

УДК 533.9.082+533.95+537.868

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ВОЗМУЩЁННОЙ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ ПОЛЕМ ИОНОСФЕРЕ МЕТОДАМИ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН И РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ СИГНАЛАМИ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС

Е. Д. Терещенко¹, С. М. Черняков¹, Р. Ю. Юрик^{1*}, М. Т. Ритвельд^{2,3}, И. Хагстром^{2,4}

¹ Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия

² Европейская научная ассоциация EISCAT;

³ Университет Тромсё — Арктический университет Норвегии, Норвегия

⁴ Шведский институт космической физики, г. Кируна, Швеция

Представлены результаты сравнения измерений полного электронного содержания по данным сигналов спутников ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния ультравысокочастотных радиоволн EISCAT (г. Тромсё, Норвегия) во время нагрева высокоширотной области ионосферы в направлении магнитного зенита мощным коротковолновым радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия). Измерения были выполнены в ходе двух экспериментальных кампаний в октябре 2013 года и в октябре 2018 года. В основном изменение полного электронного содержания по данным радара в интервале высот 100–400 км соответствовало вариациям полного электронного содержания по данным спутников ГЛОНАСС. Показана эффективность использования спутников ГЛОНАСС для наблюдения высокоширотных явлений. Рассмотрено полученное по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн аномальное возрастание полного электронного содержания на 4 TECU во время нагрева ионосферы в области, близкой к магнитному зениту. При этом по данным спутника ГЛОНАСС в этой же области наблюдалось уменьшение полного электронного содержания. Для объяснения противоречия между данными этих методов рассмотрено влияние мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации, возникающих в области воздействия мощного коротковолнового излучения. Показано, что при относительном превышении концентрации электронов в искусственных неоднородностях более, чем на $2 \cdot 10^{-3}$, преобладающим в отражённом сигнале становится рассеяние на неоднородностях с пространственными масштабами порядка 16 см.

ВВЕДЕНИЕ

Появление радаров некогерентного рассеяния радиоволн (НРР) привело к опубликованию ряда работ, связанных со сравнением данных этих радаров с данными, полученными с использованием других средств измерений. С началом активной работы радаров НРР Европейской научной ассоциации по некогерентному рассеянию радиоволн EISCAT стало возможным сравнение получаемых ими данных с данными наблюдений ионосферы другими методами: системой глобального позиционирования США (Global Positioning System, GPS) [1, 2], с использованием моделей [3] и ионозондами [4].

Первые пользователи GPS полагали, что радары некогерентного рассеяния радиоволн получают большое количество надёжных и достаточно точных данных о высокоширотной ионосфере, которые позволят исследовать влияние различных явлений на точность определения полного электронного содержания (ПЭС) по сигналам спутников GPS. Особенно их интересовали профили электронной концентрации, получаемые радаром НРР вдоль луча зрения и, следовательно, возможность рассчитать из них ПЭС. Установки НРР позволяют получить значения ПЭС вдоль луча зрения приёмник—спутник, а за счёт перемещения диаграммы направленности антенны

* Roman.Yurik@pgi.ru

радар — по траектории спутника. Совместное использование радаров НРР и спутниковых измерений даёт возможность сравнить ПЭС, получаемое этими методами. Предполагалось, что такое сравнение позволит оценить возможные ошибки определения ПЭС, которое получают по данным GPS, а также ошибки при пересчёте наклонного ПЭС в вертикальное ПЭС. Одним из недостатков использования GPS для исследования процессов в высокоширотной ионосфере является их низкое наклонение (55°), что не даёт возможность точнее рассматривать, например, процессы, протекающие вдоль магнитных силовых линий (высыпания и так далее).

В конце семидесятых годов прошлого столетия в СССР начались работы по разработке и развёртыванию глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) нового поколения, которая была продолжением существующей спутниковой навигационной системы, основанной на низкоорбитальных спутниках. Эти работы позволили в 2011 году ввести в эксплуатацию полноценную российскую глобальную навигационную спутниковую систему ГЛОНАСС. В настоящее время созвездие спутников системы ГЛОНАСС состоит из 28 спутников, из которых 24 рабочих, 4 в резерве. Спутники системы ГЛОНАСС имеют наклонение $64,8^\circ$ и высоту полёта 19 100 км, и поэтому их использование для наблюдения процессов в высокоширотной ионосфере является более перспективным.

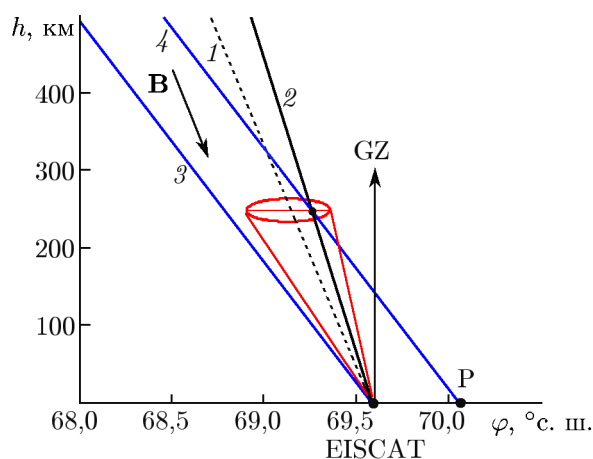


Рис. 1. Сравнение линий зрения на спутники глобальных навигационных систем для приёмников, установленных на ионосферном нагревном комплексе EISCAT/Heating (1 — линия в направлении магнитного зенита; 2 — линия зрения на спутник ГЛОНАСС; 3 — линия зрения на спутник GPS) и в его окрестности (4 — линия зрения на спутник GPS из удалённой точки); h и φ — высота и широта соответственно

