

УДК 550.388.2

Е. Д. Терещенко, А. Н. Миличенко, М. Т. Ритвельд,
С. М. Черняков, М. В. Швец

Изменение высокоширотной ионосферы при нагреве мощной коротковолновой радиоволновой установки EISCAT/Heating по данным сигналов спутника ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния

Представлены результаты наблюдений изменения температуры, электронной концентрации и полного электронного содержания высокоширотной области ионосферы во время ее модификации мощным коротковолновым радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия) по данным сигналов спутников ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния УВЧ ЕИСКАТ (Тромсё, Норвегия). Рассмотрена геометрия пролетов спутников ГЛОНАСС и GPS для условий работы нагревного комплекса в Тромсё. Показано, что во время экспериментов на комплексе EISCAT/Heating для изучения модифицированной структуры высокоширотной ионосферы удобнее использовать спутники ГЛОНАСС. Параметры орбит этих спутников позволяют исследовать изменения полного электронного содержания в направлении вдоль геомагнитной силовой линии в месте наблюдения. Показано, что во время нагрева ионосферы мощной коротковолновой радиоволной ее структура приобретает неоднородный характер. Работа нагревного комплекса в режиме "включено – выключено" вызывает появление волнообразных вариаций полного электронного содержания с периодом, близким к периоду нагрева. Основными особенностями поведения полного электронного содержания при непрерывном нагреве ионосферы в направлении магнитного зенита по данным спутника ГЛОНАСС явились уменьшение полного электронного содержания в центральной зоне диаграммы направленности антенны нагревного комплекса, т. е. в направлении магнитного зенита, и присутствие повышенных значений полного электронного содержания на краях зоны нагрева. По данным радара некогерентного рассеяния во время нагрева ионосферы вблизи направления на магнитный зенит формируется область повышенной электронной температуры и электронной концентрации. Поведение полного электронного содержания по данным спутника ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния во многом соответствует друг другу, кроме этой области. Высказываются предположения о причинах такого несоответствия.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, ЕИСКАТ, ГЛОНАСС, полное электронное содержание.

Введение

Использование активных экспериментов значительно увеличивает возможности целенаправленного изучения поведения ионосферы в различных условиях. При работе нагревных установок и их воздействии на ионосферу мощными коротковолновыми (КВ) 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, их зависимости от различных геофизических условий, являются актуальными для физики ионосферы.

В настоящее время эксперименты по модификации ионосферы проводятся в основном на стенде "Сура" (56,15° с.ш., 46,1° в.д., $L = 2,8$, $I = 72^\circ$, Васильсурск, Россия) и ионосферном нагревном комплексе EISCAT¹/Heating (69,6° с.ш., 19,2° в.д., $L = 6,2$, $I = 78^\circ$, Тромсё, Норвегия).

Первые наблюдения области нагрева методом радиопросвечивания по сигналам низкоорбитальных навигационных спутников с использованием установки EISCAT/Heating были выполнены в 1998 г. [1], затем в средних широтах на стенде "Сура" [2–4]. Появление высокоорбитальных навигационных спутников GPS способствовало дальнейшему развитию исследований структуры области нагрева. В средних широтах наблюдения области разогрева ионосферы с помощью приема сигналов GPS были выполнены на стенде "Сура" [5–7]. В высоких широтах целенаправленные исследования подобного рода до настоящего времени практически не проводились, однако следует отметить работы, в которых эффекты нагрева на установке EISCAT/Heating наблюдались с помощью спутников GPS [8].

В конце семидесятых годов прошлого столетия в СССР начались работы по разработке и развертыванию глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) нового поколения, которая была продолжением существующей спутниковой навигационной системы, основанной на низкоорбитальных спутниках. Эти работы позволили в 2011 г. ввести в эксплуатацию полноценную российскую глобальную навигационную спутниковую систему ГЛОНАСС². В настоящее время созвездие спутников системы ГЛОНАСС состоит из 28 спутников, из которых 24 – рабочих, 4 – в резерве. Спутники системы ГЛОНАСС имеют наклонение

¹ Англ. EISCAT – the European Incoherent Scatter Scientific Association (ЕИСКАТ – Европейская научная ассоциация по некогерентному рассеянию радиоволн).

² Federal Space Agency, Information-Analytical Centre: [web-site]. URL: <http://glonass-iac.ru/en/>.

64,8° и высоту 19 100 км. Спутники с таким наклоном более удобны для исследования высокоширотной ионосферы, чем обычно используемые спутники американской глобальной навигационной спутниковой системы Global Positioning System (GPS), наклонение которых равно 55°. Более высокое наклонение спутников ГЛОНАСС позволяет проводить наблюдения изменений полного электронного содержания (англ. total electron content, TEC) вдоль геомагнитной силовой линии при экспериментах по модификации ионосферы нагревной установкой EISCAT/Heating. В конце октября 2013 г. в ста метрах от нагревной установки EISCAT/Heating вблизи радара некогерентного рассеяния (НР) ультравысокой частоты (УВЧ, 930 МГц) был установлен приемный комплекс сигналов спутников ГЛОНАСС/GPS. В течение нескольких дней была выполнена запись сигналов со спутников, когда линия зрения "приемный комплекс – спутник ГЛОНАСС" проходила через область разогрева ионосферы нагревной установкой.

Материалы и методы

В период с 21 октября по 1 ноября 2013 г. было проведено восемь сеансов по модификации высокоширотной ионосферы мощным КВ-радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating. Одновременно велась запись сигналов спутников ГНСС, а луч радара НР следовал за траекторией спутника и раз в минуту проводил измерение профиля электронной концентрации и электронной температуры вдоль линии зрения на спутник. Ионосферная обстановка контролировалась дайнозондом, обеспечивающим получение ионограмм вертикального зондирования 1 раз в 2 минуты. Наблюдения проводились в дневное и вечернее время, из них в спокойных ионосферных и геомагнитных ($Kp \leq 1$) условиях проведено шесть наблюдений, в возмущенных – два.

