

УДК 551.506; 551.501; 551.510.62

## GPS-ДИАГНОСТИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ $F_2$ -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ

В. Л. Фролов<sup>1,4</sup>, И. А. Болотин<sup>1</sup>, Г. П. Комраков<sup>1</sup>, Я. В. Глухов<sup>2</sup>,  
Е. С. Андреева<sup>3</sup>, В. Е. Куницын<sup>3</sup>, Г. А. Курбатов<sup>3</sup>

Поступила в редакцию 09 ноября 2015 г.

В работе рассматриваются возможности диагностики искусственных крупномасштабных возмущений плотности плазмы во внешней ионосфере Земли сигналами ИСЗ навигационной системы GPS и сигналами низкоорбитальных ИСЗ (метод радиотомографии). Сравнительный анализ результатов, полученных двумя этими методами, позволил установить, что крупномасштабные плазменные возмущения, индуцируемые на высотах выше максимума  $F_2$ -слоя ионосферы, могут вносить заметный вклад в измеряемые вариации ПЭС, что открывает новые возможности для их изучения. Эксперименты выполнялись на нагревном стенде Сура.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, GPS, СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ, ПРИЕМНИК, ТЕХНОЛОГИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ИСКУССТВЕННЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ, НАГРЕВНЫЙ СТЕНД СУРА, РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования двух последних десятилетий, направленные на изучение характеристик воздействия мощным КВ радиоизлучением на ионосферу Земли, привели к пониманию того, что возмущенная область ионосферы, где наблюдается развитие искусственной ионосферной турбулентности и, в частности, генерация искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) с размерами поперек геомагнитного поля  $l_{\perp}$  от долей метра до десятков километров, не ограничивается только областью высот вблизи высоты отражения волны накачки (ВН), а захватывает большой объем ионосферы от высоты ее  $E$ -слоя до высот внешней ионосферы в вертикальном и до 500 км в горизонтальном направлениях [1,2]. При этом наиболее интенсивная ионосферная турбулентность возбуждается в  $F_2$ -слое ионосферы при использовании волн  $O$ -поляризации, когда вблизи высоты их отражения возбуждаются параметрические неустойчивости, приводящие к почти полному поглощению энергии мощной радиоволны плазмой и сильному ее разогреву [3,4]. Измерения, выполненные на стенде СУРА (НИРФИ, Н. Новгород; координаты стенда: 56.15° с.ш., 46.1° в.д.), позволили установить, что наиболее интенсивные ИИН всех масштабов возбуждаются в области «магнитного зенита» для ВН, когда мощная радиоволна, посланная с Земли в плоскости геомагнитного меридиана под углом 12-14° к югу от вертикали, распространяется на высоте верхнегибридного резонанса вдоль силовых линий геомагнитного поля, обеспечивая тем самым наиболее эффективный разогрев плазмы [4-6].

Изучение крупномасштабных возмущений плотности плазмы, которые имеют размеры от нескольких километров до десятков километров, проводилось давно и различными методами. Однако ситуация здесь качественно изменилась, когда, начиная с 2002 г., на стенде СУРА стали проводиться радиотомографические измерения пространственной структуры возмущенной области ионосферы [1, 7, 8]. Эти измерения продемонстрировали, что помимо полости с дефицитом до 10-20% плотности плазмы, которая обнаруживается в области высот 200-400 км как вытянутая вдоль силовых линий геомагнитного поля структура, обладающая свойствами фокусирующей линзы, на некотором расстоянии вокруг нее также регистрируются крупномасштабные неоднородности плотности плазмы с размерами  $l_{\perp} \approx 30$ -50 км.

(1) Научно-исследовательский радиофизический институт (603950, Н. Новгород, ул. Б.Печерская 25/12а, frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru)

(2) Институт прикладной геофизики (129128, г.Москва, ул. Ростокинская, д. 9)

(3) Московский Государственный Университет, Физический факультет (119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, строение 1)

(4) Казанский (Приволжский) Федеральный Университет (420008, г.Казань, ул. Кремлёвская, д.18)

В последнее десятилетие на стенде СУРА для изучения свойств крупномасштабных ИИН стал широко использоваться метод зондирования возмущенной области ионосферы сигналами ИСЗ навигационных систем GPS-GLONASS [8-11]. В частности, в [11] с помощью этого метода было показано, что крупномасштабные ИИН километровых масштабов наиболее эффективно генерируются в области «магнитного зенита» для ВН. Однако следует заметить, что при простоте использования этого метода он обладает довольно существенными недостатками: 1) измеренные вариации плотности плазмы относятся ко всему пути от ИСЗ до приемника, 2) величины скоростей движения проекции луча на ИСЗ по ионосфере и дрейфа неоднородностей плотности плазмы оказываются одного порядка на высотах ~ 250 км. Это в ряде случаев усложняет интерпретацию результатов измерений, если дополнительно не использовать каких-либо других методов диагностики искусственных плазменных образований.

Одним из важных достижений последних лет явилось обнаружение формирования дактов с повышенной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы (~ 700 км) при модификации  $F_2$ -слоя ионосферы мощными радиоволнами  $O$ -поляризации. Такие дакты имеют поперечный к геомагнитному полю размер 60 – 110 км и характеризуются относительным увеличением плотности плазмы в них  $\delta N \approx 20 - 40\%$  [12-15]. Считается, что их образование связано с выталкиванием плазмы из области ее наиболее сильного разогрева вблизи высоты отражения ВН вверх по высоте вдоль силовых линий геомагнитного поля. В последнее время также было установлено, что такие дакты могут содержать внутри себя неоднородности плотности плазмы с  $l_{\perp} \approx 15 - 20$  км [16].

Наконец, в последние годы на стенде СУРА были выполнены широкомасштабные исследования по возбуждению волновых возмущений (типа перемещающиеся ионосферные возмущения, ПИВ), которые показали, что периодическая модификация ионосферной плазмы в течение 2 – 3 часов с периодом 20 – 60 мин приводит к генерации волновых возмущений значительной амплитуды, которые обнаруживаются на расстояниях ~ 1000 км от стенда [17,18]. Они также хорошо регистрируются при зондировании ионосферы сигналами навигационных спутников GPS [8,9]. Важно подчеркнуть, что такие волновые возмущения сами способны стимулировать развитие ионосферных неоднородностей [19,20].

Из всего вышесказанного следует, что генерация крупномасштабных ИИН обнаруживается в большой области ионосферы над стендом СУРА, имея разные характеристики в различных ее областях. Последнее необходимо учитывать при интерпретации результатов зондирования ионосферы, когда луч из приемного пункта на ИСЗ пересекает сразу несколько из них, и их влияние, например, на вариации полного электронного содержания (ПЭС или ТЕС – total electron content в английской транскрипции) может суммироваться по разным областям генерации ИИН. В частности, с этим может быть связано отмечавшееся в [10,21] часто наблюдаемое смещение на юг области с сильными крупномасштабными вариациями ПЭС, а также отсутствие часто корреляции вариаций измеряемой величины ПЭС и режима излучения ВН.

Целью настоящей работы является анализ возможностей определения с помощью разнесенного GPS-зондирования характеристик крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы, возбуждаемых при модификации  $F_2$ -области мощными КВ радиоволнами в различных частях возмущенной области ионосферы, включая и на высотах внешней ионосферы Земли. В первую очередь, это касается дактов плотности плазмы и крупномасштабных неоднородностей, которые обнаруживаются внутри них. Для решения поставленной задачи, помимо результатов GPS-зондирования, в работе при анализе экспериментальных данных будут использованы результаты радиотомографических измерений. Кроме того, будут также использоваться результаты исследований характеристик дактов плотности плазмы, полученных с помощью бортовой аппаратуры французского микро ИСЗ DEMETER [12-16]. Важность результатов GPS-зондирования в этих исследованиях заключается в том, что ни радиотомографические измерения, ни измерения с помощью бортовой аппаратуры низкоорбитальных ИСЗ не позволяют отследить динамику развития и релаксации этих неоднородностей на высотах внешней ионосферы, в то время как знание этих характеристик крайне необходимо для развития моделей как их генерации, так и развития искусственной ионосферной турбулентности в целом.

