

УДК 333.951+537.868

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ МОДИФИКАЦИИ F_2 -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИОВОЛНАМИ

В. Л. Фролов^{1,4} *, Г. П. Комраков¹, Я. В. Глухов², Е. С. Андреева³, В. Е. Куницын³,
Г. А. Курбатов³

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;

² Институт прикладной геофизики, г. Москва;

³ Московский госуниверситет им. М. Ю. Ломоносова, г. Москва;

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

В работе рассматриваются результаты выполненных на нагревном стенде «Сура» исследований крупномасштабной структуры возмущённой области ионосферы, полученные при её зондировании сигналами спутников навигационной системы GPS и сигналами низкоорбитальных спутников (радиотомография). Результаты исследований демонстрируют, что крупномасштабные плазменные возмущения, индуцируемые на высотах выше максимума F_2 -слоя ионосферы, могут вносить существенный вклад в измеряемые вариации полного электронного содержания и при определённом расположении приёмных пунктов могут быть измерены методом GPS-зондирования.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов изучения ионосферы Земли, активно используемым начиная с 70-х годов прошлого столетия, является воздействие на неё мощным коротковолновым радиоизлучением. Исследования показали, что возмущённая область ионосферы, где наблюдается развитие искусственной ионосферной турбулентности и, в частности, генерация искусственных ионосферных неоднородностей, захватывает большой объём ионосферы, простирающийся от высоты E -слоя до высот внешней ионосферы в вертикальном направлении и до 500 км — в горизонтальном [1]. При этом наиболее интенсивная ионосферная турбулентность возбуждается в F_2 -слое ионосферы в области «магнитного зенита» для мощных радиоволн с O -поляризацией [1, 2]. Использование метода низкоорбитальной радиотомографии позволило также установить, что, помимо полости с дефицитом концентрации плазмы до $10 \div 20\%$ (данная структура обнаруживается в области высот $200 \div 400$ км, вытянута вдоль силовых линий геомагнитного поля и обладает свойствами фокусирующей линзы), на некотором расстоянии вокруг неё также регистрируется появление крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы с размерами поперёк линий геомагнитного поля $l_{\perp} \approx 30 \div 50$ км [1, 3]. Одним из важных достижений последних лет явилось обнаружение формирования дактов с повышенной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы при модификации F_2 -слоя ионосферы мощными радиоволнами с O -поляризацией. Такие дакты имеют поперечный к геомагнитному полю размер $60 \div 110$ км и характеризуются относительным увеличением концентрации плазмы в них $\delta N \approx 20 \div 40\%$; при этом они могут содержать внутри себя неоднородности концентрации плазмы с $l_{\perp} \approx 20$ км [4, 5].

В последние годы для изучения крупномасштабной структуры возмущённой области ионосферы широко используется метод её зондирования сигналами спутников навигационных систем

* frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

GPS/GLONASS [3, 6]. Ясно, что на результаты этих измерений будут влиять все вариации концентрации плазмы на луче зрения спутник—приёмник. При их интерпретации важной задачей является определение того, неоднородности из какой части возмущённой области ионосферы дают вклад в те или иные вариации полного электронного содержания (ПЭС).

Целью данной работы является демонстрация возможности определения с помощью разнесённого GPS-зондирования характеристик крупномасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых при модификации F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами. Существенным моментом представленных здесь исследований было то, что, параллельно с GPS-зондированием, были выполнены радиотомографические измерения пространственной структуры возмущённой области ионосферы, которые позволили идентифицировать некоторые вариации ПЭС.

1. СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты по зондированию возмущённой области ионосферы сигналами спутников навигационной системы GPS, результаты которых рассматриваются в данной работе, были выполнены 22–27 марта 2014 года. Двухчастотные GPS-приёмники были размещены на стенде «Сура», а также примерно в 50 км к северу от него в пос. Галибиха и в 100 км к югу в пос. Сеченово. Следует отметить, что, поскольку в пос. Сеченово часть трассы спутник—приёмник была закрыта окружающими приёмный пункт строениями, после выхода спутника из тени из-за эффекта «края экрана» в течение 10÷15 мин наблюдался повышенный уровень дисперсии измеряемых значений ПЭС.

