:29–18:31 UT критическая частота упала ниже частоты f_0 , генерация искусственного радиоизлучения прекратилась и эксперимент был остановлен.

В этом эксперименте во время трёх- и двухминутных включений волны накачки в возмущённой области ионосферы возникало несколько (от 2 до 4) перекрывающихся пятен искусственного свечения. При этом область, занятая пятнами, была расположена в южной части диаграммы направленности стенда и начиналась на $2^\circ \div 3^\circ$ южнее обозначенной на рисунке границы диаграммы направленности. Наиболее яркое из пятен находилось вблизи направления на магнитный зенит. Характерный размер пятен в направлении поперёк геомагнитного поля составлял $0,5^\circ \div 1,5^\circ$, что соответствует $2 \div 7$ км на высотах области верхнего гибридного резонанса и отражения волны накачки ($280 \div 310$ км), оценённых по ионограммам. Все наблюдаемые пятна «выстраивались» внутри достаточно узкого сектора, ориентированного вдоль проекций силовых линий геомагнитного поля на плоскость зарегистрированных изображений. Детальный анализ показал, что вдоль этих же направлений происходит развитие во времени пятен искусственного оптического свечения после включения волны накачки. Последний эффект продемонстрирован на рис. 2г для цикла воздействия 18:19–18:21 UT. Видно, что на начальном этапе (кадр 18:19:31 UT) пятно свечения возникает одновременно в двух «очагах», один из которых находится в «магнитном зените» (белый крест на портретах ночного неба), а второй — северо-восточнее этого направления. Затем пятна свечения расширяются, между ними появляется дополнительный «очаг», и к концу цикла (кадр 18:20:46 UT) все три ярких пятна расположены вдоль проекции геомагнитной силовой линии, вдоль которой вытянут «хвост» (или страт) менее яркого свечения. Причём здесь, как и в предыдущих циклах воздействия (18:07–18:09 и 18:13–18:15 UT), пятно свечения «нагоняет» спутник, поскольку угловая скорость расширения пятна свечения при его развитии после включения волны накачки больше угловой скорости движения спутника по полю зрения камеры. Последнее хорошо видно по поведению красной кривой на рис. 2б и по портретам на рис. 2г.

Отметим также, что в период с 17:57 до 18:02 UT северная часть наблюдаемой группы пятен