На рис. 1 показана схема положения спутников ГЛОНАСС и GPS при наблюдении области нагрева в районе нагревной установки. На рисунке местоположение нагревной установки, приемника сигналов спутников и радара НР обозначено как EISCAT. Стрелкой с буквой В показано направление магнитной силовой линии в области наблюдения. При нагреве ионосферы нагревный луч установки был направлен в магнитный зенит (прерывистая линия, направленная из места наблюдения вверх, к югу). В центре рисунка в виде эллипса показана зона нагрева на высоте 250 км. Согласно данным дайнозонда максимум электронной концентрации в период нагрева менялся в пределах от 220 до 250 км. Видно, что для наблюдателя в месте расположения EISCAT (цифра 1 на рисунке) линия зрения на спутник ГЛОНАСС проходит через область нагрева, при этом линия зрения на спутник GPS лежит вне зоны нагрева. Для того чтобы с помощью спутника GPS можно было бы наблюдать ту же область нагрева, что и спутником ГЛОНАСС, приемник сигналов спутника GPS необходимо отнести севернее точки наблюдения EISCAT в точку 2 на несколько десятков километров. При этом угол между направлением на магнитный зенит и линией зрения на спутник 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, поскольку линия зрения на спутник в месте приема проходит через область изменений в ионосфере вне зависимости от высоты, на которой находится эта область в момент наблюдения. В то же время приемник GPS, отнесенный на некоторое расстояние, например, в точку 2, 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 полное электронное содержание, наблюдаемое с использованием спутников GPS, может характеризовать состояние ионосферы вне области развития основных нагревных процессов, либо на ее краю. Это может дать неполную картину развития процессов во время нагрева ионосферы.

За время наблюдений наиболее ярко изменения в полном электронном содержании проявились во время пролета спутника ГЛОНАСС R01 21 октября 2013 г. Геометрия пролета этого спутника представлена на рис. 2. На этом рисунке пунктирная линия – проекция траектории спутника на высоте 250 км, эллипс – область нагрева на высоте 250 км. На рис. 2, а штриховая линия – направление магнитного зенита, на рис. 2, б правая точка в области нагрева – центр диаграммы направленности, левая точка – магнитный зенит, EISCAT – место расположения приемника и нагревной установки. Во время пролета спутника минимальный угол между линией зрения "приемник – спутник" и магнитным зенитом составил 3 градуса (время пролета спутником минимального угла показано стрелкой на рис. 2, б).

При проведении эксперимента 21 октября 2013 г. с 16:20 UT по 16:50 UT осуществлялась модификация ионосферы с помощью непрерывного коротковолнового излучения ионосферного нагревного комплекса на частоте 6,2 МГц (в начале нагрева критическая частота слоя F2 была равна 6,8 МГц), при этом эффективная мощность излучения установки – около 200 МВт. В течение нагрева критическая частота уменьшилась более чем на 1 МГц. В эксперименте использовалась антенная система, обеспечивающая ширину диаграммы направленности антенны нагревного комплекса около 12,5°. Чтобы повысить эффективность разогрева, диаграмма направленности антенны была отклонена на 12° от вертикали к югу в направлении локального магнитного зенита. Сигналы спутника регистрировались двухчастотным приемником Махог-GGDT с частотой опроса 1 Гц.

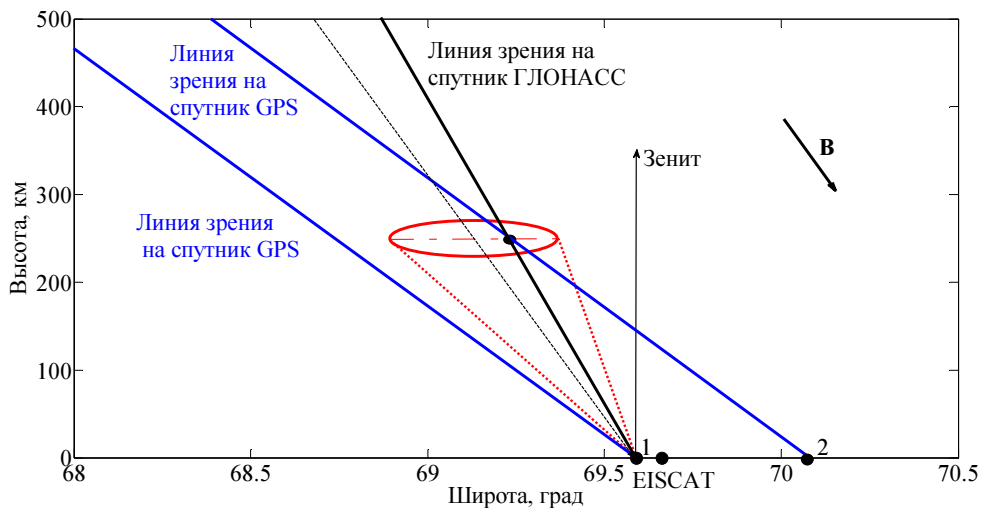


Рис. 1. Сравнение линий зрения на спутники ГНСС для приемников, установленных на ионосферном нагревном комплексе и в его окрестности
 Fig. 1. Comparison of lines of sight on the GNSS satellites for the receivers installed on the ionospheric heating complex and at its vicinity