Ось излучаемого стендом «Сура» (НИРФИ, Нижний Новгород) пучка мощных радиоволн была наклонена на 12° к югу от вертикали, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта «магнитного зенита» [2]. Для используемых в измерениях частот волны накачки около 5 МГц ширина диаграммы направленности по половинной мощности составляла примерно 10° . Для высот отражения мощной радиоволны около 250 км горизонтальный размер (диаметр) D засвеченной пучком мощных радиоволн области ионосферы по уровню $0,5$ максимальной мощности излучения P_{\max} составил приблизительно 45 км.

Для зондирования ночной ионосферы использовались сигналы спутника PRN-12. В рассматриваемом эксперименте орбита спутника была такова, что траектория его движения в её проекции на высоту отражения мощной радиоволны ($h_{\text{отр}} \approx 250$ км) при его наблюдении из пункта «Сура» проходила близко к северному краю диаграммы направленности излучения мощных радиоволн. Для пос. Сеченово такая траектория на высоте 250 км проходила в 76 км к юго-востоку от центра диаграммы направленности уже далеко вне её, однако на высоте около 600 км траектория проходила через центр возмущённой магнитной силовой трубки. Для пос. Галибиха не было получено сколько-нибудь значимых результатов по вариациям ПЭС. Это связано с тем, что для него луч на спутник проходил в 20 км севернее северного края диаграммы направленности по уровню $0,1P_{\max}$ ($D \approx 75$ км), где уже не наблюдается развития интенсивных крупномасштабных искусственных неоднородностей.

Для лучей «Сура»—спутник, проходящих через южный край диаграммы направленности, когда лучи распространяются практически вдоль силовых линий геомагнитного поля, на результаты измерения ПЭС должны влиять возмущения концентрации плазмы, возбуждаемые как в центральной части возмущённой области, так и в опирающейся на неё возмущённой магнитной силовой трубке. Сложность интерпретации получаемых здесь результатов измерений отмечалась, например, в работе [6].

Величина ПЭС находилась по результатам фазовых измерений. При этом для получения ис-

тинных значений ПЭС для каждого приёмника нужно было бы вычислять некоторую свою аддитивную постоянную. Для упрощения обработки данных мы этого не делали, т. к. нас интересовали только вариации величины ПЭС. Обычно в таких измерениях дополнительно используется процедура детрендрования получаемых значений ПЭС с постоянной времени около 20 мин (см., например, работу [3]). Здесь мы отказались от этой процедуры, чтобы не исказить динамики долговременных вариаций ПЭС. Все измерения проводились в очень спокойных геомагнитных условиях (суммарное суточное значение индекса геомагнитной активности ΣK_p не превышало 12).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. Измерения 25 марта 2014 года

В этот день менее чем за час до GPS-зондирования были выполнены измерения структуры возмущённой области ионосферы методом радиотомографии с помощью сигналов низкоорбитального спутника Космос-2407, луч на который проходил через центр диаграммы направленности антенны стенда. Стенд «Сура» излучал мощную радиоволну с О-поляризацией на частоте $f_{\text{ВН}} = 5455$ кГц с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = 130$ МВт в режиме «несущая» с 18:38 до 18:52 UT для выполнения радиотомографических измерений, а также с 19:01 до 19:31 UT и с 20:01 до 20:31 UT для выполнения GPS-зондирования. Во время экспериментов значение критической частоты F_2 -слоя ионосферы для волн с О-поляризацией f_{0F_2} 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, во время последнего импульса излучение волны накачки уже проходило в условиях $f_{\text{ВН}} > f_{0F_2}$ («нагрев на просвет»). Регистрируемое во время первых двух импульсов развитие очень интенсивного F -рассеяния (F_{spread}) на ионограммах вертикального зондирования является свидетельством высокой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и генерации интенсивных неоднородностей.