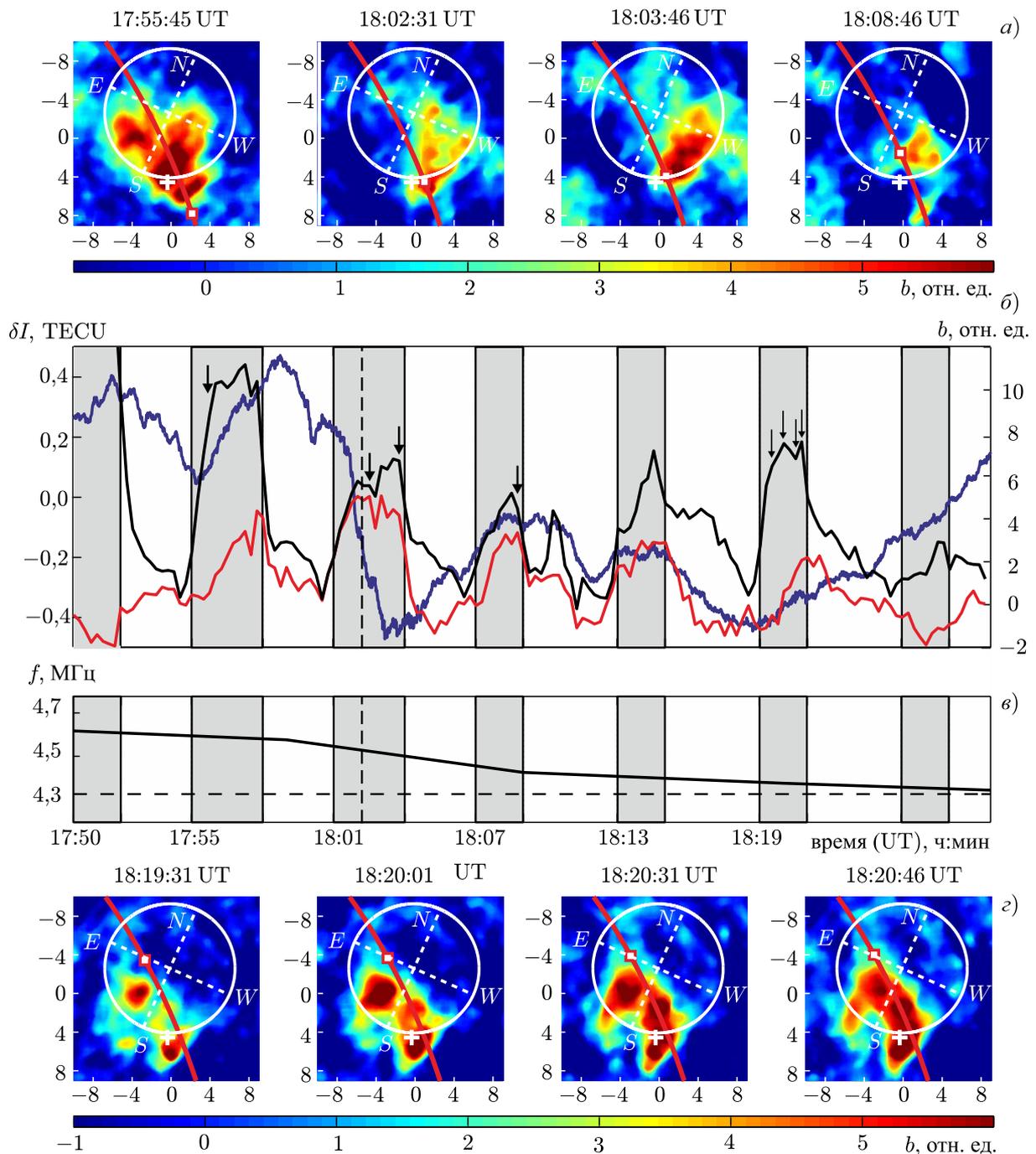


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 17.03.2010. Спутник GPS № 28, $f_0 = 4,3$ МГц, направление воздействия — магнитный зенит, положение магнитного зенита отмечено белым крестом. Добавлена панель z с портретами ночного неба в линии 630 нм

перемещалась в западном направлении, а с 18:15 до 18:20 UT — в восточном направлении приблизительно на 8° , тогда как положение наиболее яркого пятна вблизи магнитного зенита оставалось практически неизменным. Существование подобной стратификации области искусственного свечения и дрейфов с востока на запад отмечалось в работах [6, 9, 10], однако в представленных в настоящей работе экспериментах данная стратификация наблюдалась только для одного вечера

наблюдений.

В течение всего временного интервала, представленного на рис. 2, наблюдаются волнообразные вариации ПЭС с периодами $8 \div 12$ мин (рис. 2б, синяя линия). Однако заметной корреляции между циклами воздействия мощным радиоизлучением и вариациями ПЭС в этом сеансе не наблюдается. Динамика максимальной интенсивности искусственного оптического свечения (чёрная линия) коррелирует с циклами воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением. Динамика средней интенсивности свечения из подыоносферной точки (красная линия) зависит от положения спутника относительно пятна свечения, что видно из сравнения хода чёрной и красной линий на рис. 2б, кадра 17:55:45 UT на рис. 2а и б.

Во время цикла воздействия 18:01–18:04 UT направление на спутник было близко к направлению в магнитный зенит. Как видно из рис. 2а, во время цикла воздействия 18:01–18:04 UT спутник находился практически над областью максимальной яркости искусственного оптического свечения, что подтверждается всплеском интенсивности свечения на рис. 2б (красная кривая). Во время регистрации шести снимков с 18:02:31 по 18:03:46 UT направление на спутник было наиболее близко к направлению в магнитный зенит. Таким образом спутник прошёл в непосредственной близости от этого направления за промежуток времени около 100 с. В это же время был зарегистрирован минимум ПЭС $\delta I \approx -0,5$ TECU (синяя кривая на рис. 2б), т. е. крупномасштабная ионосферная неоднородность с пониженной электронной концентрацией. Таким образом, поперечный размер области с пониженной электронной концентрацией, в которой наблюдалась генерация искусственного оптического свечения, составляла около 3 км.

Во время эксперимента 17.03.2010, как отмечено выше, пятна свечения перемещались по небосводу и эффект «вмороженности» в целом не наблюдался. Тем не менее, в цикле 18:13–18:15 UT в процессе развития искусственного свечения положение одного из стратов оставалось приблизительно постоянным. При пересечении лучом зрения на спутник положения этого страта (в 18:12 UT, до включения волны накачки) наблюдался локальный минимум ПЭС ($\delta I \approx -0,15$ TECU). Искусственное оптическое свечение, естественно, в это время отсутствовало. Тем не менее, с достаточной долей вероятности можно утверждать, что в следующем цикле включения волны накачки генерация свечения имела место в области понижения электронной концентрации.