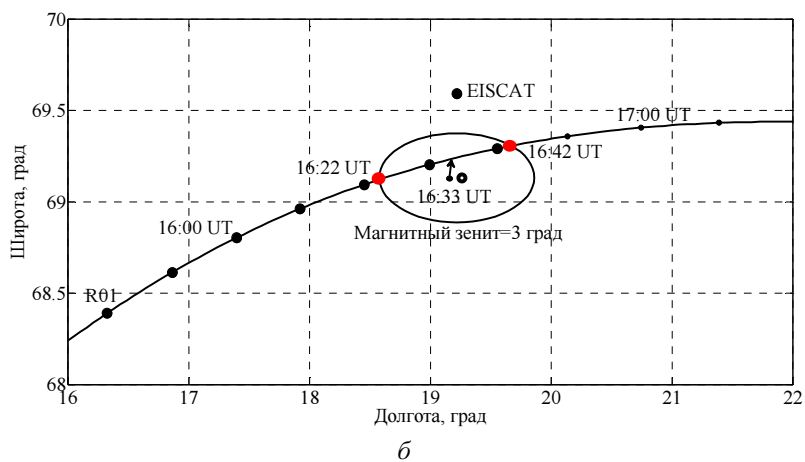
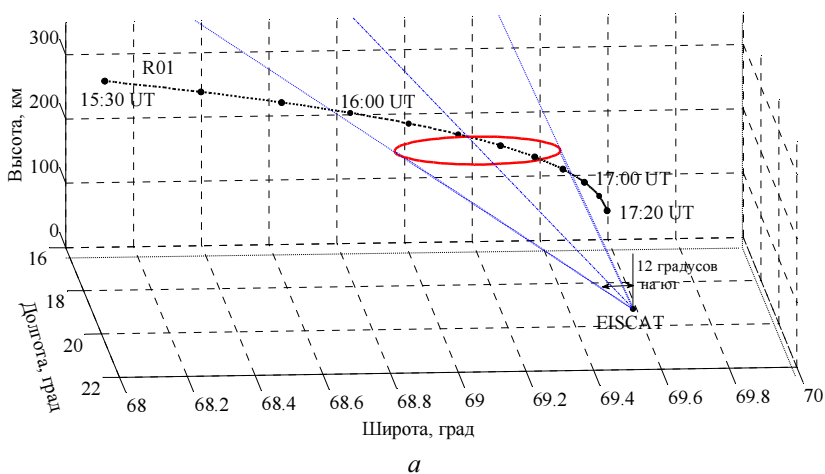


Рис. 2. Геометрия эксперимента 21 октября 2013 г.
 Fig. 2. Experiment geometry on 21 October, 2013

Результаты и обсуждение

На рис. 3, *а* показано наклонное полное электронное содержание, полученное по данным фазовых измерений сигналов спутника ГЛОНАСС R01 21 октября 2013 г. за весь пролет в зоне радиовидимости. На рисунке заштрихованный прямоугольник – время работы нагревного стенда, сплошные вертикальные линии показывают интервал времени, когда линия зрения на спутник проходила через область нагрева, пунктирная линия, проходящая в области нагрева, показывает время прохождения линии зрения на спутник вблизи магнитного зенита в 16:33 UT. На рис. 3, *б* показаны вариации полного электронного содержания, полученные по данным фазовых измерений сигналов спутника за время наблюдения 21 октября 2013 г. с 15:50 UT по 17:10 UT. Из данных убраны тренды, связанные с движением спутника и крупномасштабными изменениями ионосферы. Эти и представленные далее значения полного электронного содержания получены в приближении тонкого фазового экрана пересчетом на высоте 240 км наклонного полного электронного содержания в полное электронное содержание в вертикальном направлении.

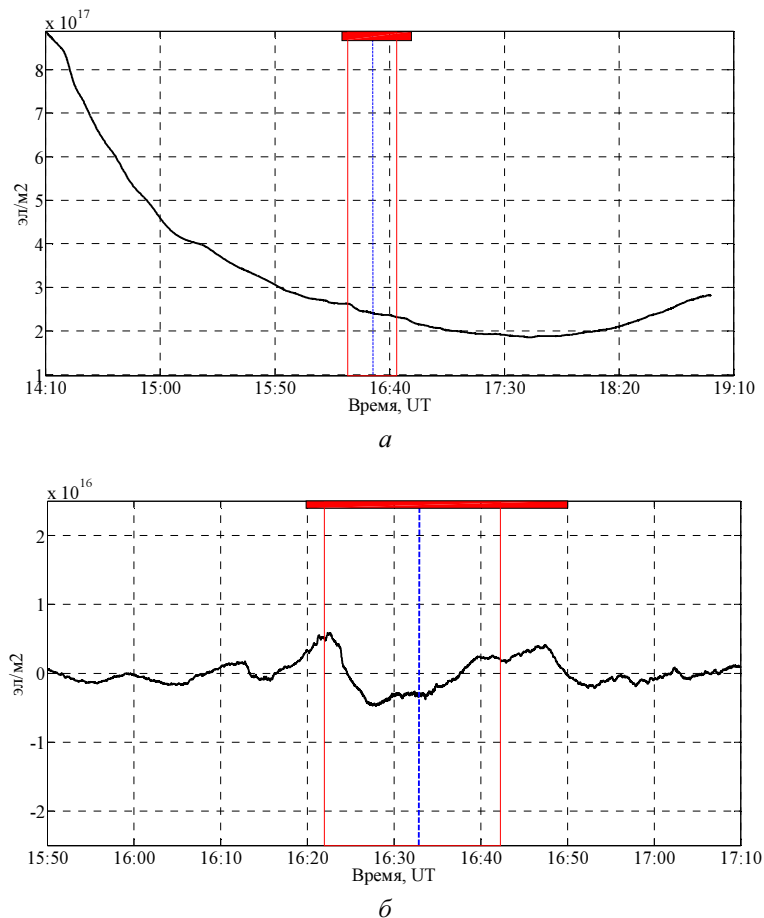


Рис. 3: *а* – наклонное полное электронное содержание, полученное по данным фазовых измерений сигналов спутника 21 октября 2013 г. за весь пролет спутника в зоне радиовидимости; *б* – вариации полного электронного содержания с 15:50 UT по 17:10 UT 21 октября 2013 г. по данным фазовых измерений сигналов спутника

Fig. 3: *а* – the slant total electron content received according to phase measurements of signals of the satellite on 21 October, 2013 during the satellite pass in the radio visibility zone; *б* – variations of total electron content from 15:50 UT till 17:10 UT on 21 October, 2013 according to phase measurements of the satellite signals

Начиная с 15:50 UT в данных спутника были зарегистрированы волнообразные изменения ТЕС с периодом около 11 минут (рис. 3, *б*). До начала режима непрерывного нагрева ионосферы с 16:20 UT до 16:50 UT нагревный комплекс работал в течение часа с 15:01 UT до 15:56 UT в режиме "10 мин – включено, 5 минут – выключено". Вероятно, его работа вызвала появление в ионосфере перемещающихся ионосферных неоднородностей с периодом, близким к периоду нагрева. Перемещение спутника в направлении к нагревной установке и одновременное перемещение ионосферных возмущений от области нагрева навстречу движению спутника вызвало уменьшение регистрируемого периода вариаций ТЕС. При наблюдениях с помощью спутниковых методов в средних широтах регистрировали аналогичные волнообразные ионосферные

изменения полного электронного содержания с периодами, близкими к периодам нагрева [3]. Таким образом, можно предположить, что зафиксированные вариации связаны с периодическим нагревом ионосферы комплексом EISCAT/Heating.