## 2. СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты по разнесенному зондированию возмущенной области ионосферы сигналами ИСЗ навигационной системы GPS, результаты которых рассматриваются в настоящей работе, были выполнены 22 – 27 марта 2014 г. Двухчастотные GPS-приемники были размещены на стенде СУРА (приемник Prego-T), а также в ~ 50 км к северу от него (п. Галибиха, приемник JAVAD LEXON) и в ~ 100 км к югу от него (п. Сеченово, приемник JAVAD LEXON). В п. Галибиха и п. Сеченово GPS-приемники размещались в тех же пунктах, где и приемники для радиотомографических измерений, и первоначально предполагалось их использовать только для временной привязки радиотомографической аппаратуры. Этим определялся невысокий уровень требований к выбору места их размещения. Однако полученные с их помощью записи вариаций ПЭС оказались достаточно информативными, чтобы использовать их для совместной с п. СУРА обработки полученных данных, несмотря даже на то, что в п. Сеченово почти половина небосвода оказалась закрытой стоящими рядом строениями. Следует отметить, что наблюдающийся повышенный уровень дисперсии измеряемых значений ПЭС в течение 10 – 15 мин после начала регистрации сигнала ИСЗ (см. рис. 4, 5) связан с эффектом края экрана, закрывающего часть трассы ИСЗ–приемник.

Излучаемый стендом СУРА пучок мощных радиоволн был наклонен на  $12^\circ$  к югу от вертикали, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счет эффекта «магнитного зенита» [4-6]. На рис. 1 приведена геометрия эксперимента, где в меридиональной плоскости показано местоположение приемных пунктов, положение диаграммы направленности антенны стенда по уровню  $0.5 P_{\max}$ , положение центральной части возмущенной области (отмеченной овалом) на высоте отражения мощной радиоволны  $h_{\text{ВН}} = 250$  км, в которой генерация искусственной турбулентности проходит наиболее интенсивно (координаты центра диаграммы направленности:  $\varphi = 55.7^\circ$ ,  $\lambda = 46^\circ$ ), а также положение опирающейся на нее возмущенной магнитной силовой трубки (ВМСТ). Измерения проводились в ночных условиях (около  $T = 19$  UT, 23 часа по местному времени) при низком или очень низком уровне геомагнитной возмущенности. Для используемых в измерениях частот ВН 4785 кГц, 5455 и 5828 кГц ширина диаграммы направленности по половинной мощности составляла  $12^\circ$ ,  $10^\circ$  и  $9^\circ$  соответственно. Для  $h_{\text{ВН}} = 250$  км соответствующие горизонтальные размеры диаметра засвеченной пучком мощных радиоволн области ионосферы составляли 55, 44 и 40 км. Размер засвеченной мощной радиоволной области ионосферы оказывается в 1.7 раза больше, если брать размеры диаграммы по уровню  $0.1 P_{\max}$ , который приблизительно соответствует пороговой мощности генерации ИИН. Высота отражения ВН для различных сеансов измерений изменялась в пределах 215–290 км.

Для зондирования ночной ионосферы использовались сигналы спутника PRN-12. В рассматриваемом эксперименте его орбита была такова, что траектория движения спутника в ее проекции на высоту отражения мощной радиоволны ( $h_{\text{отр}} \approx 250$  км) при его наблюдении из п. СУРА (точка с координатой 0 по оси абсцисс на рис. 1) проходила (см. рис. 2а) в 25 км севернее центра диаграммы направленности излучения мощных радиоволн, ориентированной в точку «магнитного зенита» для ВН (т.е. проходила почти по северному краю диаграммы направленности). Для п. Сеченово, который размещался в ~ 100 км к югу от стенда СУРА (точка с координатой 100 по оси абсцисс на рис. 1), такая траектория на высоте 250 км проходила в 76 км к юго-востоку от центра диаграммы направленности уже вне ее, однако на высоте ~ 600 км траектория проходила через центр ВМСТ. Овалом на рис. 2а отмечено положение диаграммы направленности излучения стенда СУРА по уровню  $0.1 \cdot P_{\max}$  для  $f_{\text{ВН}} \approx 5$  МГц, а на рис. 2б — сечение по ВМСТ на высоте 600 км. Времена, отмеченные на рис. 2 вдоль сечений траекторий ИСЗ по возмущенной ионосфере приведены для 22 марта 2014 г., дня начала этой серии экспериментов. При переходе на другой день измерений эти времена надо уменьшить на 4d минут, где d – число прошедших после 22 марта суток.

Сразу следует сказать, что для п. Галибиха, который размещался в ~ 50 км к северу от стенда СУРА (точка с координатой – 50 по оси абсцисс на рис. 1), не было получено сколь-нибудь значимых результатов по вариациям ПЭС. Как видно из рис. 1, это связано с тем, что для него луч на ИСЗ проходил в 20 км севернее северного края диаграммы направленности по уровню  $0.1 P_{\max}$ , где, согласно результатам всех выполненных нами измерений, уже не наблюдается интенсивного развития крупномасштабных ИИН [2,11].