и спутником ГЛОНАСС, приёмник сигналов спутника GPS необходимо отнести севернее точки наблюдения EISCAT на несколько десятков километров, в точку Р. При этом угол между направлением на магнитный зенит и линией зрения на спутник (линия 4) увеличивается, что приводит к ухудшению геометрии наблюдения структур электронной концентрации в области нагрева. В зависимости от ионосферных и геомагнитных условий высота области максимального нагрева ионосферы и изменений ионосферных структур может меняться. Спутники ГЛОНАСС позволяют регистрировать эти изменения, т. к. линия зрения на спутник в месте приёма проходит через область изменений в ионосфере вне зависимости от высоты, на которой находится эта область в момент наблюдения. В то же время приёмник GPS, отнесённый на некоторое расстояние север-

На рис. 1 показана схема положения спутников ГЛОНАСС и GPS при наблюдении области нагрева в районе нагревной установки EISCAT/Heating ($69,59^\circ$ с. ш., $19,22^\circ$ в. д., г. Тромсё, Норвегия) [5]. На рисунке местоположение нагревной установки, радара НРР и приёмника сигналов спутников ГЛОНАСС обозначено как EISCAT. Стрелкой с буквой **В** показано направление магнитной силовой линии в области наблюдения. Направление зенита в месте наблюдения показано стрелкой GZ. При нагреве ионосферы нагревный луч установки был направлен в магнитный зенит (штриховая линия 1). В центре рисунка в виде эллипса показана зона нагрева на высоте 250 км. В период нагрева высота области разогрева может меняться на десятки километров. Видно, что для наблюдателя в месте расположения EISCAT линия зрения на спутник ГЛОНАСС (линия 2) проходит через область нагрева, при этом линия зрения на спутник GPS (линия 3) лежит вне зоны нагрева. Чтобы с помощью спутника GPS можно было бы наблюдать ту же область нагрева, что

нее, например в точку Р, для наблюдения за предполагаемой областью нагрева, может регистрировать изменения только в ограниченной области высот. При изменении ионосферных условий может измениться высота области максимального нагрева и условия появления искусственных ионосферных неоднородностей в этой области. В этом случае ПЭС, измеряемое с использованием спутников GPS, может характеризовать состояние ионосферы вне области развития основных нагревных процессов либо на её краю. Это может дать неполную картину динамики ионосферы во время её нагрева.

Этот геометрический эффект был рассмотрен в работе [3] при анализе совместных наблюдений ионосферы в г. Тромсё радаром HPP и спутниками GPS. При сравнении полученного ими ПЭС было отмечено, что значения ПЭС по данным GPS получаются иногда меньше, чем значения ПЭС, полученные радаром HPP. Было показано, что это несоответствие вызвано низким наклонением спутников GPS.

Использование активных экспериментов значительно увеличивает возможности целенаправленного изучения поведения ионосферы в различных условиях. При работе нагревных установок и их воздействии на ионосферу мощными коротковолновыми радиоволнами образуются искусственные ионосферные неоднородности (ИИН). Эксперименты, проводимые на нагревных установках, позволили установить факт возникновения ИИН, а также выявить их некоторые особенности. Поэтому исследования, направленные на анализ экспериментального материала по характеристикам ИИН, и их зависимости от различных геофизических условий, являются актуальными для физики ионосферы.

Для изучения процессов в ионосфере во время нагревных экспериментов используются различные методы. Первые наблюдения поведения ионосферной плазмы, модифицированной нагревной установкой, были проведены с использованием радара HPP, расположенного рядом с ионосферным нагревным комплексом EISCAT/Heating. Во время подобных исследований для получаемых данных радара HPP была показана необходимость учёта угла между направлением зондирования и направлением магнитной силовой линии или положения магнитного зенита [6].

Одним из наиболее информативных методов определения изменений электронной концентрации является использование спутниковых наблюдений. Первые наблюдения области нагрева с использованием установки EISCAT/Heating, выполненные методом радиопросвечивания по сигналам низкоорбитальных навигационных спутников, относятся к 1998 году [7]. Позднее такие наблюдения были проведены в средних широтах на стенде «Сура» [8]. Появление навигационных спутников GPS способствовало дальнейшему развитию исследований структуры области нагрева. В средних широтах наблюдения области разогрева ионосферы с помощью приёма сигналов GPS были выполнены на стенде «Сура» [9]. В высоких широтах целенаправленные исследования процессов в области разогрева с помощью сигналов спутников ГНСС до настоящего времени практически не проводились, но можно отметить работу, в которой эффекты нагрева на установке EISCAT/Heating наблюдались с помощью спутников GPS [10].

В работе [11] отмечено, что по данным радара HPP во время нагрева ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением с необыкновенной поляризацией (Х-мода) нагревного комплекса EISCAT/Heating в г. Тромсё было зафиксировано возрастание электронной концентрации N в широком диапазоне высот в направлении магнитного зенита, достигающее 25 %. Для объяснения возрастания величины N в работе [11] было рассмотрено два механизма: нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса и стимулированная ионизация ускоренными электронами. Расчёты, проведённые её авторами, показали, что при условиях эксперимента первый механизм мог дать возрастание на $2,4 \div 5,3$ % относительно невозмущённого уровня. Поэтому ими было высказано предположение, что в данном случае на высотах выше уровня отражения мощного радиоизлучения наиболее вероятным механизмом возрастания концентрации N является

генерация потока ускоренных электронов в поле мощного коротковолнового радиоизлучения с Х-поляризацией.

Вопрос корректной интерпретации данных НРР в случае увеличения электронной концентрации на десятки процентов рассматривался в различных работах [12, 13]. При расчёте электронной концентрации методом НРР в этих случаях можно столкнуться с проявлением немаксвелловских или иных подобных механизмов отражения, например с отражениями от спутников, метеорными эхо и прочим. Такие эффекты могут наблюдаться и во время расчётов электронной концентрации при нагревных экспериментах. До сих пор этот вопрос остаётся открытым и требует дальнейших исследований.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для исследования изменений электронной концентрации во время модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением нагревной установкой EISCAT/Heating были проведены наблюдения области нагрева с использованием радара НРР ультравысокой частоты (УВЧ) EISCAT (930 МГц) и альтернативного метода, основанного на использовании сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС, во время двух наблюдательных кампаний с 20 октября по 1 ноября 2013 года и с 8 по 19 октября 2018 года.