Из рис. 3, б видно, что нагрев ионосферы вызвал изменение ее структуры. На юго-западном краю после начала нагрева в 16:20 UT полное электронное содержание повышается в течение 2,5 мин, затем оно резко уменьшается на 1 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$), достигая минимального значения к 16:27 UT. После этого TEC снова увеличивается на 0,7 TECU и достигает к 16:40 UT максимума на северо-восточном краю зоны нагрева. Далее к 16:42 UT полное электронное содержание уменьшается на 0,1 TECU. В это время линия зрения на спутник выходит из области нагрева. Полное электронное содержание начинает увеличиваться, и в 16:47 UT фиксируется второй максимум. Нагрев ионосферы в это время продолжается. После этого полное электронное содержание начинает резко уменьшаться, хотя нагрев продолжается еще 3 минуты. 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 полного электронного содержания являются его уменьшение в центральной зоне диаграммы направленности антенны нагревного комплекса, т. е. в направлении магнитного зенита, и появление его повышенных значений на краях зоны нагрева. При этом наблюдается асимметрия профиля TEC – его минимальное значение сдвинуто относительно центра диаграммы направленности антенны в юго-западную сторону. В работе [3] также показано, что при прохождении спутниковых навигационных сигналов через область нагрева во время экспериментов по модификации ионосферы среднеширотным нагревным стендом "Сура" в 2009–2011 гг. нагревный эффект распределен по области нагрева неодинаково, при этом имеется анизотропия в распределении электронной концентрации в плоскости, перпендикулярной геомагнитному полю.

При проведении эксперимента состояние ионосферы контролировалось радаром некогерентного рассеяния. Луч радара следовал за спутником и раз в минуту проводил измерение электронной концентрации и температуры вдоль луча зрения на спутник. На рис. 4, а показано изменение профиля электронной концентрации $N_e(h)$, на рис. 4, б – электронной температуры $T_e(h)$, полученные радаром НР при сканировании ионосферы в направлении на спутник во время его пролета над областью нагрева ионосферы. Профили строились по высотам вдоль линии зрения на спутник. Это позволяет объяснить поведение температуры при перемещении луча зрения на спутник через область разогрева. В 16:19 UT температура показывает фоновое распределение по высоте в пределах от 1 100 до 1 500 К. В 16:20 UT начался нагрев ионосферы. Диаграмма направленности антенны нагревного стенда была направлена в магнитный зенит. Луч зрения "приемник – спутник" находился юго-западнее диаграммы направленности антенны. Тем не менее он пересекал диаграмму направленности нагревной антенны в ее нижней части. На профиле температуры 16:20 UT (рис. 4, б) видно повышение температуры в нижней части профиля, что говорит о повышении электронной температуры в области нагрева. По мере приближения спутника к центру области нагрева до 16:23 UT включительно профили температуры показывают постепенное повышение температуры на высотах 210–250 км (до 3 000–3 300 К) и при этом увеличение высоты области нагрева, что можно объяснить увеличением области пересечения луча зрения на спутник диаграммы направленности нагревной антенны по мере перемещения спутника по орбите. При этом на высотах выше 300 км температура оставалась фоновой. В 16:24 UT на высотах выше 300 км температура увеличилась скачком до 2 000–2 500 К и оставалась на этих высотах и в этих температурных пределах до 16:33 UT включительно. На высотах 210–250 км температура была максимальной и равна 3 000–3 300 К с 16:24 до 16:26 UT, а затем уменьшилась в 16:27 UT до 2 500–2 700 К. При этом максимум температуры поднялся на высоты 250–270 км. В 16:29 UT температура резко возросла до 3 700–4 000 К на высотах 245–260 км. В 16:34 UT температура скачком вернулась к фоновым значениям на высотах до 340 км, а в 16:35 UT – выше 340 км. Как видим, в области диаграммы направленности нагревной антенны электронная температура увеличивается относительно фоновой температуры (1 100–1 500 К) до 3 000–3 300 К на высотах 210–250 км (ниже области отражения радиоволны). При приближении к магнитному зениту температура уменьшается до 2 500–2 700 К, но при этом происходит увеличение высоты максимума температуры до 250–270 км. В узкой области около магнитного зенита происходит резкое увеличение электронной температуры до 3 700–4 000 К (в 2,5–3 раза относительно фоновой), при этом высота максимума области нагрева уменьшается приблизительно на 10 км. При прохождении линии зрения на спутник на северо-восток от магнитного зенита наблюдается резкий спад температуры до фонового уровня. Последующие температурные профили вдоль пролета спутника также имеют фоновый характер. Эффект повышения температуры в зоне нагрева наблюдался ранее при нагреве ионосферы вдоль магнитного зенита коротковолновым излучением О-поляризации нагревной установки [9]. Зафиксировано значительное увеличение электронной температуры в области нагрева, при этом отмечено, что максимальное увеличение электронной температуры наблюдалось в области 6–8°, центрированной относительно направления магнитного поля. В нашем эксперименте подтверждаются эти выводы. Мы также получили эффект увеличения температуры в зоне диаграммы направленности нагревной антенны и еще более значительное и резкое увеличение температуры в центре нагрева (до 3–4° от магнитного зенита). Однако нами отмечается особенность распределения температуры в области нагрева, связанная

с уменьшением температуры перед областью резкого увеличения температуры в направлении магнитного зенита.

Профили электронной концентрации (рис. 4, *а*) до 16:27 UT имели фоновый характер. В 16:28 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 скачком в 16:29 UT максимум концентрации электронов увеличился и до 16:33 UT был в три–пять раз больше фонового значения. В 16:34 UT электронная концентрация скачком уменьшилась до фоновой.