Данные совместных измерений вариаций ПЭС и искусственного оптического свечения ионосферы во время проведения эксперимента 12 марта 2013 года представлены на рис. 3. Критическая частота ионосферы f_{oF_2} оставалась достаточно высокой, на $0,6 \div 0,8$ МГц выше рабочей частоты станда $f_0 = 4,74$ МГц для всего периода измерений. Высота отражения волны накачки для этого периода составляла $h_{pw} \approx 270$ км. Спутник GPS № 09 двигался с северо-запада на юго-восток и пересекал диаграмму направленности излучения станда, наклонённую на 12° на юг, в интервале времени 17:15–17:40 UT. Волна накачки излучалась в режиме $[+7; -3]$ мин, начиная с 16:40 UT. Таким образом, время воздействия было достаточно длительным для создания крупномасштабных возмущений ионосферной плазмы. При пролёте спутника заметной корреляции между циклами включения волны накачки и вариациями ПЭС (рис. 3б, синяя кривая) не наблюдалось. Период вариаций ПЭС вдоль траектории составлял около 15 мин, и можно предположить, что спутник проходил над стационарными «вмороженными» неоднородностями с размером $30 \div 35$ км.

К сожалению, во время эксперимента имел место сбой таймеров, управляющих режимом работы мощных передатчиков станда «Сура», что привело к излучению волны накачки во время пауз. Реальный режим излучения показан на рис. 3б, в серых прямоугольниках. В связи со сбоем времени пауз не хватало для полной релаксации яркости свечения до фоновой, но, тем не менее, качественное поведение яркости на рис. 3 отражено правильно. Более того, следует заметить, что в эксперименте 12.03.2013 максимальная яркость искусственного свечения была заметно выше, чем во время других экспериментов, представленных в данной работе.

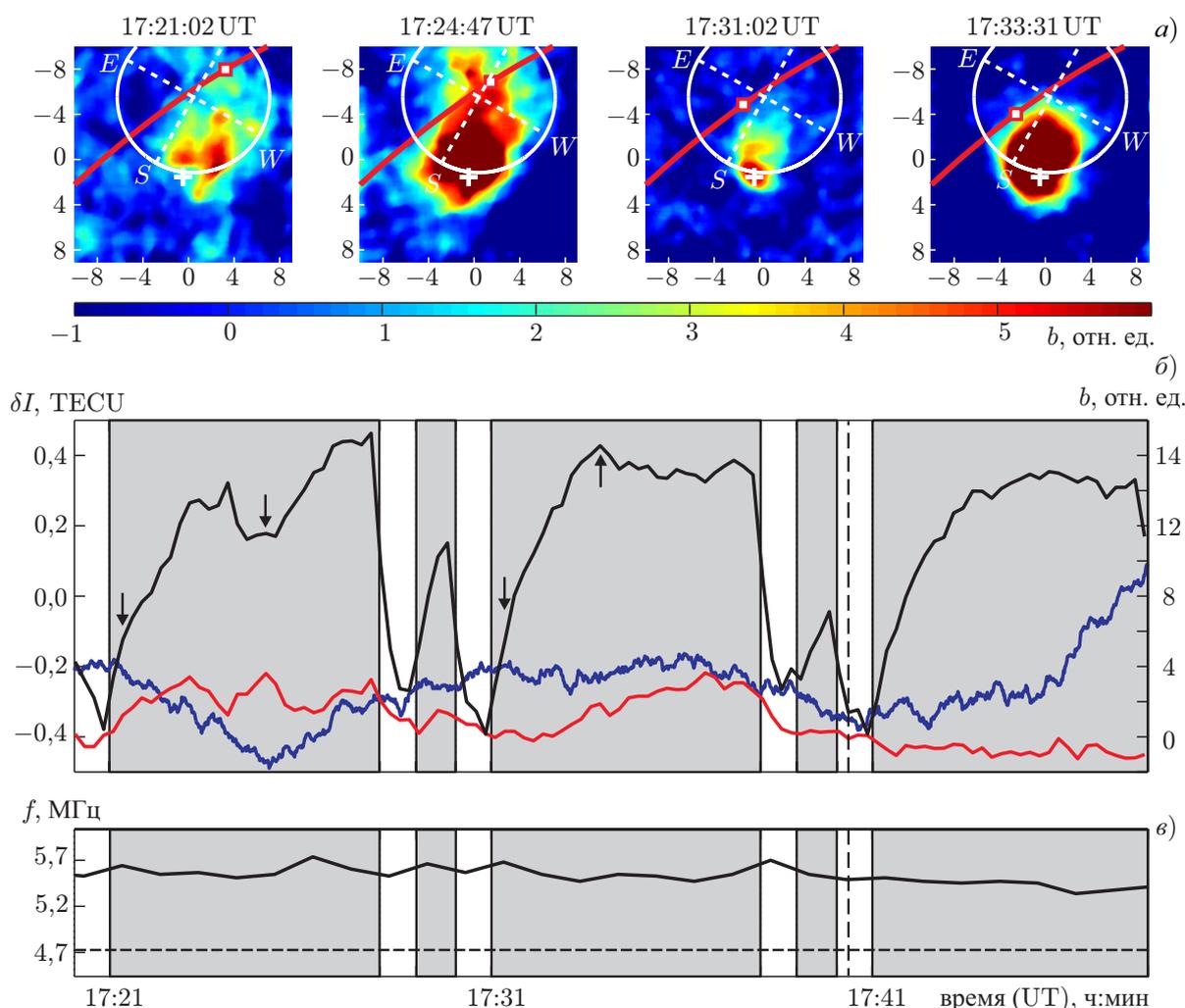


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 12.03.2013. Спутник GPS № 09, $f_0 = 4,74$ МГц