В обоих случаях приёмный комплекс сигналов спутников ГЛОНАСС был установлен в 100 м от нагревной установки и в 30 м от радара НРР. Во время наблюдений была выполнена запись сигналов со спутников, когда линия зрения приёмный комплекс—спутник ГЛОНАСС проходила через область нагрева вблизи магнитного зенита. Регистрация сигналов спутников в обоих экспериментах осуществлялась двухчастотным приёмником Махог-GGDT с частотой опроса 1 Гц. Луч радара следовал за траекторией спутника и раз в минуту проводил измерения, по данным которых рассчитывались профили электронной концентрации и электронной температуры вдоль луча зрения на спутник. Для повышения эффективности разогрева диаграмма направленности нагревной антенны была отклонена на 12° от вертикали к югу в направлении локального магнитного зенита. Ионосферная обстановка в районе нагревного стенда контролировалась динозондом, обеспечивающим получение ионограмм вертикального зондирования один раз в 2 мин.

В период с 21 октября по 1 ноября 2013 года было проведено восемь сеансов по модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating. В этом эксперименте проводилась одновременная запись сигналов спутников ГЛОНАСС и УВЧ радара НРР. Наблюдения выполнялись в вечернее время, из них в спокойных ионосферных и геомагнитных условиях проведено шесть наблюдений, в возмущённых — два. В данной работе рассматривается случай аномального поведения электронной концентрации, наблюдавшегося 21 октября 2013 года во время нагрева с 16:20 UT по 16:50 UT.

В период с 8 по 19 октября 2018 года было проведено пять сеансов по модификации ионосферы, когда одновременно велась запись сигналов спутников ГЛОНАСС и радара НРР. Во время экспериментов 2018 года наблюдения проводились в дневное время (12:00÷13:00 UT), из них в возмущённых геомагнитных условиях — два (9–10 октября). В спокойных геомагнитных условиях было проведено три наблюдения — с 16 по 18 октября. Суммарные значения планетарного K_p -индекса за эти сутки были равны 10–, 4 и 1– соответственно.

Для расчёта ПЭС, получаемого радаром, были выбраны высоты от 100 до 400 км, для которых определение электронной концентрации было наиболее надёжным. Выше 400 км значения электронной концентрации, полученные по данным радара, имели существенный разброс значений. Поскольку ПЭС ниже 150 км даёт постоянный вклад не более $5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$ [2], то ПЭС ниже 100 км можно пренебречь. В этом случае полное электронное содержание от 100 км до высот спутника

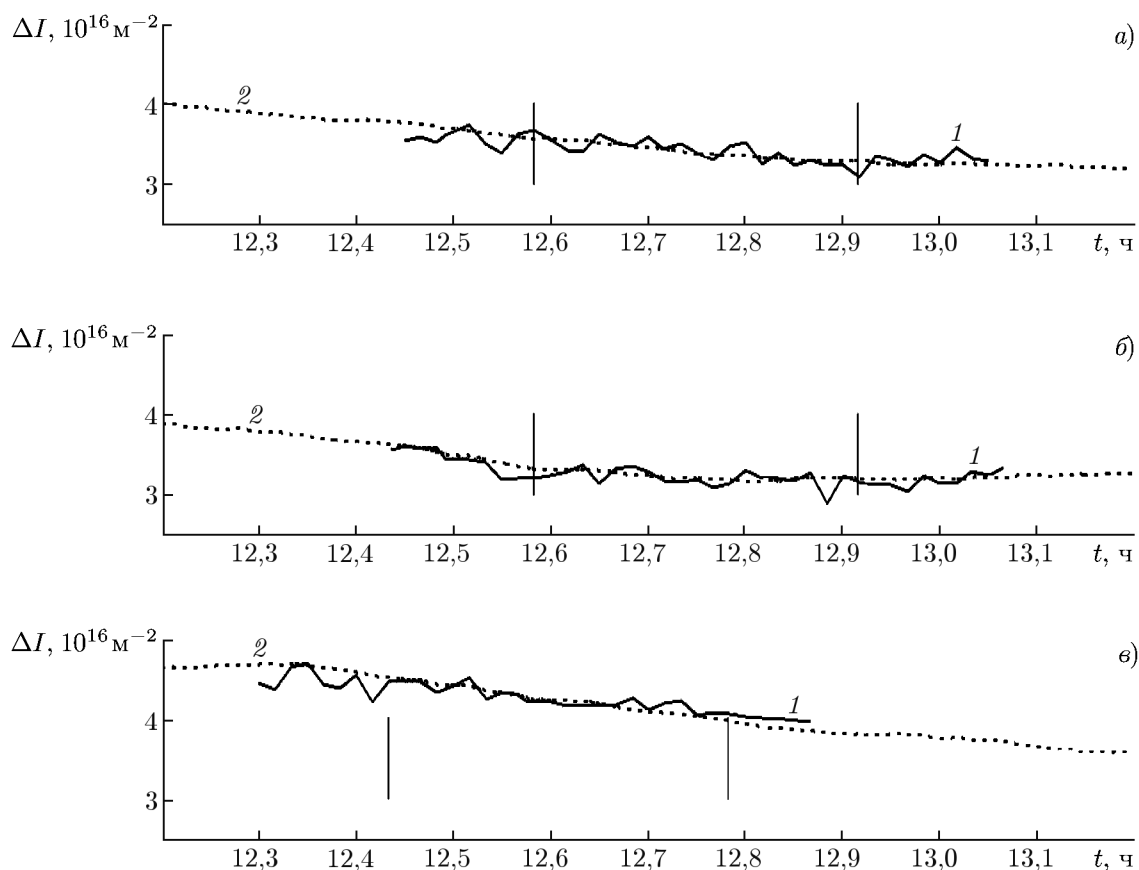


Рис. 2. Полное электронное содержание, измеренное радаром НРР (сплошная кривая 1) и относительное ПЭС по данным спутников ГЛОНАСС (пунктирная кривая 2) как функция времени t для измерений 16 (а), 17 (б) и 18 (в) октября 2018 года

включает в себя область ионосферы, которую контролирует радар, а также ионизованную атмосферу до высот спутника. В спокойных условиях области ионосферы и протоносферы вблизи полудня испытывают небольшие изменения. Поэтому можно принять, что ПЭС выше 400 км за время получасового наблюдения является слабо меняющимся. В этом случае можно уменьшить величину ПЭС, полученную по данным спутника, на эту постоянную величину и сравнить между собой ПЭС по данным радара и вариации ПЭС по данным спутника.