На рис. 1 представлена построенная в изолиниях радиотомограмма для момента времени 18:49 UT (через 11 мин после начала модификации ионосферной плазмы). На ней хорошо видно наличие на высотах 200–350 км полости с максимальным уменьшением концентрации плазмы примерно на 18%. Эта область вытянута вдоль линий геомагнитного поля на расстояние около 150 км и фактически пронизывает весь F_2 -слой ионосферы. На радиотомограмме также видно увеличение концентрации плазмы по сторонам этой полости на расстоянии 50 км от её центра с более сильным увеличением (до 12%) на южном крае возмущённой области. Следует отметить, что над областями с увеличенной концентрацией плазмы на уровне максимума F_2 -слоя ионосферы во внешней ионосфере также регистрируются области с повышенной концентрацией. Выше 400 км вдоль силовой линии геомагнитного поля, проходящей через полость с дефицитом концентрации плазмы, можно видеть наличие дакта с увеличенной на 8–15% концентрацией на высоте около 800 км. Его горизонтальные размеры составляют примерно 45 км.

На рис. 2 приведены измерения величины ПЭС по лучу зрения «Сура»—спутник (кривая 1, левая шкала) для спутника, который вошёл в пределы диаграммы направленности по уровню $0,1P_{\text{max}}$ в 18:53 UT, прошёл в 25 км к северу от центра возмущённой области ионосферы в 19:08 UT и вышел за пределы диаграммы направленности в 19:36 UT. Направление движения луча на спутник по возмущённой области было близко к направлению с северо-запада на восток. Для импульса излучения волны накачки с 19:01 до 19:31 UT спустя 1 мин после его включения и до 19:27 UT наблюдалось постепенное уменьшение ПЭС на величину до $\Delta I \approx -1$ TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$), когда луч на спутник находился близко к восточному краю диаграммы