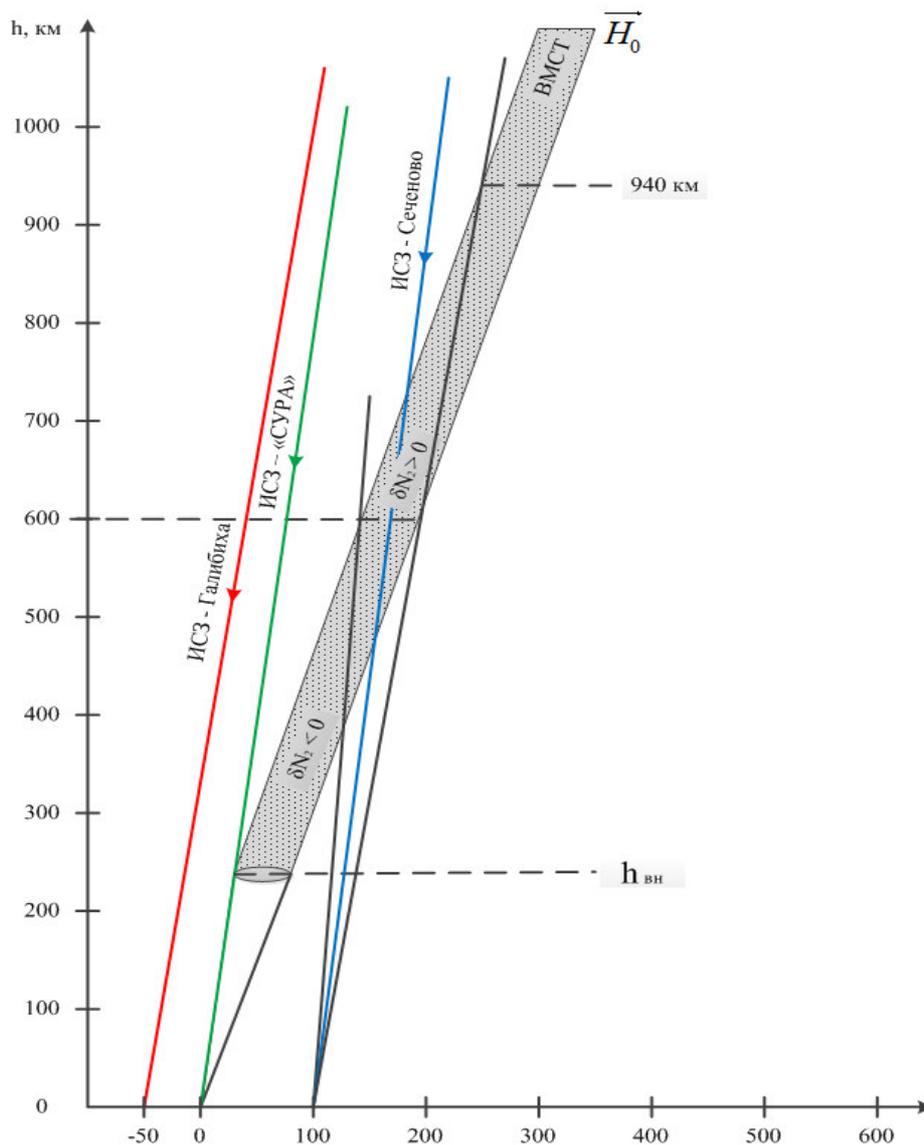
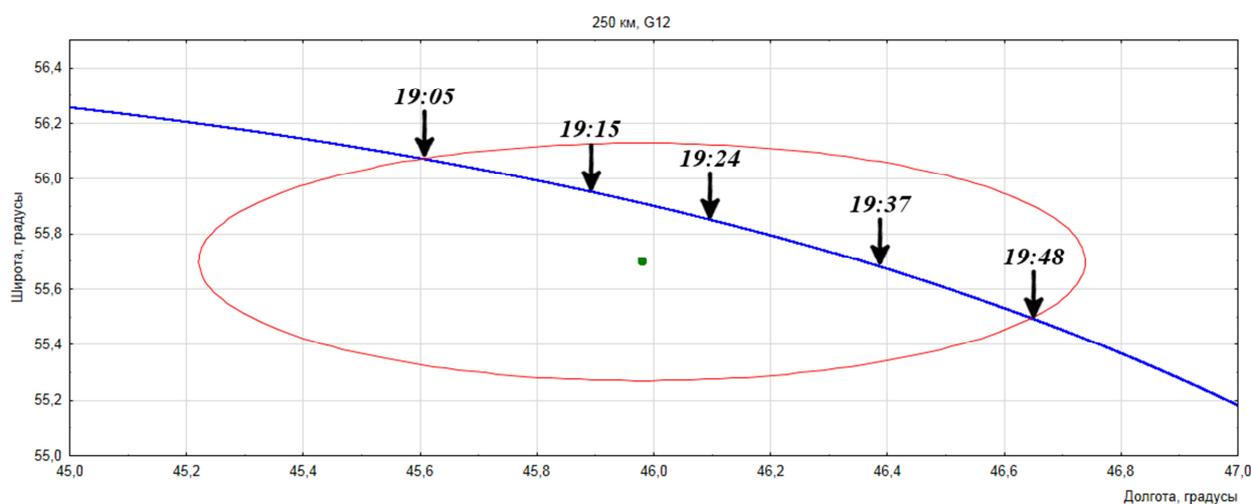


Рис. 1. Геометрия экспериментов.

Из рисунка 1 хорошо видно, что для лучей СУРА–ИСЗ, проходящих через южный край диаграммы направленности, в котором лучи распространяются практически вдоль силовых линий геомагнитного поля, на результаты измерения ПЭС должны оказывать влияние возмущения плотности плазмы, расположенные как в центральной части возмущенной области, так и в возмущенной магнитной силовой трубке в большом интервале ее высот от высоты отражения ВН до высот  $\sim 1000$  км и более. Этим, по-видимому, объясняются ранее полученные результаты, что область с наиболее сильными регистрируемыми искусственными вариациями ПЭС, как правило, смещена к югу от центра диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн, иногда далеко выходя за нее [10,11]. Последнее не позволяет связывать полученные результаты с эффектом магнитного зенита. Здесь также следует иметь в виду, что в ночных условиях проведения измерений влияние на вариации ПЭС области с уменьшенной плотностью плазмы (дефокусирующей линзы), формирующейся на высотах  $F_2$ -области ионосферы, может компенсироваться увеличенной плотностью плазмы в дакте, образующимся на высотах внешней ионосферы. Для п. Сеченово лучи на ИСЗ в зависимости от положения спутника могут пересекать центр ВМСТ на разных высотах (на высоте 600 км для случая использования в нашем случае ИСЗ PRN-12); при этом луч, проходящий через центр ВМСТ, будет находиться в ней в интервале высот 450 – 750 км, набирая большое приращение ПЭС. Заметим, что в ряде случаев на результаты измерения ПЭС может оказывать влияние вынос ИИН из области их генерации за счет горизонтального дрейфа плазмы, роль которого подробно обсуждалась в [11].

а)



б)

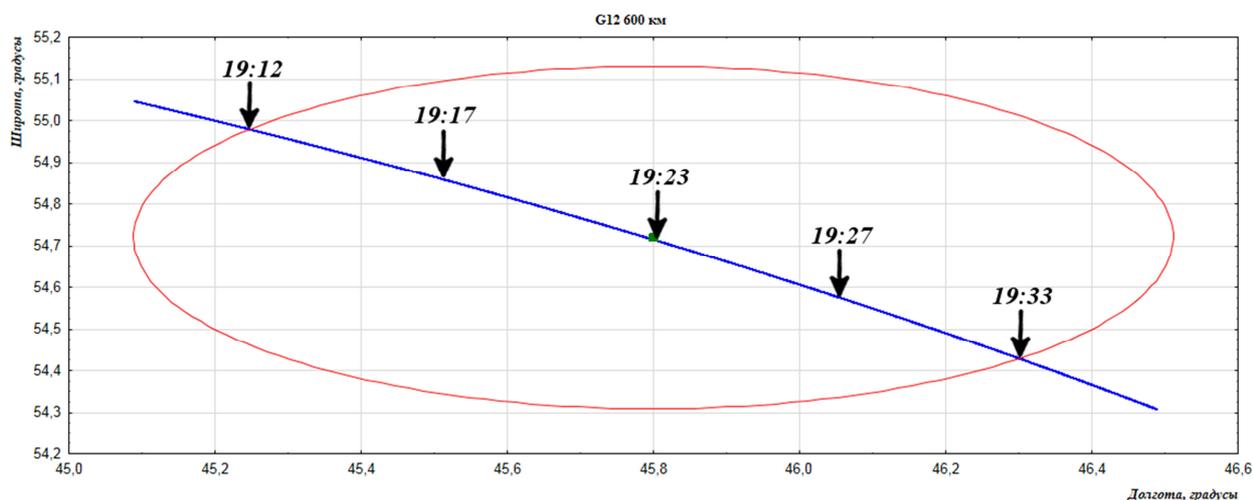


Рис. 2. Пересечение лучом на ИСЗ PRN 12 возмущенной области на высоте 250 км (для п. СУРА, панель а) и возмущенной магнитной силовой линии на высоте 600 км (для п. Сеченово). Времена указаны на 22 марта 2014 г.