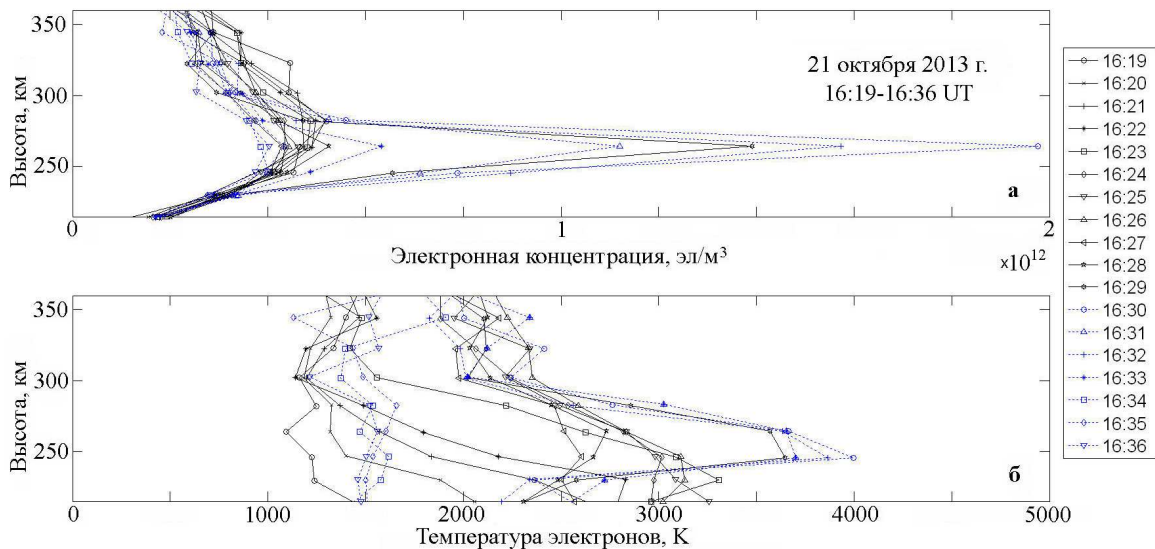


Рис. 4: *а* – профили электронной концентрации; *б* – профили электронной температуры, полученные радаром некогерентного рассеяния при сканировании ионосферы в направлении на спутник во время эксперимента по искусственному нагреву ионосферы

Fig. 4: *a* – the profiles of electron concentration; *b* – the profiles of electron temperature received by the incoherent scattering radar when scanning the ionosphere in the direction on the satellite during the experiment on artificial heating of the ionosphere

В эксперименте получено существенное (2,5–4 раза) увеличение величины электронной концентрации в области максимума F-слоя вблизи центральной зоны нагрева. В то же время в этой области электронная температура повысилась относительно фоновой температуры в 2,5–3 раза до 3 700–4 000 К. Область повышения электронной концентрации по высоте занимает область около 60 км, от 220 км до 280 км. Область максимального изменения температуры несколько шире – 80 км, от 220 км до 300 км. Таким образом, при нагреве ионосферы O-поляризацией вдоль направления на магнитный зенит максимальные изменения электронной температуры и электронной плотности происходили в узкой высотной области вблизи магнитного зенита. Максимум изменения электронной концентрации в основном соответствует максимуму изменения электронной температуры, но при этом верхняя граница области значительного изменения электронной температуры выше на 20 км. В период наблюдения максимум электронной концентрации ионосферы над дайнозондом находился на высотах 230–250 км. Наиболее вероятным механизмом возрастания N_e на высотах выше уровня отражения нагревной волны является генерация потока ускоренных электронов в поле мощной КВ-радиоволны O-поляризации, способных вызвать увеличение электронной концентрации на высотах выше уровня отражения мощного КВ-радиосигнала [10].

Для времени наблюдения сигналов спутника было рассчитано полное электронное содержание из профилей электронной концентрации по данным радара некогерентного рассеяния (рис. 5). Расчет ТЕС проводился по профилям для высот от 100 до 600 км. На рисунке видно, что с началом нагрева полное электронное содержание, полученное радаром, уменьшается, а затем резко увеличивается при приближении луча радара к магнитному зениту. При прохождении зенита оно резко уменьшается до фоновых значений.

Н. Ф. Благовещенской [11] были рассмотрены эксперименты, которые позволили сравнить эффекты нагрева при различных отношениях частоты нагрева и критической частоты. В этой работе представляет интерес описание нагрева 3 ноября 2013 г., т. е. через несколько дней после рассматриваемого эксперимента. В период нагрева 3 ноября мощная КВ-радиоволна O-поляризации излучалась также на частоте 6,2 МГц в направлении магнитного зенита. С 15:30 до 17:00 UT частота нагрева лежала ниже или вблизи критической частоты foF2 ($f_H/foF2 = 0,92–1,05$). Было показано, что в этих условиях возможно возбуждение эффектов при O-нагреве. Для частоты нагрева 6,2 МГц значение 1,05 соответствует 5,9 МГц критической частоты. На рис. 5 видно увеличение ТЕС в районе магнитного зенита и уменьшение его до "фоновых" после

16:33 UT. Это может говорить о том, что до этого времени работал механизм нагрева, описанный Н. Ф. Благовещенской, а после 16:33 UT, когда критическая частота стала меньше 5,9 МГц, нагревная волна проходила через ионосферу, не оказывая на нее существенного влияния.

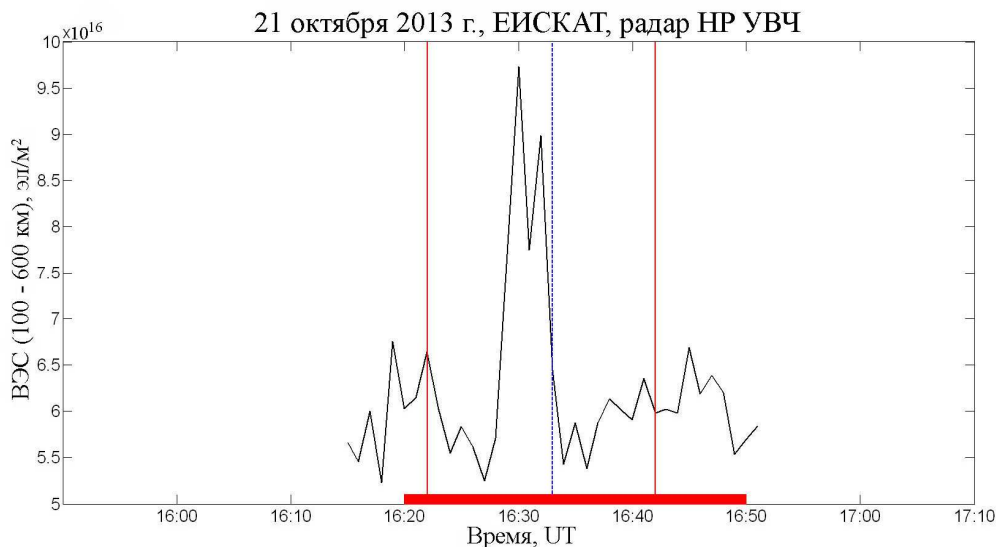


Рис. 5. Полное электронное содержание вдоль луча зрения на спутник от 100 до 600 км, полученное радаром некогерентного рассеяния