На рис. 2 для 16–18 октября 2018 года показано полное электронное содержание, полученное радаром для высот 100 и 400 км вдоль луча зрения приёмник–спутник (сплошная линия 1), и изменения ПЭС, полученного по данным спутников ГЛОНАСС (пунктирная линия 2), совмещённые с ПЭС по данным радара. Вертикальными линиями обозначено время начала и конца нагрева.

Изменение ПЭС, полученное по данным спутников в течение их одночасовых пролётов, для приведённых случаев достаточно гладкое. Никаких крупномасштабных ионосферных особенностей искусственного или естественного происхождения не обнаруживается. Поведение ПЭС по данным радара в общем соответствует изменениям ПЭС по данным спутника, кроме небольших вариаций, связанных с неточностью измерений радаром электронной концентрации. При этом из графиков следует, что эти отличия по величине не превышают 0,4 TECU (общепринятая единица полного электронного содержания $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$).

В большинстве случаев проведения совместных измерений полного электронного содержания

радаром и спутником было получено соответствие между их поведением: наблюдался похожий ход ПЭС, в структуре ПЭС отмечалось одинаковое волнообразное поведение. В некоторых случаях отмечено отсутствие эффективного нагрева и незначительные изменения в ПЭС.

2. АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, ПОЛУЧЕННОЕ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН

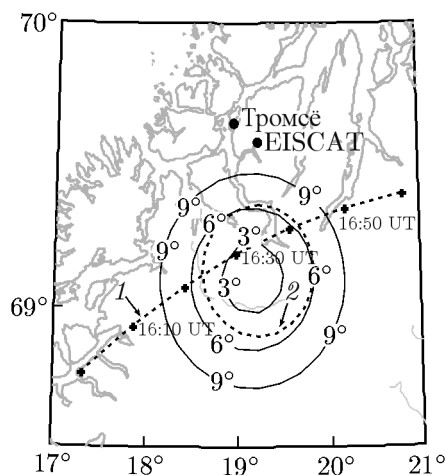


Рис. 3. Геометрия эксперимента 21 октября 2013 года

Совместные измерения показали, что вариации ПЭС, измеренные обоими методами, совпадают друг с другом в пределах ошибки измерений. Исключение составили результаты эксперимента 21 октября 2013 года. Рассмотрим этот случай подробнее, т. к. в ходе этого эксперимента наблюдалось anomalous увеличение электронной концентрации по данным радара некогерентного рассеяния, что не согласуется с измерениями ПЭС по данным спутникового радиопросвечивания возмущённой области ионосферы.

Геоманнитная обстановка 21 октября 2013 года была спокойной, суммарный индекс K_p за сутки был равен 2. Геометрия пролёта спутника ГЛОНАСС R01 представлена на рис. 3. На нём толстая пунктирная линия 1 — это проекция траектории спутника на высоте 250 км, пунктирная линия 2 — область нагрева на высоте 250 км. Эллипсы с цифрами 3, 6, 9 показывают углы в градусах от магнитного зенита, EISCAT — место расположения приёмника и нагревной установки. Во время пролёта спутника минимальный угол между линией зрения приёмник—спутник и магнитным зенитом составил 3° .

При проведении эксперимента 21 октября 2013 года с 16:20 UT по 16:50 UT модификация ионосферы осуществлялась с помощью непрерывного излучения на частоте 6,2 МГц (критическая частота слоя F_2 равна 6,8 МГц), при этом эффективная мощность излучения установки была около 200 МВт. В эксперименте использовалась антенная система, обеспечивающая ширину диаграммы направленности антенны нагревного комплекса около $12,5^\circ$.

На рис. 4а показано изменение ПЭС (линия 1), полученного по данным фазовых измерений сигналов спутника 21 октября 2013 года за всё время пролёта в зоне радиовидимости, приведённое без учёта начальной фазы. На рисунке внизу чёрный прямоугольник показывает время работы нагревного стенда EISCAT/Heating, серый прямоугольник — интервал времени, когда линия зрения на спутник проходила через область нагрева. На рис. 4б приведены вариации ПЭС (линия 1), полученные по данным фазовых измерений сигналов спутника с 15:50 UT по 17:10 UT. Из данных убраны тренды, связанные с движением спутника и крупномасштабными изменениями ионосферы. На рис. 4а и б штриховыми линиями 2 показаны значения угла Ξ между направлением на спутник и магнитным полем (правая вертикальная ось).