Нахождение величины ПЭС осуществлялось по результатам фазовых измерений [20]. При этом для получения истинных значений ПЭС для каждого приемника, пользуясь известными алгоритмами, нужно было вычислять некоторую свою аддитивную постоянную. Для упрощения обработки данных мы этого не делали, т.к. нас интересовали только вариации величины ПЭС. Обычно в таких случаях дополнительно используется процедура детрендирования измеренных значений ПЭС с постоянной времени  $\sim 20$  мин (см., например, [8,9]). Здесь мы отказались и от этого, чтобы не исказить долговременные вариации ПЭС.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

#### 3.1. Измерения 25 марта 2014 г.

Вначале рассмотрим результаты измерений, проведенных 25 марта в ночные часы, когда менее чем за час до GPS-зондирования были выполнены измерения структуры возмущенной области ионосферы методом радиотомографии. Низкоорбитальный ИСЗ Космос-2407 пролетал с юга на север практически в плоскости геомагнитного меридиана, проходящего через центр диаграммы направленности антенны стенда (угол возвышения ИСЗ был равен  $88^\circ$ ). Стенд СУРА излучал мощную радио-

волну  $O$ -поляризации на частоте  $f_{ВН} = 5455$  кГц с  $P_{эфф} = 130$  МВт в режиме «несущая» с 18:38 до 18:52 UT для выполнения радиотомографических измерений с помощью низкоорбитального ИСЗ Космос-2407 и включался еще дважды с 19:01 до 19:31 UT и с 20:01 до 20:31 UT для выполнения GPS-зондирования. Заметим, что до проведения этих измерений с целью возбуждения на ионосферных высотах искусственных волновых возмущений длительное время с 15:58 до 18:38 UT выполнялся периодический нагрев ионосферной плазмы мощными радиоволнами на частоте  $f_{ВН} = 5455$  кГц с  $P_{эфф} = 130$  МВт в режиме [10 мин – излучение, 10 мин – пауза]. Во время всех этих экспериментов все три передатчика излучали в синхронном режиме, наклон диаграммы направленности антенны стенда был  $12^\circ$  на юг, чтобы усилить генерацию ИИН за счет эффекта «магнитного зенита». Высота отражения ВН в 19:00 UT была равна 250 км. Во время измерений значение критической частоты  $F_2$ -слоя ионосферы для волн  $O$ -поляризации  $f_{0F2}$  уменьшалось от 6.3 МГц в 18:36 UT до 5.9 МГц в 19:00 UT и дальше до 5.1 МГц в 19:40 UT. Таким образом, второй импульс ВН для выполнения GPS-зондирования излучался уже в условиях  $f_{ВН} > f_{0F2}$  («нагрев на просвет»). Во время излучения мощной радиоволны для томографических измерений и во время первого импульса для GPS-зондирования наблюдалось развитие очень интенсивного  $F$ -рассеяния ( $F_{spread}$ ) на ионограммах вертикального зондирования, что является свидетельством высокой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и генерации интенсивных ИИН с размерами  $l_{\perp}$  до нескольких километров. Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях, суммарный за сутки  $K_p$ -индекс в этот день был равен 12.

На рисунке 3 представлена построенная в изолиниях радиотомограмма для  $T = 18:49$  UT (через 11 мин после начала модификации ионосферной плазмы). На ней хорошо видно присутствие на высотах 200 – 350 км полости с максимальным уменьшением на  $\sim 18\%$  плотности плазмы, вытянутой вдоль линий геомагнитного поля на расстояние  $\sim 150$  км и фактически пронизывающей максимум  $F_2$ -слоя ионосферы, увеличение плотности плазмы по сторонам этой полости на расстоянии  $\sim 50$  км от ее центра, с более сильным ее увеличением (до 12%) к югу, а также генерация волновых возмущений плотности плазмы, уходящих на север и на юг от центральной части возмущенной области ионосферы. Выше 400 км вдоль силовой линии геомагнитного поля, проходящей через полость с дефицитом плотности плазмы, можно видеть присутствие дакта с увеличенной на 8 – 15% плотностью плазмы, который все более ярко выделяется с ростом высоты (с уменьшением плотности плазмы). Его горизонтальные размеры составляют  $\sim 45$  км. Следует отметить, что над областями с увеличенной плотностью плазмы на уровне максимума  $F_2$ -слоя ионосферы, которые наиболее четко обнаруживаются к

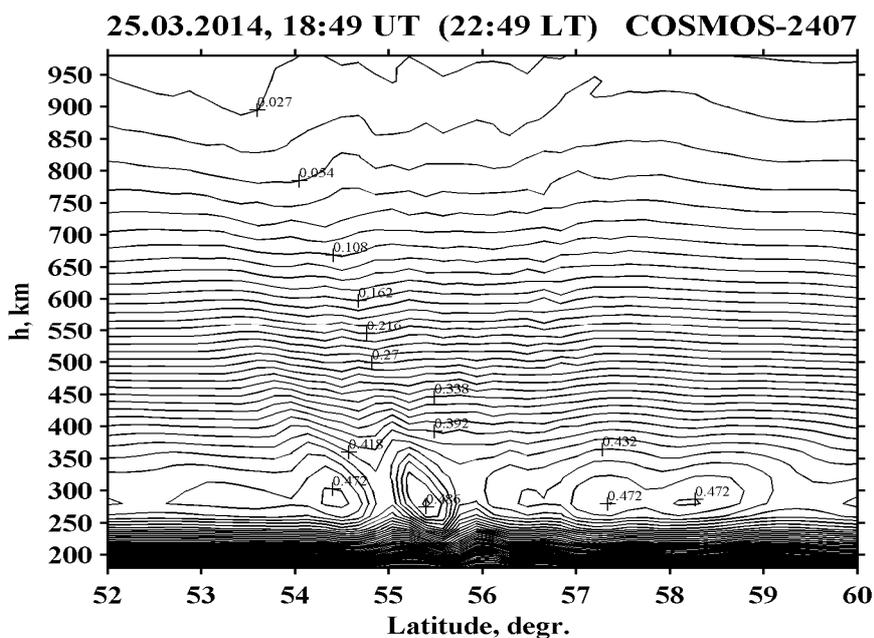
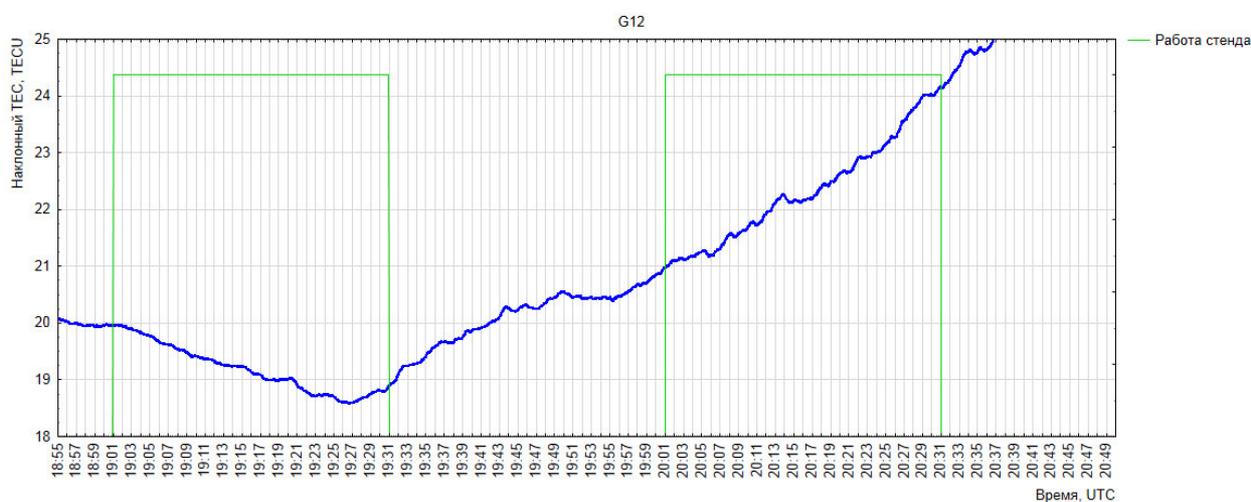


Рис. 3. Радиотомографическая реконструкция ионосферы над стендом СУРА, полученная 25 марта 2014 г. в 18:49 UT при пролете ИСЗ COSMOS-2407.

югу от станда, также регистрируются области с повышенной плотностью плазмы. Появление таких структур связывается с генерацией волновых возмущений при периодической модификацией ионосферы мощными радиоволнами [17,18]. В целом, представленная на рис. 3 радиотомограмма очень похожа по своему виду на радиотомограммы, ранее полученные в [1,8] в аналогичных ионосферных условиях.