Fig. 5. The total electron content along the line of sight on the satellite from 100 to 600 km received by the incoherent scattering radar

На рис. 6 приведены полное электронное содержание от 100 до 600 км (рис. 6, а), значения максимальной температуры (рис. 6, б) и высота максимума температуры (рис. 6, в), полученные по данным зондирования радара НР. Внизу графиков нанесено время, слева – величина и ее единицы измерения. Сравнение рис. 6, а и 6, б показывает, что изменение ТЕС и максимальной температуры в зоне нагрева находятся в фазе. Сравнение рис. 6, б и 6, в – изменение максимума температуры находится в противофазе с высотой максимума.

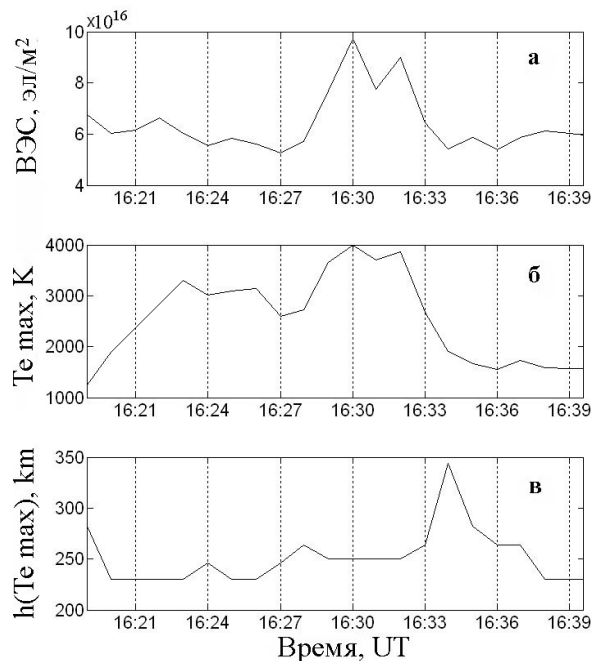


Рис. 6. Поведение полного электронного содержания (а), максимальной электронной температуры (б) и высоты максимальной электронной температуры (в) по данным радара некогерентного рассеяния

Fig. 6. Behavior of the total electron content (а), the maximum electron temperature (б) and the height of the maximum electron temperature (в) according to the data of the incoherent scattering radar

Для удобства сравнения на рис. 7 приведены профили ТЕС (рис. 3, б), полученного по данным спутника (прерывистая линия), и полное электронное содержание (рис. 5), полученного по данным радара НР для высот от 100 до 600 км (сплошная линия). Как видно, в общих чертах поведение полного электронного содержания на краях совпадает, кроме центральной части рисунка. Полное электронное содержание, полученное по данным радара, показывает повышение на $5 \cdot 10^{16}$ эл/м², а полученное по данным спутника – лишь небольшое изменение величины. Отсутствие увеличения полного электронного содержания может быть вызвано уходом электронов из области выше области нагрева. Другой причиной несоответствия результатов измерений, полученных методом некогерентного рассеяния и по данным спутника, может быть влияние когерентной составляющей в мощности принимаемого сигнала, обусловленной неоднородностями электронной концентрации в области разогрева, из которой определяется электронная концентрация [12].

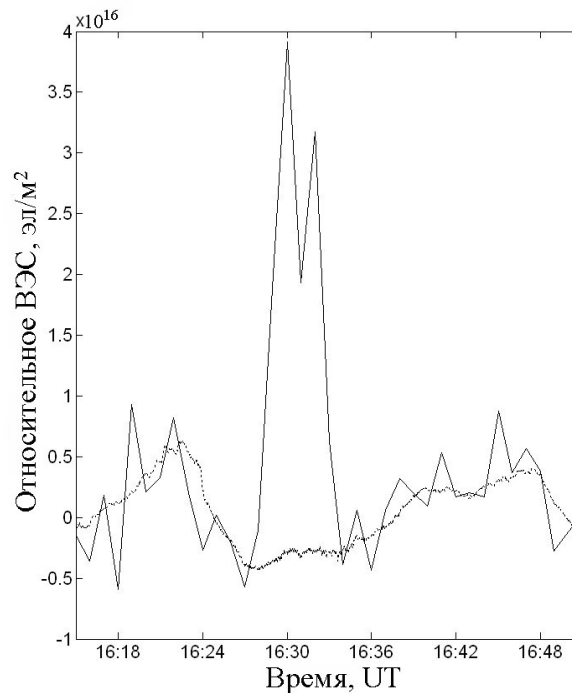


Рис. 7. Сравнительное поведение ТЕС радара и спутника
Fig. 7. Comparative behavior of TEC of the radar and the satellite

Заключение

Во время нагрева ионосферы мощной КВ-радиоволной ее структура приобретает неоднородный характер. Работа нагревного комплекса с периодом "10 минут – включено, 5 минут – выключено" вызывает появление волнообразных вариаций ТЕС с периодом, близким к периоду нагрева ионосферы. Основными особенностями поведения полного электронного содержания при непрерывном нагреве ионосферы в течение 30 минут в направлении магнитного зенита по данным спутника явились его уменьшение в центральной зоне диаграммы направленности нагревной антенны, т. е. в направлении магнитного зенита, и присутствие его повышенных значений на краях зоны нагрева. При этом наблюдается асимметрия профиля ТЕС – его минимум сдвинут к юго-западу относительно центра диаграммы направленности антенны.