Как видно из рис. 3, здесь, как и в предыдущем случае (17.03.2010), динамика интенсивности оптического свечения (чёрная и красная линии) коррелирует с циклами воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением. По портретам ночного неба видно, что, как и 17.03.2010, развитие пятна искусственного оптического свечения начинается из области, близкой к магнитному зениту. Затем пятно разрастается в северо-восточном направлении вдоль проекций силовых линий геомагнитного поля на плоскость кадра. При этом в сеансе 17:21:00–17:29:00 UT свечение возникает одновременно в двух очагах («стратах»), смещённых относительно друг друга вдоль линии восток–запад (кадр 17:21:02 UT). В процессе развития свечения значения интенсивности в этих стратах варьировались относительно друг друга. В 17:26:45 UT они объединились в своей центральной части вблизи магнитного зенита, а на северо-восточной периферии пятна при этом относительные вариации яркости продолжались. С такой динамикой связаны, по-видимому, уменьшение интенсивности свечения в центральной, наиболее яркой, части пятна в период с 17:24:15 по 17:26:15 UT и осцилляции интенсивности свечения области изображения на кадре, соответствующей положению спутника в указанный момент времени, во второй половине цикла (чёрная и красная кривые на рис. 3б). Именно во время этого цикла спутник прошёл над краем пятна свечения, в северо-восточной его части. Из поведения красной кривой и кадра 17:24:47 UT (а также кадров, зарегистрированных в соседние моменты времени с интервалом в 15 с) видно, что за отрезок