Перейдем теперь к рассмотрению результатов GPS-зондирования возмущенной области ионосферы. На рисунке 4а приведены измерения величины ПЭС по лучу зрения СУРА–ИСЗ, который вошел в пределы диаграммы направленности по уровню  $0.1 P_{max}$  в 18:53 UT, прошел в  $\sim 25$  км к северу от центра возмущенной области ионосферы в 19:08 UT и вышел за пределы диаграммы направленности в 19:36 UT (для представленных на рис. 2 сечений времена для этого сеанса измерений должны быть уменьшены на 12 мин). Направление траектории движения луча на ИСЗ по возмущенной области на высоте 250 км было близко к с северо-запада на восток. Для импульса излучения ВН с 19:01 до 19:31 UT спустя  $\sim 1$  мин после ее включения и до 19:27 UT наблюдается постепенное уменьшение величины ПЭС. Максимальную величину этого уменьшения относительно невозмущенного уровня

а)



б)

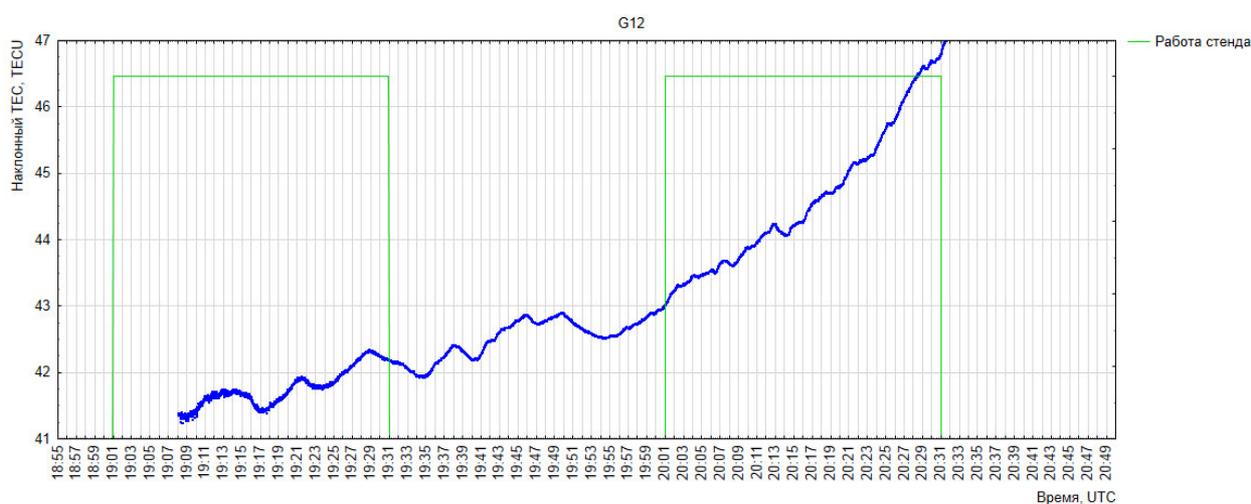


Рис. 4. Результаты измерения ПЭС в п. СУРА (панель а) и в п. Сеченово (панель б). Скобками по оси времени отмечены периоды работы станда СУРА. 25 марта 2014 г.

ПЭС можно оценить как  $\Delta I \approx 1$  TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$ ). Луч на ИСЗ в это время находился близко к восточному краю диаграммы направленности. Других сильных вариаций ПЭС здесь не обнаруживается. Дальше с 19:27 UT, еще до окончания излучения мощной радиоволны, начинается увеличение ПЭС, величина которого достигает своего максимума в 19:50 UT уже в паузу излучения ВН и далеко за пределами диаграммы направленности. Приращение ПЭС для этого максимума можно оценить как  $\Delta I \approx 0.3$  TECU. Расстояние между этими минимумом и максимумом ПЭС вдоль орбиты ИСЗ составляет  $\sim 45$  км, если их отнести к высоте  $h \approx 300$  км. Подобных изменений величины ПЭС не наблюдалось при следующем включении стенда СУРА с 20:01 до 20:31 UT, когда модификация ионосферы осуществлялась в условиях  $f_{\text{ВН}} > f_{\text{OF2}}$ , а луч на ИСЗ пересекал ионосферу далеко вне диаграммы направленности излучения мощной радиоволны.

Полученные в п. СУРА результаты можно интерпретировать следующим образом. Уменьшение ПЭС на временах 19:02 – 19:27 UT связаны с влиянием полости с дефицитом плотности плазмы (фокусирующей линзы), формирующейся вблизи центра диаграммы направленности или немного южнее ее, как это наблюдалось ранее в [1,2,8,10,22]. Оценка ее размеров вдоль орбиты ИСЗ дает величину  $\sim 40$  км, что хорошо соответствует результатам представленных выше радиотомографических измерений, а также результатам прежних GPS-измерений [11,22]. Наконец, вычисленное для  $\Delta I \approx 1$  TECU и для  $L_{\perp} \approx 150$  км (продольный размер полости взят по результатам радиотомографических измерений) значение среднего относительного уменьшения плотности плазмы  $\delta N$  составляет величину  $\sim 15\%$ , что также хорошо соответствует данным радиотомографических измерений.

Появление области с увеличенным ПЭС приблизительно в 70 км к востоку от центра диаграммы направленности, которая имеет размеры вдоль орбиты ИСЗ  $\sim 40$  км, логично связать с регистрируемой на радиотограммах области с повышенным содержанием плазмы. При этом величина относительного увеличения плазмы в ней может быть оценена как  $\delta N \approx 8 - 15\%$ , что находится в соответствии с результатами радиотомографических измерений. На основании радиотомографических и GPS измерений можно заключить, что область с повышенным содержанием плазмы должна кольцом опоясывать область с дефицитом плотности плазмы, причем величина увеличения плотности максимальна на южном краю кольца и заметно уменьшается к северу. Каков механизм формирования этого кольца еще предстоит выяснить. Можно предположить, что это может быть связано с особенностью механизма генерации волновых возмущений при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощным радиоизлучением. Как отмечалось при анализе представленной на рис. 3 радиотомографической реконструкции, области с повышенной плотностью плазмы имеют свое продолжение на высотах внешней ионосферы, и их, скорее всего, следует связывать с генерацией волновых возмущений на ионосферных высотах при периодической модификации ионосферы мощными радиоволнами. В этом случае кольцевая структура таких возмущений легко объяснима. Нельзя также исключать, что они могут быть связаны с возбуждением кольцевых токов при формировании полости с дефицитом плотности плазмы, протекающих по фоновой плазме по краю диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. Для полного разрешения этой проблемы здесь необходимо еще провести дополнительные как экспериментальные, так и теоретические исследования.

Таким образом, эта часть экспериментальных данных может быть объяснена за счет формирования полости с дефицитом плотности плазмы (фокусирующей линзы) в центральной части возмущенной области и опоясывающей ее области с повышенной плотностью плазмы.

Обратим внимание на более мелкомасштабные вариации ПЭС на временах 19:14 – 19:55 UT (в юго-восточной части диаграммы направленности и дальше на восток от нее) величиной  $\sim 0.06$  TECU и длительностью  $\sim 5$  мин. Их можно связать с ИИН с  $l_{\perp} \approx 10$  км и  $\delta N \approx 5\%$ , если допускать, что они генерируются вблизи высоты отражения ВН и имеют продольный размер  $\sim 50$  км. Появление таких неоднородностей в возмущенной области ионосферы ранее регистрировалось в [10,11]. Однако, согласно этим исследованиям, их генерация наблюдается только в центральной части возмущенной области вблизи «магнитного зенита» для ВН. В нашем случае вариации ПЭС регистрируются заведомо вне области «магнитного зенита» и даже далеко вне диаграммы направленности антенны стенда. Следуя результатам измерений [23], можно полагать, что эти небольшие вариации ПЭС связаны с генерацией крупномасштабных возмущений плотности плазмы на высотах выше максимума  $F_2$ -слоя ионосферы.