Из рис. 4б видно, что нагрев ионосферы вызвал изменение её структуры. На юго-западном краю после начала нагрева в 16:20 UT ПЭС повышается в течение 2,5 мин, затем оно резко уменьшается на 1 TECU, достигая минимального значения к 16:27 UT. После этого ПЭС снова увеличивается на 0,7 TECU и достигает к 16:40 UT максимума на северо-восточном краю зоны нагрева. Затем к 16:42 UT ПЭС уменьшается на 0,1 TECU. В это время линия зрения на спутник выходит из области нагрева, ПЭС начинает увеличиваться, и в 16:47 UT фиксируется

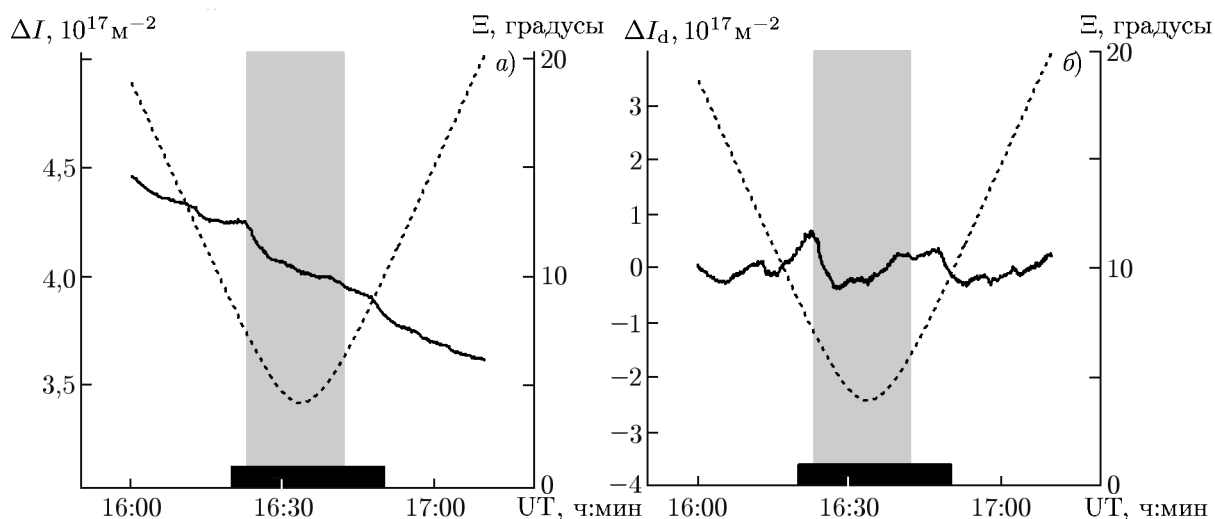


Рис. 4. Изменение ПЭС, полученное по данным фазовых измерений сигналов спутника 21 октября 2013 года за всё время пролёта спутника в зоне радиовидимости (а); вариации ПЭС с 15:50 UT по 17:10 UT 21 октября 2013 года (б)

второй максимум. Нагрев ионосферы в это время продолжается. После этого ПЭС начинает резко уменьшаться, хотя нагрев продолжается ещё 3 мин. Вероятно, этот эффект вызван тем, что линия зрения на спутник вышла из зоны, где проявляется воздействие нагревной волны. Из рисунка видно, что основными особенностями изменений ПЭС являются его уменьшение в центральной зоне диаграммы направленности антенны, т. е. в направлении магнитного зенита, и его повышенные значения на краях зоны нагрева. При этом наблюдается асимметрия профиля ПЭС: его минимальное значение сдвинуто относительно центра диаграммы направленности антенны в юго-западную сторону. Похожие эффекты во время нагрева ионосферы мощным электромагнитным излучением наблюдались и ранее [14, 15].

На рис. 5 показано изменение высотных профилей электронной концентрации $N(h)$, полученное по данным радара при сканировании ионосферы в направлении на спутник во время его пролёта над областью нагрева ионосферы. Профили строились по высотам вдоль линии зрения на спутник. Для получения значений электронной концентрации была использована методика расчёта GUIDAP (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package [16, 17]).

Профили электронной концентрации (см. рис. 5) до 16:27 UT имели фоновый характер. В 16:28 UT началось формирование увеличенных значений электронной концентрации на высотах 220÷280 км (16:28÷16:33 UT). Сначала на профиле электронной концентрации в 16:28 UT обозначился максимум на высоте около 270 км. Затем в 16:29 UT максимум концентрации электронов увеличился скачком и до 16:33 UT был в три–пять раз выше фоновой электронной концентрации. В 16:34 UT электронная концентрация скачком уменьшилась до фоновой величины.

В эксперименте получено существенное (2,5÷4,0 раза) увеличение электронной концентрации в области максимума F -слоя в центральной зоне нагрева. Зона повышения электронной концентрации по высоте занимает область около 60 км, от 220 до 280 км. Таким образом, при нагреве ионосферы электромагнитной волной с О-поляризацией, излучаемой вдоль направления на магнитный зенит, максимальные изменения электронной концентрации происходили в узкой высотной области вблизи магнитного зенита. В период наблюдения максимум электронной концентрации ионосферы над динозондом находился на высотах 230÷250 км.