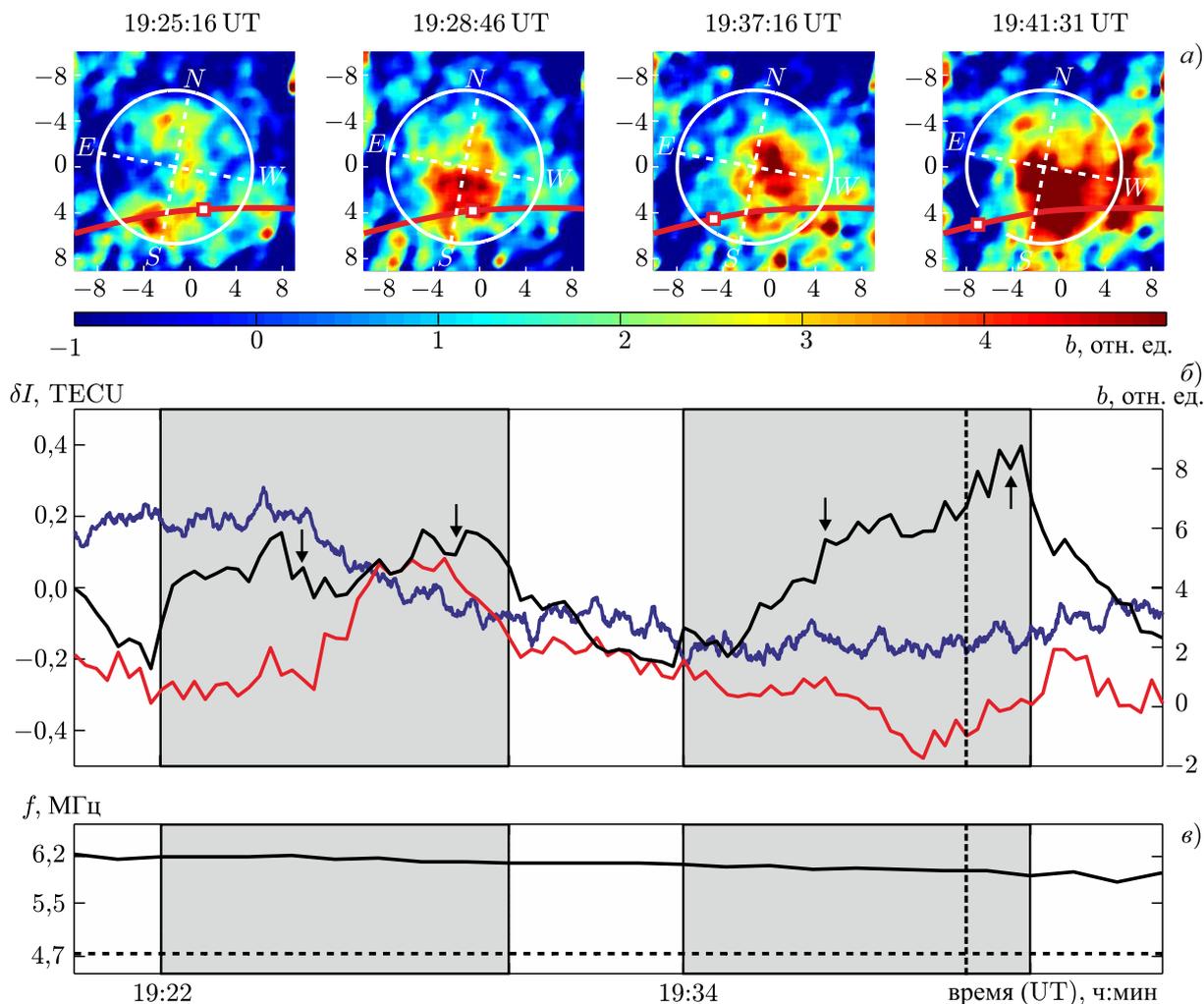


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 24.08.2014. Спутник GPS № 2, $f_0 = 4,74$ МГц

времени 17:24–17:25 UT луч зрения на спутник пересёк вытянутый вдоль силовой геомагнитной линии «хвост» пятна искусственного оптического свечения. В этот же момент времени наблюдается и минимум ПЭС. Во время следующих циклов воздействия 17:31–17:38 UT и 17:41–17:48 UT стратификация пятна свечения не регистрировалась, пятно развивалось как единое целое и его яркость росла практически монотонно. В цикле 17:31–17:38 UT пятно «наползло» на спутник по мере своего развития, что видно и из поведения красной кривой на рис. 3б, и из портрета ночного неба 17:33:31 UT. Во время следующего цикла воздействия 17:41–17:48 UT спутник вышел из диаграммы направленности станда (вертикальная пунктирная линия на рис. 3б) и области локализации пятна свечения и увеличения яркости в направлении на спутник не наблюдалось.

Таким образом можно сказать, что 12.03.2013 максимум интенсивности искусственного оптического свечения отвечал области магнитного зенита». Во время регистрации минимума ПЭС спутник GPS № 09 проходил над вытянутым вдоль силовых линий магнитного поля Земли «хвостом» пятна искусственного оптического свечения.

В эксперименте 24 августа 2014 года спутник GPS № 32 пересекал диаграмму направленности станда во временном интервале 19:18–19:41 UT. До подлёта спутника к диаграмме воздействие на ионосферу осуществлялось шестиминутными циклами [+3; -3] мин, затем, при подлёте спутника через неё, цикл воздействия менялся на двенадцатиминутный [+8; -4] мин. Излучение осуществ-

лялось в вертикальном направлении с частотой $f_0 = 4,74$ МГц. Критическая частота f_{oF_2} во время проведения измерений составляла около 6 МГц, высота отражения волны накачки $h_{pw} \approx 260 \div 270$ км.

Данные совместных измерений вариаций ПЭС и искусственного оптического свечения ионосферы представлены на рис. 4.

В течение всего времени пролёта спутника наблюдаются волнообразные вариации ПЭС с периодом около 30 мин, заметной их корреляции с циклами нагрева нет. Хорошо видна корреляция интенсивности в области максимума яркости пятна свечения, расположенного в юго-западной части диаграммы направленности станда, с циклами воздействия волны накачки на ионосферу. В то же время интенсивность свечения в первом двенадцатиминутном цикле 19:22–19:34 UT была заметно меньше, чем в предыдущих экспериментах. Кроме того, нерегулярной была структура пятна свечения: позиция максимума яркости перемещалась от кадра к кадру, а максимальная яркость заметно варьировалась, вплоть до 50 %. К концу второго цикла (19:34–19:46 UT) яркость и размер пятна свечения заметно увеличиваются; кроме того, несколько западнее диаграммы направленности развивается ещё одно пятно (страт) свечения, вытянутое вдоль магнитного поля (см. кадр 19:41:31 UT). К этому времени спутник вышел из соответствующей области небосвода, и поведение ПЭС осталось неизвестным.

Во время первого двенадцатиминутного цикла воздействия спутник GPS № 32 прошёл южнее центра области генерации искусственного оптического свечения. Из анализа кривых, приведённых на рис. 4б, видно, что яркость свечения в области изображения на кадре, соответствующей положению спутника (красная кривая), приблизительно в 19:26:30 UT начинала нарастать и в течение приблизительно двух минут, с 19:27:00 UT до 19:29:00 UT, была максимальной (во времени) и лишь незначительно меньше максимальной яркости свечения по кадру (чёрная кривая). В это время, как следует из анализа портретов ночного неба, подыоносферная точка спутника проходила практически через наиболее яркую область пятна свечения. В это же время синяя кривая на рис. 4б демонстрирует заметный спад ПЭС ($\delta I \approx 0,1$ TECU). В следующем двенадцатиминутном цикле подыоносферная точка выходит из области генерации свечения, хотя ПЭС в это время оказывается несколько ниже.