Перейдем к рассмотрению результатов GPS-зондирования, выполненного в п. Сеченово (в  $\sim 100$  км к югу от стенда СУРА). Заметим, что из-за частичной экранировки приемника в п. Сеченово регистрация сигнала начиналась только около 19 UT, когда луч на ИСЗ пересекал возмущенную область ионосферы близко к ее центральной части. На рис. 4б приведены измерения величины ПЭС по

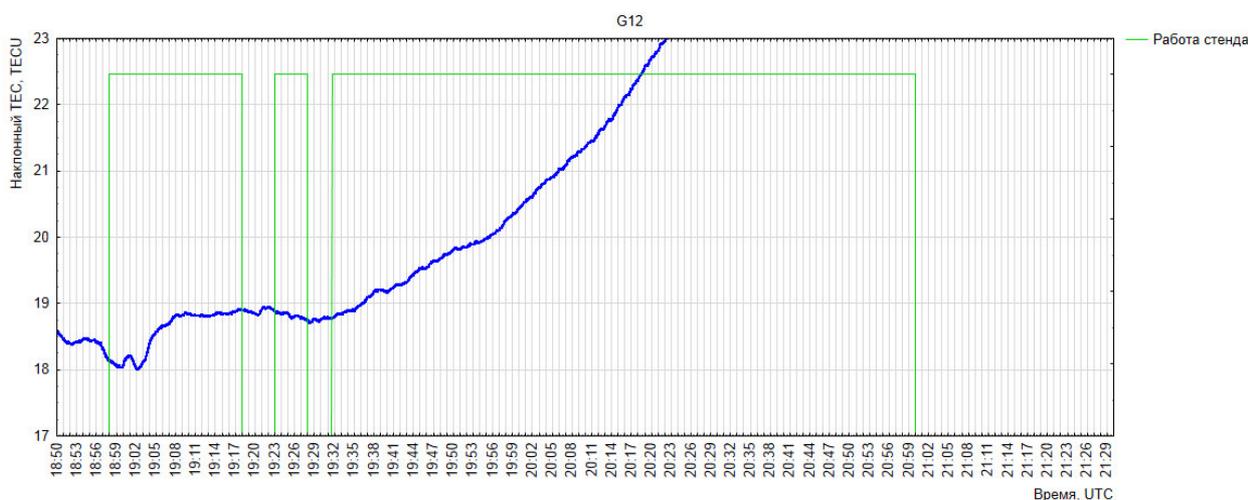
лучу зрения Сеченово–ИСЗ, который на высоте  $\sim 600$  км прошел через центр ВМСТ в 19:11 UT и вышел за пределы этой трубки в 19:21 UT. На высоте 250 км он в то же самое время проходил приблизительно в 80 км к юго-востоку от центра диаграммы направленности (уже за ее краем по уровню  $0.1 P_{\max}$ ). Во время импульса излучения ВН с 19:01 до 19:31 UT наблюдаются сильные вариации ПЭС величиной до  $\Delta I \approx 0.3$  TECU и периодом  $\sim 8$  мин (с пространственными масштабами  $\sim 15$  км, если их отнести к высоте 250 км, и с масштабами 40 – 60 км, их отнести к высоте 600 км), которые продолжают регистрироваться с практически неизменной амплитудой и периодом до  $T \approx 19:55$  UT, т.е. еще 23 мин после ее выключения. В следующем цикле включения ВН с 20:01 до 20:31 UT, когда модификация ионосферы осуществлялась в условиях  $f_{\text{ВН}} > f_{\text{OF2}}$ , а луч на ИСЗ пересекал ионосферу вне ВМСТ, таких вариаций ПЭС не обнаруживается. Если эти вариации связывать с горизонтальным выносом ИИН из области их интенсивной генерации в центральной части возмущенной области (на высоте  $\sim 250$  км), как это наблюдалось в [24], то тогда следует допускать, что время жизни неоднородностей плотности плазмы с размерами  $l_{\perp} \approx 15$  км должно превышать 20 – 40 мин, а скорость их выноса должна составлять  $V \geq 200$  м/с в направлении юго-восток. Обе эти величины значительно превышают обычно измеряемые их значения на средних широтах в спокойных геомагнитных условиях. Кроме того, величина относительных флуктуаций плотности плазмы в них должна быть  $\delta N \approx 20\%$ , при этом сами флуктуации после выключения ВН должны были бы из-за релаксации неоднородностей плавно уменьшаться во времени. Генерация таких интенсивных крупномасштабных неоднородностей фактически вне пучка мощных радиоволн не подтверждается результатами каких-либо других экспериментов. Большие значения скорости дрейфа, времени жизни и величины  $\delta N$  для этих неоднородностей, резкий обрыв их регистрации, а также то, что такого рода неоднородности не наблюдаются при просвечивании центральной части возмущенной области ионосферы в п. СУРА во время рассматриваемых измерений, исключает такую интерпретацию наблюдаемых вариаций плотности плазмы.

Другой возможностью объяснения наблюдаемых больших значений вариаций ПЭС в п. Сеченово является допущение, что они являются результатом влияния плазменных возмущений, индуцируемых в широкой области высот ионосферы от  $\sim 200$  км до 800 км и выше. Если сравнить представленную на рис. 3 радиотомографическую реконструкцию и вариации ПЭС, можно прийти к выводу, что эти вариации по своей структуре близки к зарегистрированным на радиотомограмме вариациям плотности плазмы в области широт  $53 - 59^{\circ}$  сш. К сожалению, здесь нельзя сделать их прямого сопоставления, поскольку ИСЗ COSMOS-2407 пересекал возмущенную область ионосферы с юга на север, а ИСЗ GPS-12 — с северо-запада на юго-восток. Исходя из горизонтального размера этих вариаций плотности плазмы на радиотомограмме 40 – 60 км и интервала времени регистрации ПЭС с 19:08 до 19:55 UT, можно оценить горизонтальные размеры области их существования как  $\sim 220$  км, что хорошо соответствует результатам радиотомографических измерений. Анализ характера представленных на рис. 4б вариаций ПЭС, к сожалению, не позволяет в этом сеансе выделить область самого дакта и определить его характеристики. Здесь следует иметь в виду, что эксперименты проводились при частоте  $f_{\text{ВН}} = 5455$  кГц, тогда как, согласно [13,14], формирование сильных дактов даже в ночных условиях наблюдалось только при  $f_{\text{ВН}} \leq 4785$  кГц (т.е. в плазме более низкой плотности).

Таким образом, в рамках сделанных предположений удастся непротиворечивым образом объяснить основные измеренные в сеансе 25 марта особенности вариаций ПЭС. При этом из полученных данных можно сделать следующие выводы. Во-первых, для формирования крупномасштабных структур с размерами 40 – 60 км на высотах максимума  $F_2$ -слоя ионосферы и выше достаточно 7 минут нагрева плазмы. Во-вторых, время жизни таких структур должно превышать 10 минут. В-третьих, подтверждено, что выше максимума  $F_2$ -слоя ионосферы имеет место генерация крупномасштабных ИИН с размерами  $l_{\perp} \approx 10$  км.