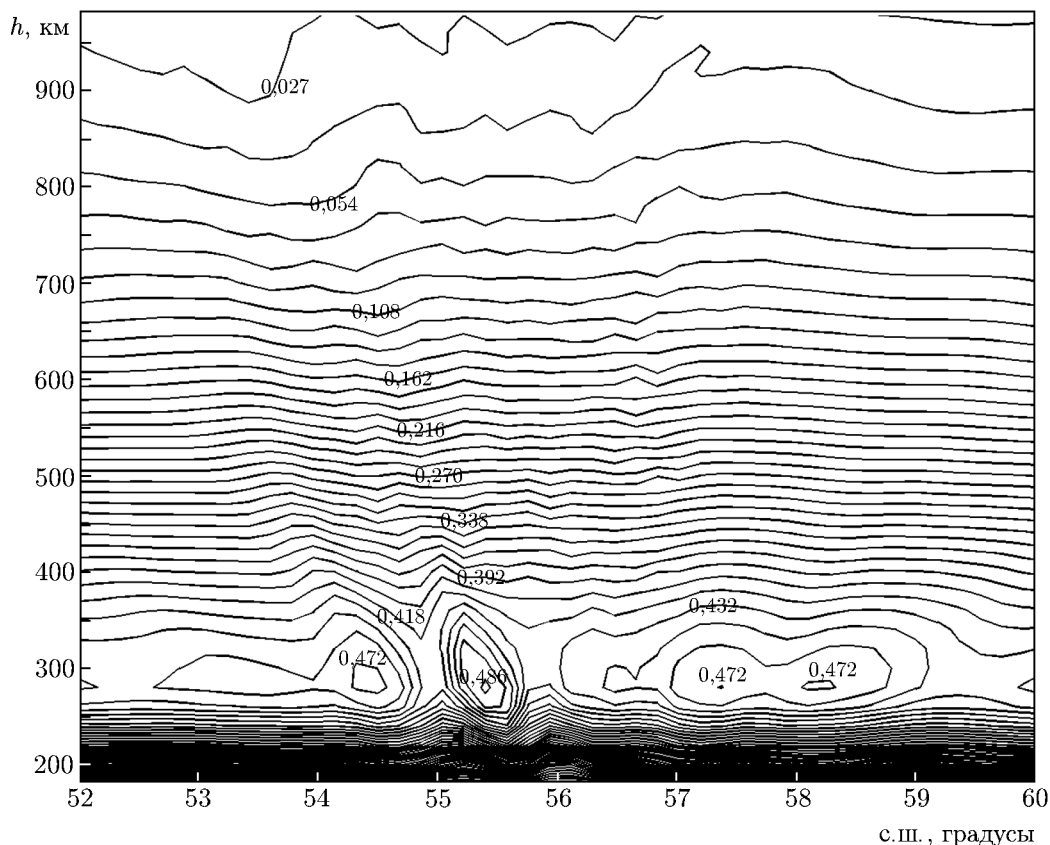


Рис. 1. Радиотомографическая реконструкция профиля концентрации плазмы (в единицах 10^{12} м^{-3}) в ионосфере над станцией «Сура», полученная в 18:49 UT 25 марта 2014 года при пролёте спутника COSMOS-2407

направленности. Далее, с 19:27 UT, ещё до окончания излучения мощной радиоволны, начиналось увеличение ПЭС, величина которого достигает своего максимума в 19:50 UT уже в паузу излучения волны накачки и далеко за пределами диаграммы направленности. Приращение ПЭС для этого максимума можно оценить как $\Delta I \approx +0,3 \text{ TECU}$. Расстояние между этими минимумом и максимумом ПЭС вдоль орбиты спутника составляет 45 км, если их отнести к высотам порядка 300 км. Подобных изменений величины ПЭС не наблюдалось при следующем включении станции «Сура» с 20:01 до 20:31 UT, когда модификация ионосферы осуществлялась в условиях $f_{\text{ВН}} > f_{0F_2}$, а луч на спутник пересекал ионосферу уже далеко вне диаграммы направленности излучения мощной радиоволны.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Уменьшение ПЭС на временах 19:02÷19:27 UT связано с влиянием полости с дефицитом концентрации плазмы (фокусирующей линзы), формирующейся вблизи центра диаграммы направленности. Оценка её размеров вдоль орбиты спутника даёт величину около 40 км, что хорошо соответствует результатам представленных выше радиотомографических измерений. Наконец, вычисленное для $\Delta I \approx \approx 1 \text{ TECU}$ и для продольного размера $L_{\parallel} \approx 150 \text{ км}$ (размер L_{\parallel} взят из рис. 1) среднее относительное уменьшение концентрации плазмы δN составляет около 15 %, что также хорошо соответствует данным радиотомографических измерений. Появление области с увеличенным ПЭС приблизительно в 70 км к востоку от центра диаграммы направленности с размерами вдоль орбиты спутника около 40 км логично связать с регистрируемой на радиотомограммах областью с повышенным содержанием плазмы. При этом величина относительного увеличения concentra-