В эксперименте 26 августа 2014 года навигационный спутник GPS № 32 пересёк поле зрения ПЭС-камеры за интервал времени 19:00–19:42 UT, а диаграмму направленности станда — за интервал 19:10–19:32 UT. Режим излучения волны накачки был таким же, как и 24.08.2014. Излучение волны накачки осуществлялось в вертикальном направлении, $f_0 = 5,64$ МГц, $f_{oF_2} \approx 6,2 \div 6,8$ МГц, $h_{pw} \approx 280 \div 290$ км.

Результаты совместных измерений ПЭС и искусственного оптического свечения 26.08.2014 представлены на рис. 5. Метеорологические условия (сильная облачность) позволили зарегистрировать искусственное свечение ионосферы только в период 19:17–19:23 UT во время восьмиминутного цикла излучения волны накачки 19:17–19:25 UT. В это время небо прояснилось, а спутник GPS № 32 проходил над центром пятна искусственного свечения, которое возникало юго-западнее оси главного лепестка диаграммы направленности станда (кадр 19:18:03). По всей видимости, как и в эксперименте 24.08.2014, это связано с рефракцией мощной радиоволны в ионосфере. Развитие пятна искусственного оптического свечения также происходит преимущественно в юго-западном направлении, вдоль силовых линий геомагнитного поля (кадр 19:21:18 UT). Резкий спад яркости свечения в 19:23 UT обусловлен возвращением облачного покрова.

Исходя из анализа портретов ночного неба, поведения средней интенсивности свечения из области подыоносферной точки (красная кривая) и поведения ПЭС (синяя кривая), можно утверждать, что наиболее сильное искусственное оптическое свечение наблюдается из области с пониженной электронной концентрацией.