### 3.2. Измерения 24 марта 2014 г.

а)



б)

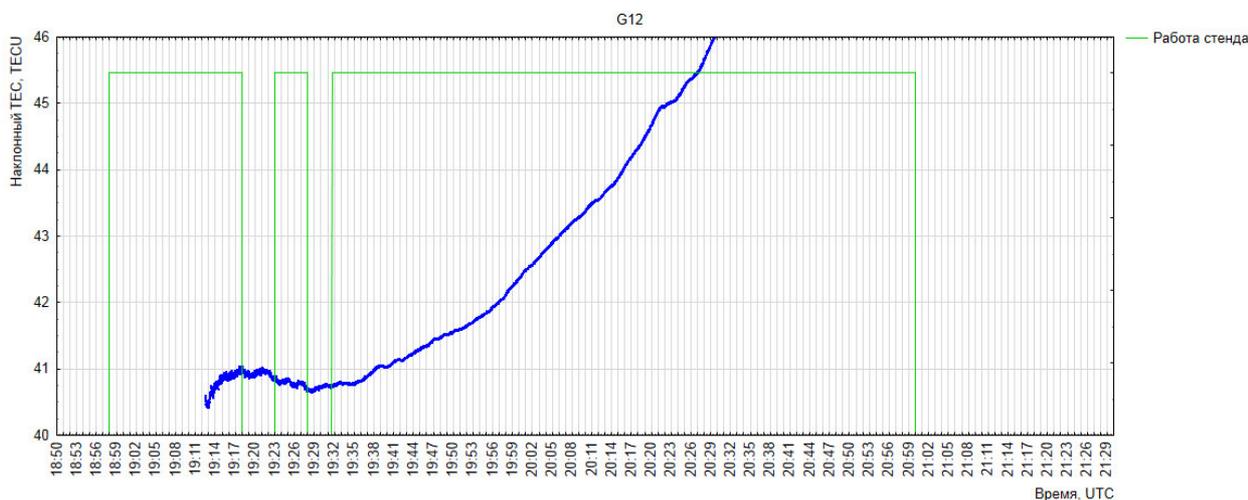


Рис. 5. Результаты измерения ПЭС в п. СУРА (панель а) и в п. Сеченово (панель б). Скобками по оси времени отмечены периоды работы станда СУРА, 24 марта 2014 г.

24 марта станд СУРА излучал мощные радиоволны *O*-поляризации на частоте 4785 кГц с  $P_{\text{эфф}} = 95$  МВт в режиме [15 мин – излучение, 15 мин – пауза] с 15:58 до 18:43 UT (возбуждение волновых возмущений) и в режиме модификации ионосферы для GPS-зондирования с 18:58 до 19:18 UT, с 19:23 до 19:28 и с 19:31:40 до 21:00 UT. Все три передатчика излучали в синхронном режиме, наклон диаграммы направленности антенны станда был  $12^\circ$  на юг. Высота отражения ВН в 18:56 UT была равна 215 км. Во время измерений  $f_{\text{OF2}}$  уменьшалась от 6.1 МГц в 18:56 UT до 5.5 МГц в 19:20 UT. Во время излучения мощной радиоволны наблюдалось развитие интенсивного *F*-рассеяния ( $F_{\text{spread}}$ ) на ионограммах вертикального зондирования, что является свидетельством высокой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности. Измерения проводились в очень спокойных геомагнитных условиях, суммарный за сутки  $K_p$ -индекс в этот день был равен  $6^+$ .

На рисунке 5а приведены измерения величины ПЭС по лучу зрения СУРА–ИСЗ, который вошел в пределы диаграммы направленности по уровню  $0.1 P_{\text{max}}$  в 18:57 UT, прошел в  $\sim 15$  км к северу от центра возмущенной области ионосферы в 19:12 UT и вышел за пределы диаграммы направленности в 19:40 UT (для представленных на рис. 2 сечений времена для этого сеанса измерений должны быть уменьшены на 8 мин). Общее направление траектории движения луча на ИСЗ по возмущенной области было с северо-запада на восток. Для импульса излучения ВН с 18:58 до 19:18 UT через 2 –

4 мин после ее включения регистрируется минимум величины ПЭС, величина которого относительно невозмущенного уровня можно оценить как  $\Delta I \approx 0.5 - 0.7$  TECU. Луч на ИСЗ в это время находился немного восточнее центра диаграммы направленности. Можно считать, что этот минимум ПЭС связан с прохождением луча через полость с уменьшенной плотностью плазмы. Тогда уменьшение плотности плазмы здесь можно оценить как  $\delta N \approx 10\%$ , что и по размерам полости вдоль орбиты ИСЗ ( $\sim 30$  км) и по величине  $\delta N$  вполне соответствует ранее измеренным их значениям [2,11,22]. Повышенный на величину  $\Delta I \approx 0.3$  TECU уровень ПЭС на интервале времени 19:14 – 19:29 UT (приблизительно в 25 км к востоку от центра диаграммы направленности) можно отнести как на счет влияния на результаты измерений области с повышенной плотностью плазмы, обрамляющей эту полость, так и на влияние дакта с повышенной плотностью плазмы. Их разделение здесь не представляется возможным.

Обратимся теперь к анализу результатов измерения ПЭС в п. Сеченово. На рис. 5б приведены измерения величины ПЭС по лучу зрения Сеченово–ИСЗ, который для высоты  $\sim 600$  км прошел через центр ВМСТ в 19:15 UT и вышел за ее пределы в 19:25 UT. На высоте 250 км он в то же самое время проходил приблизительно в 80 км к юго-востоку от центра диаграммы направленности (уже за ее краем по уровню  $0.1 P_{\max}$ ). В конце импульса излучения ВН с 19:13 до 19:28 UT регистрируется максимум величины ПЭС с  $\Delta I \approx 0.4$  TECU, а также вариации его величины с периодом 2 – 4 мин, что соответствует пространственному периоду 9 – 19 км, если их отнести к высоте  $\sim 600$  км. Исходя из геометрии эксперимента, максимум ПЭС, по-видимому, следует связать с влиянием дакта с увеличенной плотностью плазмы во внешней ионосфере. Тогда размеры дакта вдоль проекции орбиты ИСЗ на высоте 600 км должны быть  $\sim 80$  км, а увеличение плотности плазмы в нем должно составлять 25 – 30%, что находится в хорошем соответствии с измеренными характеристиками дактов плотности плазмы [2,13,14]. Тогда 2 – 4 мин вариации ПЭС можно соотнести с крупномасштабными ИИН с  $l_{\perp} \approx 15$  км, которые были обнаружены в дакте с помощью аппаратуры ИСЗ DEMETER [16]. Поскольку 5-минутная пауза излучения ВН никак не сказалась на поведении ПЭС, мы должны заключить, что характерные времена релаксации дакта должны быть заведомо больше этой величины.

#### 4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выполненные впервые совместные радиотомографические исследования структуры возмущенной области ионосферы и ее зондирование сигналами ИСЗ навигационной системы GPS с их приемом на стенде СУРА и в разнесенных в меридиональном направлении на  $\sim 50$  км к северу и на  $\sim 100$  км к югу от стенда приемных пунктах позволили установить, что помимо центральной части возмущенной области, где вблизи высоты отражения мощной радиоволны  $O$ -поляризации развивается наиболее интенсивная искусственная ионосферная турбулентность и генерируются наиболее интенсивные крупномасштабные ИИН и где на высотах 200 – 400 км формируется полость с уменьшенной плотностью плазмы (фокусирующая линза), на результаты ночных измерений заметное влияние оказывают искусственные крупномасштабные плазменные возмущения, которые обнаруживаются вне этой области как на высотах  $F_2$ -слоя ионосферы, так и во внешней ионосфере. Это, в первую очередь, касается областей с увеличенной плотностью плазмы, обрамляющих фокусирующую линзу, а также дактов с увеличенной плотностью плазмы, генерация которых наблюдается на высотах внешней ионосферы. До сих пор наиболее важные характеристики этих структур были получены либо методом радиотомографии [1,7,8], либо прямыми измерениями плазменных возмущений с борта низкоорбитальных ИСЗ [12-16]. В обоих случаях такие измерения проводятся достаточно редко и, самое главное, в них удается получить только характеристики плазменных возмущений на момент пролета ИСЗ (как правило, в стационарном состоянии их развития после длительной модификации ионосферы мощными радиоволнами), тогда как для построения моделей наблюдаемых процессов принципиальное значение имеют динамические характеристики их развития и релаксации. Полученные в данной работе результаты измерений показывают, что с помощью GPS-зондирования можно изучать динамические характеристики этих крупномасштабных плазменных возмущений. В частности, было определено, что время их формирования составляет не больше 7 мин, а их релаксация длится заведомо дольше 10 мин. Естественно, влияние этих структур сказывается и на результатах измерений в п. СУРА, выполняемых прямо под центральной частью возмущенной области. В первую очередь, это необходимо учитывать при объяснении природы интенсивных вариаций ПЭС, регистрируемых на южном краю возмущенной области ионосферы.