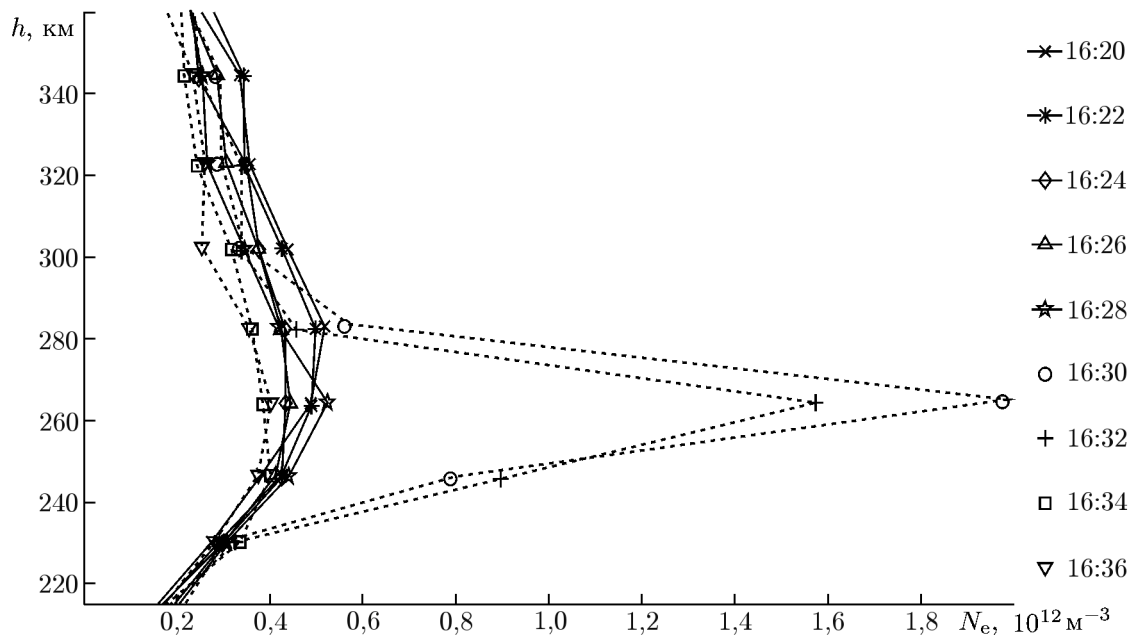


Рис. 5. Высотные профили электронной концентрации $N_e(h)$, полученные радаром НРР при сканировании ионосферы в направлении на спутник 21 октября 2013 года в указанные моменты времени

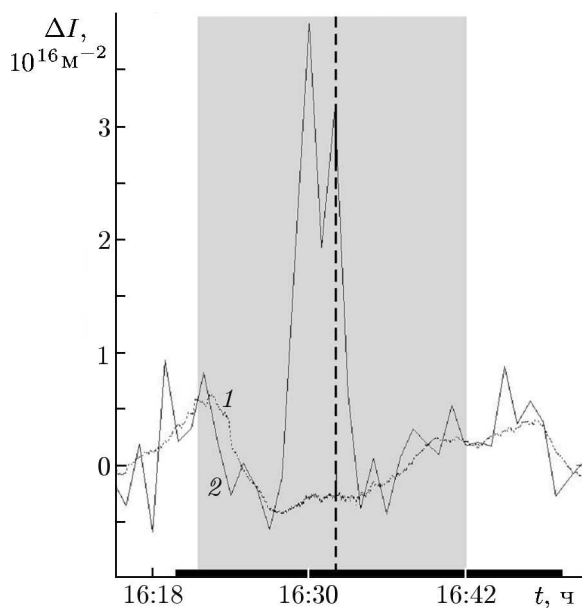


Рис. 6. Сравнение вариаций ПЭС по данным радара (сплошная линия 2) и по данным спутника (прерывистая линия 1) для 21 октября 2013 года

данных [18, 19].

С нашей точки зрения, возможной причиной расхождений между измерениями ПЭС в ионосфере, возмущённой мощным коротковолновым излучением, по данным радиолокатора НРР и радиопросвечивания сигналами искусственных спутников Земли может быть увеличение мощности радиолокационного сигнала за счёт обратного рассеяния поля турбулизованной областью

На рис. 6 приведены вариации ПЭС, полученные 21 октября 2013 года по данным спутника ГЛОНАСС (прерывистая линия 1), и вариации ПЭС, полученные по данным радара НРР для высот от 100 до 600 км (сплошная линия 2). Как видно, в общих чертах эти кривые совпадают на краях интервала, но отличаются в центральной части. Полное электронное содержание, полученное по данным радара, показывает повышение в центральной части на 4 ТЕСУ, значительно превышающее погрешность в методе НРР. При этом вариации ПЭС, полученные по данным спутника, испытывают лишь небольшое изменение.

Многолетний опыт применения метода НРР говорит, что в данном случае аномальное увеличение электронной концентрации не должно интерпретироваться как реальное, т. к. может быть обусловлено другими механизмами. Так, например, максимум электронной концентрации полученный по данным НРР на высоте 270 км, может быть объяснён усилением ионной линии в радарных данных [18, 19].

ионосферы. Считаем, что её появление обусловлено воздействием мощного коротковолнового излучения на ионосферную плазму.

При расчёте спектра некогерентно рассеянного сигнала в силу малости тепловых флуктуаций предполагается, что они не вносят вклада в величину средней диэлектрической проницаемости среды. Однако в области, подверженной влиянию мощного возмущающего коротковолнового поля, могут возникать достаточно сильные неоднородности электронной концентрации, и при описании поля в такой среде нельзя использовать приближение однократного рассеяния, т. е. необходимо учитывать перерассеянные поля. Это приводит к тому, что вместо невозмущённой диэлектрической проницаемости среды в области с неоднородностями нужно использовать некоторую эффективную диэлектрическую проницаемость.

Пусть ε — диэлектрическая проницаемость фоновой плазмы, равная приблизительно единице в высокочастотном пределе. Тогда для эффективной диэлектрической проницаемости плазмы с неоднородностями ε_{eff} при рассеянии поля на мелкомасштабных неоднородностях справедлива формула [20]

$$\varepsilon_{\text{eff}} = 1 - \frac{1}{3} \langle \delta \varepsilon^2 \rangle (1 - 2ik^3 a^3), \quad (1)$$

где угловые скобки означают статистическое усреднение, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, a — характерный масштаб неоднородностей,

$$\delta \varepsilon(\mathbf{r}) = -(4\pi r_e/k^2) \delta N_i(\mathbf{r}),$$

$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$ м — классический радиус электрона, $\delta N_i(\mathbf{r})$ — флуктуации электронной концентрации, генерируемые в ионосфере мощным коротковолновым излучением, $\mathbf{r}$ — радиус-вектор. Заметим, что формула (1) при $k^3 a^3 \ll 1$ совпадает с выражением для эффективной диэлектрической проницаемости смеси, приведённым в книге [21] для статического случая.