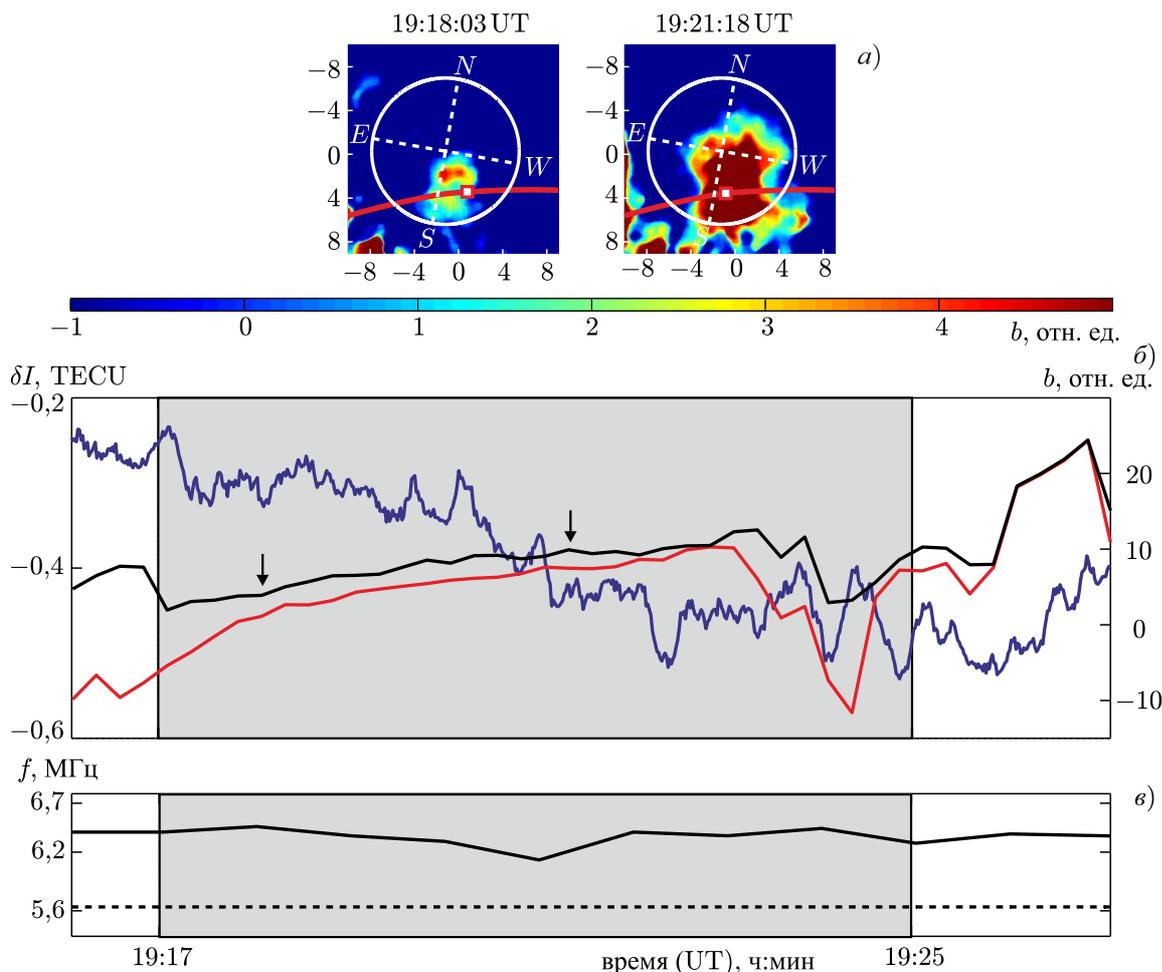


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для 26.08.2014. Спутник GPS № 32, $f_0 = 5,64$ МГц

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы данные экспериментов по воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения, во время которых над диаграммой направленности стелды «Сура» проходили навигационные спутники системы GPS и имелась возможность наблюдений искусственного оптического свечения ионосферы. В течение нескольких лет наблюдений такое совпадение имело место пять раз. При этом ионосферные условия (критическая частота) и состояние облачного покрова не были идентичными. Варьировались от эксперимента к эксперименту и яркость свечения, а также взаимное расположение траекторий подыоносферной точки спутников и пятен искусственного свечения (см. рис. 1–5). Так, над центром пятна свечения траектория спутника проходила только однажды, 17.03.2010. В эксперименте 12.03.2013 спутник прошёл над северо-восточной периферией пятна, 24.08.2014 — южнее центра группы пятен. 26.08.2014 спутник прошёл южнее пятна свечения достаточно близко к его центру, но измерения свечения были возможны только в течение короткого (около 6 мин) просвета между облаками. В эксперименте 15.03.2010 критическая частота ионосферы упала ниже рабочей частоты стелды раньше, чем спутник подошёл к позиции «над пятном свечения», и для анализа корреляции ПЭС и положения пятна пришлось использовать гипотезу о «вмороженности», т. е. неизменности положения крупных неоднородностей. Не во всех экспериментах положение пятна оставалось неизменным при пролёте спутника. Например,

изменения направления вытянутости пятна в эксперименте 17.03.2010 более всего напоминают осцилляции полосы свечения (страта) по азимуту по отношению к направлению на магнитный зенит, при этом страт остаётся вытянутым вдоль проекций магнитного поля на плоскость снимков. В таких сеансах наблюдений предположением о «вмороженности» надо пользоваться с большой осторожностью. Всё это сделало невозможным какую-либо статистическую обработку результатов экспериментов.

Тем не менее, на основе анализа поведения ПЭС и яркости искусственного оптического свечения в линии 630 нм в направлении на спутник, а также пространственного положения пятен свечения и их поведения во времени на зарегистрированных портретах ночного неба, с большой степенью вероятности можно утверждать, что положение пятна искусственного оптического свечения соответствовало минимальным значениям ПЭС. Это утверждение соответствует тому что, свечение генерируется в области пониженной электронной концентрации, и именно в этой области количество энергичных электронов, ускоренных плазменными волнами до потенциала возбуждения оптических уровней, оказывается наибольшим. Следовательно, более интенсивными должны быть плазменные волны, и, соответственно, большей должна быть амплитуда волны накачки. Такой эффект представляется вполне естественным, т. к. вследствие самофокусировочной неустойчивости [36–38] или фокусировки на естественных неоднородностях электронной концентрации энергия волны накачки должна концентрироваться в областях пониженной концентрации ионосферной плазмы. Примеры расчёта траекторий лучей волны накачки с модельным включением вытянутых вдоль магнитного поля крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы (областей пониженной концентрации), демонстрирующие эффект захвата волны накачки в крупные неоднородности, приведены, например, в работах [10, 39].

Увеличение ПЭС на стенде HAARP на $0,05 \div 0,06$ TECU, коррелирующее с циклами воздействия на ионосферу [16, 22] при существенно большей эффективной мощности воздействия (от 425 до 1700 МВт) в послеполуденные часы, связано, по всей вероятности, с дополнительной ионизацией ионосферной плазмы ускоренными электронами, которые образуются при таких мощностях нагрева [26–28]. В этом случае в тёмное время суток естественно ожидать увеличения яркости свечения во время воздействия, что и наблюдалось в работе [26]. Сведения об одновременных измерениях ПЭС и искусственного свечения на стенде HAARP в литературе отсутствуют.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам стенда «Сура» Г. П. Комракову, А. В. Першину и Е. В. Пичужкину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17–72–10181, методики астрометрической калибровки и выделения пятен искусственного свечения, и проект 14–12–00706, постановка задачи, анализ и сопоставление данных измерений ПЭС и оптического свечения) и РФФИ (проект 17–302–50013 «мол_нр», первичная обработка данных измерений ПЭС и искусственного оптического свечения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
2. Грач С. М., Сергеев Е. Н., Мишин Е. В., Шиндин А. В. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189.
3. Чёрный Ф. Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1962. 480 с.
4. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
5. McEwan M. J., Phillips L. F. Chemistry of atmosphere. New York: John Wiley & Sons, 1975. 301 p.