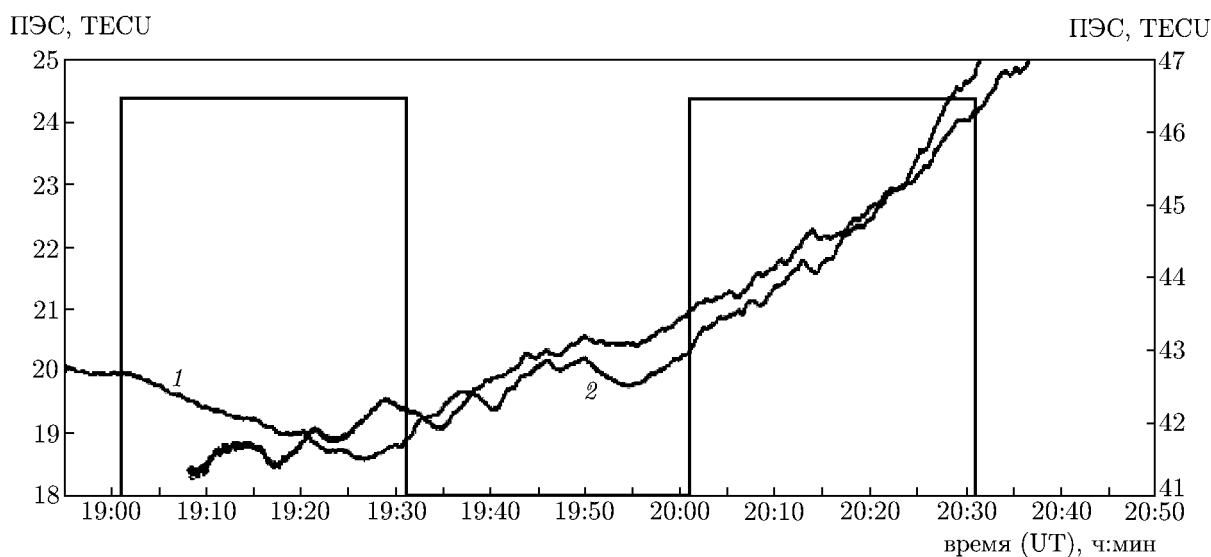


Рис. 2. Результаты измерения ПЭС 25 марта 2014 год в пункте «Сура» (кривая 1, левая шкала) и в пос. Сеченово (кривая 2, правая шкала). На оси времени отмечены периоды работы стенда «Сура»

ции плазмы в ней может быть оценена как $\delta N \approx 8 \div 15 \%$, что находится в полном 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 концентрации плазмы, причём величина повышения концентрации максимальна на южном крае кольца и заметно уменьшается к северу. Каков механизм формирования этого кольца, ещё предстоит выяснить.

В пос. Сеченово регистрация сигнала из-за экранировки приёмника начиналась только около 19:03 UT, когда луч на спутник пересекал возмущённую область ионосферы близко к её центральной части. На рис. 2 приведены измерения величины ПЭС (кривая 2, правая шкала) по лучу зрения Сеченово—спутник для спутника, который на высоте около 600 км прошёл через центр возмущённой магнитной силовой трубки в 19:11 UT и вышел за её пределы 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 её краем даже по уровню $0,1P_{\max}$). Во время импульса излучения волны накачки с 19:01 до 19:31 UT наблюдались сильные вариации ПЭС с величиной до $\Delta I \approx 0,3$ TECU и периодом 8 мин (с пространственными масштабами порядка 15 км, если их отнести к высоте 250 км, и с масштабами 40 км, если их отнести к высоте 600 км), которые продолжали регистрироваться с практически неизменной амплитудой и периодом до 19:55 UT, т. е. ещё 23 мин после выключения накачки. В следующем цикле включения волны накачки с 20:01 до 20:31 UT, когда модификация ионосферы осуществлялась в условиях $f_{\text{ВН}} > f_{0F_2}$, а луч на спутник пересекал ионосферу вне возмущённой магнитной силовой трубки, таких вариаций ПЭС не обнаруживалось. Анализ показал, что 8-минутные вариации ПЭС, по-видимому, являются результатом влияния плазменных возмущений, индуцируемых в широкой области высот ионосферы от 200 до 800 км и выше, как это наблюдалось в работе [1].

Таким образом, в рамках сделанных предположений удаётся непротиворечивым образом объяснить основные особенности вариаций ПЭС, измеренных в сеансе 25 марта.