Сравнение мощности некогерентно рассеянного сигнала S_i объёма V [22] с мощностью сигнала S_s , рассеянного объёмом с эффективной диэлектрической проницаемостью ε_{eff} [23], в предположении изотропности турбулентных образований приводит к следующему соотношению:

$$R = \frac{S_i}{S_s} = \left(\frac{4\pi}{3} \right)^2 \frac{r_e^2 N^3}{k^4} \left(\frac{\langle \delta N_i^2 \rangle}{N_i^2} \right)^2. \quad (2)$$

Рассмотрим величину R для условий, типичных для установки EISCAT. Имеем $\lambda = 0,32$ м, $N \approx 2 \cdot 10^{11}$ м⁻³, $V = 10^{10}$ м³. Подставляя эти значения в (2), имеем $R \approx 0,7 \cdot 10^{11} (\langle \delta N_i^2 \rangle / N_i^2)^2$. Видим, что при $\sqrt{\langle \delta N_i^2 \rangle} / N_i^2 = 2 \cdot 10^{-3}$ величина R принимает значение 1; в этом случае мощности рассеянных сигналов будут равны. При превышении этого значения преобладающим в сигнале будет влияние рассеяния на неоднородностях с пространственными масштабами 16 см для УВЧ радара EISCAT.

Некоторым подтверждением высказанной гипотезы о влиянии неоднородностей, генерируемых мощным коротковолновым полем, на результаты сравнения данных радиопросвечивания и метода НРР могут служить фазовые флуктуации сигнала ГЛОНАСС.

Для простоты и удобства анализа рассмотрим разность F приведённых фазовых псевдодалейностей сигналов спутника ГЛОНАСС, измеренных на частотах f_1 и f_2 :

$$F = L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2,$$

где L_1 и L_2 — фазы несущих, измеренные в целых циклах, на частотах f_1 и f_2 соответственно, а λ_1 и λ_2 — соответствующие этим частотам длины волн. Для спутников ГЛОНАСС частоты

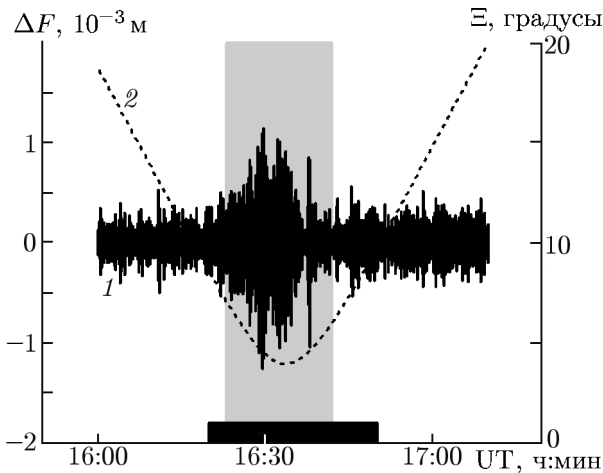


Рис. 7. Флуктуации ΔF с 16:00 до 17:10 UT 21 октября 2013 года

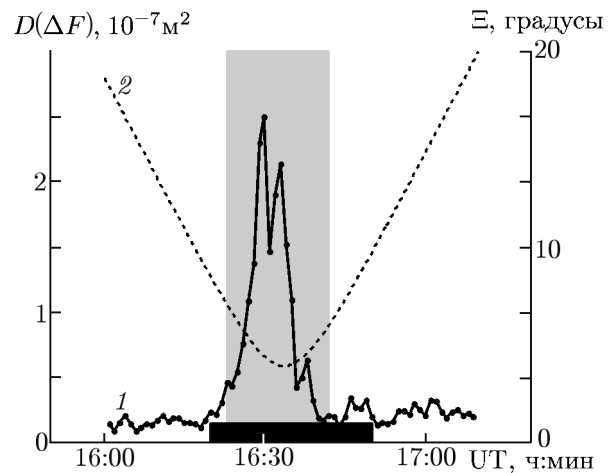


Рис. 8. Пространственно-временная дисперсия флуктуаций ΔF

когерентных сигналов определяются как

$$f_1 = 1602 + (9/16)k \text{ МГц}, \quad f_2 = 1246 + (7/16)k \text{ МГц},$$

где k — номер канала.

Параметр F при прохождении сигналов через ионосферу включает две составляющие:

$$F = F_0 + \Delta F.$$

Составляющая F_0 связана с однородной ионосферой и пропорциональна интегральному электронному содержанию вдоль луча спутник—приёмник, которое плавно изменяется с вариацией электронной концентрации, в то время как величина ΔF представляет собой флуктуационную составляющую, обусловленную неоднородностью ионосферы. Для её анализа из F удалена низкочастотная составляющая ниже частоты среза $f_c = 0,35$ Гц.

На рис. 7 представлены флуктуации ΔF (линия 1) 21 октября 2013 года во время нагрева ионосферы с 16:20 UT до 16:50 UT. Время нагрева на рисунке обозначено чёрным прямоугольником, серая область в центре рисунка — это время пересечения луча зрения приёмник—спутник и области диаграммы направленности антенной решётки нагревной установки по уровню мощности -3 дБ. Кривая линия 2 на рисунке отображает угол Ξ между лучом приёмник—спутник и магнитным полем Земли на высоте 250 км.

Из рис. 7 видно, что при прохождении радиосигналов через возмущённую область ионосферы с уменьшением угла между лучом зрения приёмник—спутник и магнитным полем возрастают флуктуации ΔF , достигая в $3 \div 4$ раза больших значений чем вне возмущённой области. Наблюдаемое увеличение флуктуаций может быть объяснено наличием мелкомасштабных неоднородностей в возмущённой области ионосферы и малыми углами зондирующего радиолуча с магнитным полем, приводящими к увеличению мерцаний спутникового сигнала.

На рис. 8 представлена дисперсия флуктуации ΔF (линия 1) для этого же эксперимента. Дисперсия рассчитана на интервалах с длительностью 120 с и с шагом 60 с по всему интервалу измерений. Вспомогательные линии на рис. 8 такие же, как и на рис. 7. Из рисунка видно, что дисперсия флуктуации ΔF значительно увеличена в возмущённой области ионосферы. Следует отметить, что наблюдаемая пространственно-временная вариация дисперсии флуктуации ΔF повторяет вариацию интегрального содержания электронов по данным радара HPP (см. рис. 6).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что вариации полного электронного содержания, полученного по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн и спутников ГЛОНАСС, в основном соответствуют друг другу.