По данным радара некогерентного рассеяния, во время нагрева ионосферы мощной КВ-радиоволной вдоль направления магнитного зенита формируется область повышенной электронной температуры и электронной концентрации. Во время непрерывного нагрева ионосферы в зоне нагрева формируются три температурные области, резко отличающиеся по значению температуры и высоте максимума температуры: а) на краю нагревной зоны область с температурой 3 000–3 300 К и максимумом на высотах 210–250 км; б) в средней части пониженная температура 2 500–2 700 К с максимумом на высотах 250–270 км; в) центральная область в направлении магнитного зенита с максимальными температурами 3 700–4 000 К (увеличение в 2,5–3 раза относительно фоновой) на высотах 245–260 км. Профили электронной концентрации при сканировании области нагрева соответствовали фоновым значениям, кроме области максимальных электронных температур, т. е. вблизи магнитного зенита, где они показали резкое увеличение электронной концентрации. Максимальным температурам соответствуют профили с максимальным увеличением электронной концентрации в 2,5–4 раза от $0,5 \cdot 10^{12}$ эл/м³ до $(1,2-2,0) \cdot 10^{12}$ эл/м³.

В области нагрева, по данным радара некогерентного рассеяния, поведение ТЕС соответствует поведению максимальной электронной температуры, а ход высоты максимума электронной температуры находится в противофазе: увеличение температуры приводит к уменьшению высоты максимума температуры.

Поведение полного электронного содержания по данным спутника и радара HP во многом соответствует друг другу, кроме области в направлении на магнитный зенит. Полное электронное содержание, полученное по данным радара, показывает резкое увеличение значения до $4 \cdot 10^{16}$ эл/м² юго-западнее центра диаграммы направленности. Эта область повышенного ТЕС соответствует области повышенной электронной температуры и электронной концентрации вблизи магнитного зенита. В данных спутника в этом направлении зафиксировано лишь небольшое изменение. Это несоответствие можно объяснить выносом электронов из области наблюдения спутника выше области нагрева. Другой причиной несоответствия результатов измерений, полученных методом некогерентного рассеяния и по данным спутника, может быть влияние когерентной составляющей в мощности принимаемого сигнала, обусловленной неоднородностями электронной концентрации в области разогрева, из 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 КВ-радиоволной удобно использовать спутники ГЛОНАСС, параметры орбит которых позволяют исследовать изменения полного электронного содержания в направлении вдоль геомагнитной силовой линии в месте наблюдения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Научной ассоциации ЕИСКАТ за бесплатное выделение рабочих часов нагревного комплекса EISCAT/Heating и радара некогерентного рассеяния УВЧ. Работа получила поддержку Научной ассоциации ЕИСКАТ в рамках программы "EISCAT Peer-reviewed Program Experiments".

Библиографический список

1. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Rietveld M. T., Brekke A. Spatial structure of auroral daytime ionospheric electron density irregularities generated by a powerful HF-wave // *Annales Geophysicae*. 1998. V. 16, Iss. 7. P. 812–820. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00585-998-0812-4>.
2. Фролов В. Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ-радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований // *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 2. С. 22–48. DOI: 10.12737/10383.
3. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., Komrakov G. P., Nazarenko M. O. [et al.]. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigational satellite radio transmissions // *Radio Science*. 2012. V. 47. RS0L15. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011RS004957>.
4. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., Zybin K. P., Frolov V. L. [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*. 2004. V. 325, Iss. 5–6. P. 381–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.03.055>.
5. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е., Падохин А. М., Васильев А. В. [и др.]. Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда Сура ионосферы сигналами навигационных спутников системы GPS // *Известия вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 7. С. 421–444.
6. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., Kurbatov G. A., Frolov V. L. [et al.]. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF-heating // *Advances in Space Research*. 2011. V. 47, Iss. 10. P. 1743–1749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.031>.
7. Ryabov A. V., Grach S. M., Shindin A. V., Kotik D. S. Studying characteristics of the large-scale ionospheric irregularities induced by high-power HF radio emission with GPS diagnosis // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011. V. 54, Iss. 7. P. 441–451.
8. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Andreeva E. S., Frolov V. L., Komrakov G. P. [et al.]. GPS-TEC variations, generated in midlatitude and highlatitude ionosphere by powerful HF-heating // *Proceedings of the XXXth International Union of Radio Science General Assembly, 13–20 August 2011, Istanbul* : URSI, 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6051133.
9. Иванова И. М., Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Yeoman T., Rietveld M. Пространственная структура искусственно возмущенной F-области ионосферы // *Physics of Auroral Phenomena : Proceedings of the XXXIV Annual Seminar. Apatity, 1–4 March 2011. Apatity* : KSC RAS, 2011. P. 154–157.
10. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.
11. Благовещенская Н. Ф. Модификация высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating // *Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского*. 2016. Т. 653. С. 56–62.
12. Lockwood M., Suvanto K., St.-Maurice J.-P., Kikuchi K., Bromage B. J. I. [et al.]. Scattered power from non-thermal, F-region plasma observed by EISCAT – evidence for coherent echoes? // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1988. V. 50, Iss. 4–5. P. 467–485. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(88\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(88)90029-3).