В заключение отметим еще один результат выполненных исследований. По результатам выполненного цикла измерений было получено, что индуцированные нагревом  $F_2$ -области ионосферы крупномасштабные возмущения плотности плазмы имели невысокую интенсивность, когда частота ВН была более чем 1 МГц ниже критической частоты  $f_{0F2}$ , а также когда значение  $f_{ВН}$  было порядка или немного выше  $f_{0F2}$ . К аналогичному выводу раньше приходили при определении условий формирования дактов плотности плазмы на высотах внешней ионосферы [13,14,25].

Рассмотренные в настоящей работе результаты исследований продемонстрировали, что для более детального изучения пространственной структуры возмущенной области ионосферы методом ее зондирования сигналами ИСЗ навигационной системы GPS помимо приемных пунктов, размещенных вокруг стенда СУРА в меридиональной плоскости, крайне желательно также иметь приемные пункты, вынесенный из этой плоскости на расстояние не меньше 100 км. Это позволит в ряде случаев избежать наложения эффектов от неоднородностей различной природы их образования, которые занимают широкую область высот от высоты отражения волны накачки до 800 км и более, а следовательно — проводить раздельное изучение их характеристик. В измерениях 2015 г. такой пункт был организован около г. Казань в 170 км к востоку от стенда. Результаты этих экспериментов в настоящее время обрабатываются и анализируются.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда СУРА за оказанную ими помощь в проведении экспериментальных исследований. Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-12-00556). Исследования Глухова Я.В. выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 14-05-00029, 14-05-10024 и 15-05-10029, руководитель А.В. Тертышников). Часть работ, связанная с развитием радиотомографических методов и алгоритмов по восстановлению ионосферных искусственных неоднородностей, выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 13-05-01122. Экспериментальные исследования на приемном пункте около г. Казани были выполнены за счет средств субсидии, выделенных в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

## GPS-DIAGNOSIS OF LARGE-SCALE PERTURBATIONS OF PLASMA DENSITY IN THE OUTER IONOSPHERE OF THE EARTH CAUSED BY THE MODIFICATION OF THE F2-REGION OF THE IONOSPHERE USING POWERFUL HF RADIO WAVES

V. L. Frolov <sup>1,4</sup>, I. A. Bolotin <sup>1</sup>, G. P. Komrakov <sup>1</sup>, Y. V. Glukhov <sup>2</sup>, E. S. Andreeva <sup>3</sup>, V. E. Kunitsyn <sup>3</sup>, G. A. Kurbatov <sup>3</sup>

- (1) Scientific Research Institute of Radio Physics.
- (2) Institute of Applied Geophysics (Fedorov).
- (3) M. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics.
- (4) Kazan (Volga region) Federal University.

Capabilities of diagnostic of artificial large-scale perturbations of the plasma density in the outer ionosphere of Earth using GPS and low earth orbit satellite signals (radio tomography method) are presented. Comparative analysis of the results obtained by these two methods revealed that large-scale plasma perturbations induced on the heights above the maximum F2-layer of the ionosphere can make a significant contribution to the measured TEC variations, which opens up new opportunities to explore them. The experiments were performed on Sura ionospheric heating facility.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, GPS, ELECTRON CONTENT, RECEIVER, TECHNOLOGY, EXPERIMENT, ARTIFICIAL IONOSPHERIC DISTURBANCES, SURA IONOSPHERIC HEATING FACILITY, IONOSPHERIC TOMOGRAPHY

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением. // УФН, 2007. Т. 177, № 3, с. 330.
2. Фролов В.Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при её модификации мощными КВ радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований. // Солнечно-земная физика, 2015. Том 1, № 2, с. 22, DOI:10.12737/10383.
3. Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. // New York, Springer, 1978.

4. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. // УФН, 2007. Т. 177, № 11, с. 1145.
5. Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C., Pedersen T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications. // Phys. Lett. A. 305 (2002). P. 264.
6. Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С. Эффект магнитного зенита. // Изв. вузов. Радиофизика, 2005. Т. 48, № 9, с. 772.
7. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V. et al. Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes // Physics Letters A, 325 (2004). P. 381.
8. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L. et al. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions. // Radio Sci., 2012. Vol. 47, RSOL15, doi:10.1029/2011RS004957.
9. Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E. et al. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF heating. // Adv. Space Res., 2011. Vol. 47, p. 1743.
10. Фролов В.Л., Комраков Г.П., Куницын В.Е. и др. Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда СУРА ионосферы сигналами навигационных ИСЗ системы GPS. // Известия вузов. Радиофизика, 2010. Т. 53, № 7, с. 421.
11. Фролов В.Л., Шорохова Е.А., Куницын В.Е. и др. Особенности возбуждения крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами. // Изв. вузов. Радиофизика, 2014 (направлена в печать).
12. Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П. и др. Некоторые результаты измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ радиоизлучением стенда Сура. // Изв. вузов. Радиофизика, 2007. Т. 50, № 8, с. 709.
13. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П. и др. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением. // Письма в ЖЭТФ, 2008. Т. 88, вып. 12, с. 908.
14. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П. и др. Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением стенда Сура. // Изв. вузов. Радиофизика, 2008. Т. 51, № 11, с. 915.
15. Milikh G.V., Papadopoulos K., Shrof H. et al. Formation of artificial ionospheric ducts. // Geophys. Res. Lett., 2008. Vol.35, L17104, doi:10.1029/2008GL034630.
16. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. Тонкая структура дактов плотности, формируемых при активном радиочастотном воздействии на лабораторную и космическую плазмы. // Письма в ЖЭТФ, 2015. Т. 101, вып. 5, с. 342.
17. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. // Изв. вузов. Радиофизика, 2012. Т. 55, № 1-2, с. 14.
18. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности волновых возмущений в ионосфере при периодическом нагреве плазмы радиоизлучением стенда «СУРА». // Изв. вузов. Радиофизика, 2013. Т. 56, № 5, с. 307.
19. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. // М.: «Наука», 1984.
20. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. // Иркутск, 2006.
21. Рябов А.В., Грач С.М., Шиндин А.В., Котик Д.С. Исследование характеристик крупномасштабных неоднородностей ионосферы, вызванных воздействием на неё мощного коротковолнового излучения, с помощью сигналов GPS. // Изв. вузов. Радиофизика, 2011. Т. 54, № 7, с. 485.
22. Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Фролов В.Л., Юрик Р.Ю. Наблюдение эффекта магнитного зенита с использованием сигналов спутников GPS/GLONASS. // Изв. вузов. Радиофизика, 2008. Т. 51, № 11, с. 934.
23. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор). // Изв. вузов. Радиофизика, 1987. Т. 30, № 2, с. 208.
24. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. Дифракция радиоизлучения дискретного источника Кассиопея-А на искусственных ионосферных неоднородностях. // Изв. вузов. Радиофизика, 1976. Т. 19, № 12, с. 1902.
25. Фролов В.Л., Митяков Н.А., Шорохова Е.А., Парро М. Структура электрического поля мощной короткой радиоволны во внешней ионосфере Земли. // Изв. вузов. Радиофизика, 2013. Т. 56, № 6, с. 361.