При наблюдениях 21 октября 2013 года радаром некогерентного рассеяния радиоволн в период воздействия на ионосферу мощного коротковолнового излучения отмечен случай резкого увеличения электронной концентрации в направлении магнитного зенита, полученной с помощью стандартного расчёта. Профили электронной концентрации при сканировании области нагрева соответствовали фоновым значениям, кроме области вблизи магнитного зенита, где наблюдалось резкое увеличение электронной концентрации. Расчёт полного электронного содержания по линии зрения радар—спутник, полученного по данным радара вдоль траектории спутника, также показал резкое увеличение полного электронного содержания вблизи магнитного зенита.

В это же время по наблюдениям спутника ГЛОНАСС увеличения полного электронного содержания не наблюдалось. Основными особенностями поведения полного электронного содержания при непрерывном нагреве ионосферы в течение 30 мин в направлении магнитного зенита по данным спутника ГЛОНАСС явились уменьшение полного электронного содержания в центральной зоне диаграммы направленности антенны, т. е. в направлении магнитного зенита, и повышенные значения полного электронного содержания на краях зоны нагрева.

Поведения полного электронного содержания по данным спутника ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния радиоволн во многом соответствовали друг другу, кроме центральной части. Это несоответствие можно объяснить влиянием на результаты расчёта когерентной составляющей в мощности принимаемого сигнала, обусловленной неоднородностями электронной концентрации в области разогрева, в которой определяется электронная концентрация.

Показано, что в высоких широтах во время экспериментов на комплексе EISCAT/Heating для изучения структуры ионосферы в области модификации ионосферы мощной короткой радиоволной удобно использовать спутники ГЛОНАСС, параметры орбит которых позволяют исследовать изменения полного электронного содержания в направлении вдоль геомагнитной силовой линии в месте наблюдения.

Авторы выражают благодарность Научной ассоциации EISCAT за выделение рабочих часов нагревного комплекса EISCAT/Heating и радара некогерентного рассеяния УВЧ в рамках программы EISCAT Peer-reviewed Program experiments и за возможность проведения наблюдений сигналов ГНСС в обсерватории EISCAT (г. Тромсё).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forte B., Smith N. D., Mitchell C. N., et al. // Ann. Geophys. 2013. V. 31. P. 745.
2. Jakowski N., Sardon E., Engler E., et al. // Ann. Geophys. 1996. V. 14. P. 1429.
3. Lilensten J., Cander Lj. R. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2003. V. 65. P. 833.
4. Lilensten J., Cander Lj. R., Rietveld M. T., et al. // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 183.
5. Rietveld M. T., Kohl H., Kopka H., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. V. 55. P. 577.
6. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. A4. P. 1141.
7. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Rietveld M. T., et al. // Ann. Geophys. 1998. V. 16, No. 7. P. 812.
8. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325, No. 5–6. P. 381.

9. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934.
10. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Andreeva E. S., et al. // Proc. of the XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, 13–20 August 2011, Istanbul, Turkey. Art. no. 6051133.
11. Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Йоман Т. К. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 571.
12. Lockwood M., Suvanto K., St.-Maurice J.-P., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1988. V. 50, No. 4–5. P. 467.
13. Wu J., Wu J., Rietveld M. T., et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. P. 1277.
14. Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. С. 122.
15. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47. Art. no. RS0L15.
16. Lehtinen M. S., Huuskonen A. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 435.
17. Lehtinen M. S., Huuskonen A., Pirttila J. // Ann. Geophys. Atmos. Hydrospheres Space Sci. 1996. V. 14, No. 12. P. 1487.
18. Rexer T., Gustavsson B., Leyser T., et al. // SGO Report No. 68. 2019. P. 94.
19. Rietveld M. T., Senior A. // SGO Report No. 68. 2019. P. 95.
20. Басс Ф. Г., Брауде С. Я., Канер Э. А., Мень А. В. // Успехи физ. наук. 1961. Т. 73, вып. 1. С. 89.
21. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. 4-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2005. 656 с.
22. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
23. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. М.: Наука, 1966. С. 216.

Поступила в редакцию 25 октября 2019 г.; принята в печать 29 октября 2019 г.

**TOTAL ELECTRON CONTENT MEASUREMENTS IN THE IONOSPHERE
DISTURBED BY HIGH-POWER HIGH-FREQUENCY WAVES
BY THE METHODS OF INCOHERENT SCATTERING OF RADIO WAVES
AND RADIO SOUNDING BY GLONASS SATELLITE SIGNALS**

E. D. Tereshchenko, S. M. Cherniakov, R. Yu. Yurik, M. T. Rietveld, and I. Häggström

We present the results of comparing the total electron content measurements based on GLONASS satellite signals and the EISCAT UHF incoherent scatter radar (Tromsø, Norway) during modification of the high-latitude ionosphere in the magnetic zenith direction by high-frequency radio waves of the EISCAT/Heating facility (Tromsø, Norway). The measurements were performed during two experiment campaigns in October 2013 and in October 2018. In general, the total electron content variations obtained from the radar data in the altitude range 100–400 km were consistent with the total electron content variations from the GLONASS satellites. The efficiency of using GLONASS satellites for observations of high-latitude phenomena was shown. The anomalous increase in the total electron content by 4 TECU obtained from the incoherent scatter radar when the ionosphere was heated in the region close to the magnetic zenith is considered. The GLONASS satellite data show the total electron content reduction in the same region. To explain the disagreement between measurements by these two methods, the effect of small-scale electron-density irregularities arising in the region modified by high-power HF radio waves is considered. It is shown that when the electron density in artificial irregularities is exceeded by $2 \cdot 10^{-3}$ times relative to the background density of the medium, scattering by irregularities with spatial scales of the order of 16 cm becomes predominant in the reflected signal.