References

1. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Rietveld M. T., Brekke A. Spatial structure of auroral day-time ionospheric electron density irregularities generated by a powerful HF-wave // *Annales Geophysicae*. 1998. V. 16, Iss. 7. P. 812–820. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00585-998-0812-4>.
2. Frolov V. L. Prostranstvennaya struktura vozmuscheniy plotnosti plazmy, indutsiruemykh v ionosfere pri ee modifikatsii moschnymi KV-radiovolnami : obzor rezultatov eksperimentalnykh issledovaniy [Spatial structure of the plasma density disturbances induced in the ionosphere during its modification by powerful SW radio waves : review of experimental research results] // *Solnechno-zemnaya fizika*. 2015. V. 1, N 2. P. 22–48. DOI: 10.12737/10383.
3. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., Komrakov G. P., Nazarenko M. O. [et al.]. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigational satellite radio transmissions // *Radio Science*. 2012. V. 47. RS0L15. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011RS004957>.
4. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., Zybin K. P., Frolov V. L. [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*. 2004. V. 325, Iss. 5–6. P. 381–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.03.055>.
5. Frolov V. L., Komrakov G. P., Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasilev A. V. [i dr.]. Zondirovanie vozmuschennoy izlucheniem nagrevnogo stenda Sura ionosfery signalami navigatsionnykh sputnikov sistemy GPS [Sounding of the ionosphere disturbed by the "Sura" heating facility radiation using signals of the GPS satellites] // *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 2010. V. 53, N 7. P. 421–444.
6. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., Kurbatov G. A., Frolov V. L. [et al.]. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF-heating // *Advances in Space Research*. 2011. V. 47, Iss. 10. P. 1743–1749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.031>.
7. Ryabov A. V., Grach S. M., Shindin A. V., Kotik D. S. Studying characteristics of the large-scale ionospheric irregularities induced by high-power HF radio emission with GPS diagnosis // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011. V. 54, Iss. 7. P. 441–451.
8. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Andreeva E. S., Frolov V. L., Komrakov G. P. [et al.]. GPS-TEC variations, generated in midlatitude and highlatitude ionosphere by powerful HF-heating // *Proceedings of the XXXth International Union of Radio Science General Assembly, 13–20 August 2011, Istanbul : URSI, 2011*. P. 1–4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6051133.
9. Ivanova I. M., Blagoveschenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T., Rietveld M. Prostranstvennaya struktura iskusstvenno vozmuschennoy F-oblasti ionosfery [Spatial structure of the artificial disturbed F-region of the ionosphere] // *Physics of Auroral Phenomena : Proceedings of the XXXIV Annual Seminar. Apatity, 1–4 March 2011. Apatity : KSC RAS, 2011*. P. 154–157.
10. Gurevich A. V. Nelineynye yavleniya v ionosfere [Nonlinear effects in the ionosphere] // *Uspehi fizicheskikh nauk*. 2007. V. 177, N 11. P. 1145–1177.
11. Blagoveschenskaya N. F. Modifikatsiya vysokoshirotnoy ionosfery moschnym KV radioizlucheniem nagrevnogo kompleksa EISCAT/Heating [Modification of the high-latitude ionosphere by powerful HF radio emission from the heating complex EISCAT/Heating] // *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A. F. Mozhayskogo*. 2016. V. 653. P. 56–62.
12. Lockwood M., Suvanto K., St.-Maurice J.-P., Kikuchi K., Bromage B. J. I. [et al.]. Scattered power from non-thermal, F-region plasma observed by EISCAT – evidence for coherent echoes? // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1988. V. 50, Iss. 4–5. P. 467–485. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(88\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(88)90029-3).

Сведения об авторах

Терешенко Евгений Дмитриевич – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010; Полярный геофизический институт, д-р физ.-мат. наук, науч. руководитель института; e-mail: evgter@pgi.ru

Tereshchenko E. D. – 15, Khalturina Str., Murmansk, Russia, 183010; Polar Geophysical Institute, Dr of Phys.-Math. Sci., Scientific Leader of the Institute; e-mail: evgter@pgi.ru

Миличенко Александр Николаевич – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010; Полярный геофизический институт, заместитель директора; e-mail: alexander@pgi.ru

Milichenko A. N. – Khalturina Str., 15, Murmansk, Russia, 183010; Polar Geophysical Institute, Deputy Director; e-mail: alexander@pgi.ru

Ритвельд Майк – Ramfjærdmoen, N-9027 Ramfjærdbø, Tromsø, Norway; European Scientific Association on Incoherent Scatter, PhD, Heating Senior Scientist; e-mail: mike.rietveld@eiscat.uit.no

Rietveld Mike – Ramfjordmoen, N-9027 Ramfjordbø, Tromsø, Norway; The European Incoherent Scatter Scientific Association, PhD, Heating Senior Scientist; e-mail: mike.rietveld@eiscat.uit.no

Черняков Сергей Михайлович – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010; Полярный геофизический институт, науч. сотрудник; e-mail: sergeich@pgi.ru

Chernyakov S. M. – 15, Khalturina Str., Murmansk, Russia, 183010; Polar Geophysical Institute, Researcher; e-mail: sergeich@pgi.ru

Швец Михаил Васильевич – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010; Полярный геофизический институт, ст. инженер; e-mail: shvec@pgi.ru

Shvets M. V. – 15, Khalturina Str., Murmansk, Russia, 183010; Polar Geophysical Institute, Senior Engineer; e-mail: shvec@pgi.ru

E. D. Tereshchenko, A. N. Milichenko, M. T. Rietveld,
S. M. Chernyakov, M. V. Shvets

**Change of the high-latitude ionosphere during heating by
a powerful short radio wave of the EISCAT/Heating complex
according to signals of the GLONASS satellite
and the incoherent scattering radar**

Results of observations of variations of temperature, electron concentration and total electron content of the high-latitude region of the ionosphere during its modification by powerful short radio waves of the heating complex EISCAT/Heating (Tromsø, Norway) according to signals of the GLONASS satellites and the incoherent scattering UHF EISCAT radar (Tromsø, Norway) have been provided. The geometry of passes of the GLONASS and GPS satellites for operating conditions of the heating complex in Tromsø has been considered. It has been shown that during the experiments on the EISCAT/Heating complex for the study of the modified structure of the high-latitude ionosphere it is more convenient to use the GLONASS satellites. Parameters of orbits of these satellites allow researching changes of total electron content in the direction along the geomagnetic field line at the place of observation. It has been shown that during heating of the ionosphere by powerful short radio waves its structure is becoming an irregular one. Operation of the heating complex in the mode "switched on – switched off" has caused appearance of wavy variations of total electron content with the periods close to the heating period. The main features of behavior of the total electron content in the case of the continuous heating of the ionosphere in the direction of the magnetic zenith according to the GLONASS satellite are: reduction of total electron content in the central zone of the antenna diagram, i. e. in the direction of the magnetic zenith, and presence of the increased values of total electron content at the edges of the heating zone. According to the incoherent scattering radar the heating of the ionosphere by the powerful short radio wave has created the region of the increased electron temperature and electron concentration along the direction of the magnetic zenith. The behavior of total electron content according to the GLONASS satellite and the radar of incoherent scattering in many respects corresponds each other except the central part. Reasons of the mismatches have been considered.

Key words: high-latitude ionosphere, EISCAT, GLONASS, total electron content.