6. Bernhardt P. A., Tepley C. A., Duncan L. M. // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94, No. 47. P. 9071.
7. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2003. V. 108, No. A4. P. 1141.
8. Kosch M. J., Pedersen T., Mishin E., et al. // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, No. A8. Art. no. A08304.
9. Grach S. M., Kosch M. J., Yashnov V. A., et al. // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25, No. 3. P. 689.
10. Грач С. М., Клименко В. В., Шиндин А. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2012. Т. 55, № 1–2. С. 36.
11. Шиндин А. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Рябов А. В. // *Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского.* 2012. Т. 4, № 1. С. 105.
12. Djuth F. T., Pedersen T. R., Gerken E. A., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94, No. 12. Art. no. 125001.
13. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS–мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
14. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.
15. Терешенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2008. Т. 51, № 11. С. 934.
16. Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, No. 22. Art. no. L22102.
17. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
18. Рябов А. В., Грач С. М., Шиндин А. В., Котик Д. С. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2011. Т. 54, № 7. С. 485.
19. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., Kurbatov G. A., et al. // *Adv. Space Research.* 2011. V. 47, No. 10. P. 1743.
20. Kunitsyn V. E., Vasilieva E. S., Frolov V. L., et al. // *Radio Science.* 2012. V. 47, No. 3. Art. no. RS0L15.
21. Najmi A., Milikh G., Secan J., et al. // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119, No. 7. P. 6000.
22. Najmi A., Milikh G., Yampolski Y. M., et al. // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120, No. 8. P. 6646.
23. Фролов В. Л., Шорохова Е. А., Куницын В. Е. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2015. Т. 58, № 10. С. 797.
24. Nasyrov I. A., Kogogin D. A., Shindin A. V., et al. // *Adv. Space Research.* 2016. V. 47, No. 4. P. 1015.
25. Когогин Д. А., Насыров И. А., Грач С. М. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2017. Т. 57, № 1. С. 100.
26. Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, No. 2. Art. no. L02106.
27. Sergeev E., Grach S., Shindin A., et al. // *Physical Rev. Lett.* 2013. V. 110, No. 6. Art. no. 065002.
28. Bernhardt P. A., Siefring C. L., Briczinski S. J., et al. // *Radio Science.* 2016. V. 51, No. 7. P. 1081.
29. Шиндин А. В., Грач С. М., Клименко В. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2014. Т. 57, № 11. С. 849.
30. Шиндин А. В., Клименко В. В., Когогин Д. А. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2017. Т. 60, № 11. С. 949.
31. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // *Advan. Space Res.* 2006. V. 38. P. 2518.
32. Grach S. M., Sergeev E. N., Shindin A. V., et al. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2015. V. 120, No. 1. P. 666.

33. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1991. 149 с.
34. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. 468 с.
35. Kosch M., Bryers C., Rietveld M. T., et al. // *Earth, Planets and Space*. 2014. V. 66, No. 1. Art. no. 159.
36. Васьков В. В., Гуревич А. В. Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 81.
37. Gurevich A. V., Zybin K. P., Carlson H. C., Pedersen T. // *Phys. Lett.* 2002. V. A305. P. 264.
38. Gondarenko N. A., Ossakow S. L., Milikh G. M. // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, No. 9. Art. no. A09304.
39. Gurevich A., Carlson H., Kelley M., et al. // *Phys. Lett.* 1999. V. A251. P. 311.

Поступила в редакцию 7 февраля 2018 г.; принята в печать 30 марта 2018 г.

ON THE CONNECTION BETWEEN THE SPATIAL BEHAVIOR OF THE TOTAL ELECTRON CONTENT OF THE IONOSPHERE ON THE GPS SIGNAL PATH AND THE IONOSPHERIC ARTIFICIAL AIRGLOW IN THE 630 nm LINE

S. M. Grach, I. A. Nasyrov, D. A. Kogogin, A. V. Shindin, V. O. Dementiev, E. N. Sergeev, and A. D. Akchurin

We present the results of simultaneous measurements of the total electron content (TEC) of the ionosphere on the GPS signal path and the ionospheric artificial airglow in the atomic oxygen red line ($\lambda = 630$ nm) during HF pumping of the ionosphere by the Sura facility radiation. It is very likely that when the signal propagation path “navigation satellite—GPS receiver” intersects a spot of artificial airglow, the maximum brightness of the latter on the line of sight of the optical device at the navigation satellite was observed in the region of the total electron content minimum.