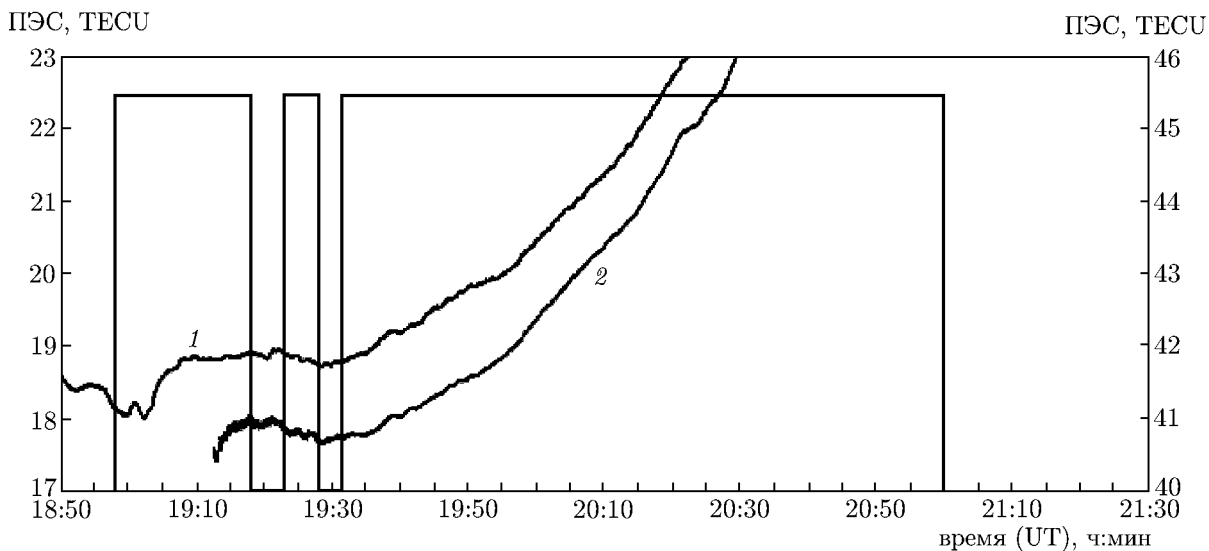


Рис. 3. Результаты измерения ПЭС в пункте «Сура» (кривая 1, левая шкала) и в пос. Сеченово (кривая 2, правая шкала) 24 марта 2014 года. На оси времени отмечены периоды работы стенда «Сура»

2.2. Измерения 24 марта 2014 года

24 марта стенд «Сура» излучал с 18:58 до 19:18, с 19:23 до 19:28 и с 19:31:40 до 21:00 UT мощные радиоволны с О-поляризацией на частоте 4785 кГц с мощностью $P_{\text{эфф}} = 95$ МВт. Во время измерений критическая частота f_{0F_2} уменьшалась с 6,1 МГц в 18:56 UT до 5,5 МГц в 19:20 UT. Во время излучения волны накачки наблюдалось развитие интенсивного $F_{\text{s}}^{\text{spread}}$ на ионограммах вертикального зондирования.

На рис. 3 (кривая 1) приведены измерения величины ПЭС по лучу зрения «Сура»—спутник для спутника, который вошёл в пределы диаграммы направленности по уровню $0,1P_{\text{max}}$ в 18:57 UT, прошёл примерно в 15 км к северу от её центра в 19:12 UT и вышел за её пределы в 19:40 UT. Для импульса излучения волны накачки с 18:58 до 19:18 UT через 2÷4 мин после её включения регистрируется минимум ПЭС с величиной $\Delta I \approx -(0,5 \div 0,7)$ TECU. Можно считать, что этот минимум связан с прохождением луча через полость с уменьшенной концентрацией плазмы, характеристики которой можно оценить как $\delta N \approx 10\%$ при её размере вдоль орбиты спутника примерно 30 км, что вполне соответствует ранее измеренным значениям, если также принять во внимание, что в этом сеансе из-за большой разности $f_{0F_2} - f_{\text{ВН}} \approx 0,7 \div 1,3$ МГц эффективность генерации искусственной турбулентности была меньше, чем в предыдущем сеансе. 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) может быть вызван как влиянием на результаты измерений области с повышенной концентрацией плазмы, обрамляющей эту полость, так и влиянием дакта с повышенной концентрацией плазмы. Их разделение здесь не представляется возможным.

Кривая 2 на рис. 3 соответствует измерениям величины ПЭС по лучу зрения Сеченово—спутник для спутника, который для высоты 600 км прошёл через центр возмущённой магнитной силовой трубки в 19:15 UT и вышел за её 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 её краем по уровню $0,1P_{\text{max}}$). В конце импульса излучения волны накачки с 19:13 до 19:28 UT регистрируется максимум ПЭС с величиной $\Delta I \approx +0,4$ TECU, а также его вариации

с периодом $2 \div 4$ мин, что соответствует пространственному периоду $9 \div 19$ км, если их отнести к высоте 600 км. Если максимум ПЭС связывать с влиянием дакта с увеличенной концентрацией плазмы во внешней ионосфере, то его размеры вдоль проекции орбиты спутника на высоте 600 км должны составлять около 80 км, а увеличение концентрации плазмы в нём $25 \div 30$ %, что соответствует измеренным характеристикам дактов [4]. Тогда вариации ПЭС с периодом $2 \div 4$ мин можно соотнести с крупномасштабными неоднородностями с $l_{\perp} \approx 15$ км, которые обнаруживаются в дакте [4, 5]. Поскольку 5-минутная пауза излучения волны накачки никак не сказалась на поведении ПЭС, мы должны заключить, что характерные времена релаксации дакта должны быть заведомо больше этой величины, что также соответствует результатам исследований свойств таких дактов.

3. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выполненные впервые совместные радиотомографические исследования структуры возмущённой области ионосферы и её зондирование сигналами спутников навигационной системы GPS в пространственно разнесённых точках позволили установить следующее. Помимо центральной части возмущённой области, где вблизи высоты отражения мощной радиоволны с O-поляризацией генерируются наиболее интенсивные крупномасштабные неоднородности и на высотах $200 \div 400$ км формируется полость с уменьшенной концентрацией плазмы, на результаты ночных измерений заметно влияют 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 кольцевой структуры с увеличенной концентрацией плазмы, опоясывающей полость с уменьшенной концентрацией плазмы, а также дактов с увеличенной концентрацией плазмы и крупномасштабных неоднородностей внутри них, генерация которых наблюдается на высотах внешней ионосферы. До сих пор наиболее важные характеристики этих структур были получены либо методом радиотомографии [3], либо прямыми измерениями плазменных возмущений с борта низкоорбитальных спутников [4]. В обоих случаях такие измерения проводятся достаточно редко и, самое главное, в них удаётся получить только характеристики плазменных возмущений на момент пролёта спутника, как правило, в стационарной стадии их развития после длительной модификации ионосферы мощными радиоволнами. Полученные в данной работе результаты измерений показывают, что с помощью GPS-зондирования можно изучать динамические характеристики этих крупномасштабных плазменных возмущений, информация о которых важна для определения механизмов их образования. В частности, было показано, что время формирования дакта составляет не больше 7 мин, а его релаксация длится заведомо дольше 10 мин.

Представленные в данной работе результаты ясно демонстрируют, что при измерении вариаций ПЭС приёмником, размещённым прямо на стенде «Сура» или близко к нему, вклад в эти вариации дают не только неоднородности, генерируемые в центральной части возмущённой области ионосферы, но и неоднородности, индуцируемые во внешней ионосфере. Это объясняет наблюдаемый, например, в работе [6] сложный характер и высокую интенсивность вариаций ПЭС, если луч на спутник проходит через южный край диаграммы направленности излучающей антенны стенда в направлении, близком к магнитному зениту.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда «Сура» за оказанную ими помощь в проведении экспериментов. Работа В. Л. Фролова была выполнена за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-

образовательных центров. Исследования Я. В. Глухова выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-05-00029 и 14-05-10024). Работа В. Е. Куницына и Г. А. Курбатова была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00556). Работа Е. С. Андреевой, связанная с развитием радиотомографических методов и алгоритмов по восстановлению ионосферных искусственных неоднородностей, выполнялась при поддержке РФФИ (проект 13-05-01122).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
2. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
3. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47. Art. no. RS0L15.
4. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
5. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, вып. 5. С. 342.
6. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.

Поступила в редакцию 5 февраля 2015 г.; принята в печать 30 июня 2015 г.

SPATIAL STRUCTURE OF LARGE-SCALE PLASMA DENSITY PERTURBATIONS, HF-INDUCED IN THE IONOSPHERIC F_2 REGION

V. L. Frolov, G. P. Komrakov, Ya. V. Glukhov, E. S. Andreeva, V. E. Kunitsyn, and G. A. Kurbatov

We consider the experimental results obtained by studying the large-scale structure of the ionospheric HF-disturbed region. The experiments were performed using the SURA heating facility. The ionospheric disturbed region was sounded by signals radiated by GPS navigation satellite beacons as well as by signals of low-orbit satellites (radio tomography). The results of the experiments show that large-scale plasma density perturbations induced at altitudes higher than the F_2 layer maximum can contribute significantly to the measured variations of the total electron density and can, with a certain arrangement of the reception points, be measured by the GPS sounding method.