

УДК 537.877:519.6

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ШИРОТ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОСТОЯНИИ ИОНОСФЕРЫ НА ЧАСТОТАХ СИСТЕМЫ ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ “БЕТА”

© 2021 г. О. И. Ахметов^{1, *}, И. В. Мингалев^{1, 2}, О. В. Мингалев^{1, 2},
В. Б. Белыховский¹, З. В. Суворова¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Мурманский арктический государственный университет”, филиал в г. Апатиты, Апатиты, Россия

*E-mail: akhmetov@pgia.ru

Поступила в редакцию 28.09.2020 г.

После доработки 19.10.2020 г.

Принята к публикации 28.10.2020 г.

Рассмотрены ионосферные возмущения, вызванные приходом межпланетной ударной волны 24 января 2012 г., а также последующей суббури. Проведен анализ с целью выяснить, как изменения вертикального профиля концентрации электронов влияют на амплитудные и фазовые характеристики сигналов, измеряемых у поверхности Земли на несущих частотах сети передатчиков системы точного времени “Бета”.

DOI: 10.31857/S0367676521020034

ВВЕДЕНИЕ

Высыпания в ионосферу заряженных частиц в широком диапазоне энергий во время суббури приводят к увеличению концентрации электронов в ионосфере в области высыпаний, что, в свою очередь, вызывает существенное понижение верхней границы волновода между литосферой и ионосферой, в котором распространяются волны ОНЧ диапазона. Это понижение приводит к искажению принимаемого радиосигнала. По этой причине представляется актуальным с помощью численного моделирования определить изменения амплитудных и фазовых характеристик волн ОНЧ диапазона, возбуждаемых наземным передатчиком и распространяющихся в авроральной области во время геомагнитной суббури или прихода межпланетной ударной волны (МУВ) к магнитосфере по сравнению со спокойными условиями.

Известно, что приход МУВ к магнитосфере вызывает сжатие магнитосферы и событие storm sudden commencement (SSC), предупреждающее о начале геомагнитной бури [1], или sudden impulse (SI). С появлением SSC связан целый комплекс геофизических явлений, таких как: появление геомагнитных пульсаций различных расточных диапазонов (Pc1, Pc3–5), резкое возрастание уровня ОНЧ-шумов [2], высыпание заряженных частиц различных энергий в атмосферу Земли,

которое вызывает полярные сияния во время SSC [3, 4].

Экспериментальные исследования параметров сигналов ОНЧ диапазона на поверхности Земли во время различных гелиогеофизических явлений проводятся коллективами авторов [5, 6]. В этих работах авторы анализируют амплитудные и фазовые характеристики сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 “Альфа” для магнитного и электрического поля совместно с другими данными о состоянии ионосферы. Было показано заметное влияние состояния ионосферы на амплитудные и фазовые характеристики сигналов РСДН-20 “Альфа” на удалении от источника порядка 600–1000 км. Влияние на сигналы других, постоянно действующих, источников ОНЧ в рассмотренных работах не исследовалось.

Помимо системы РСДН-20 “Альфа” в диапазоне ОНЧ постоянно действуют передатчики сети точного времени “Бета”. Для передачи эталонных сигналов Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли использует разветвленную сеть средств передачи, работающих в различных частотных диапазонах [7]. Сеть радиостанций создает значительную область в волноводе Земля–ионосфера, заполненную периодическими сигналами посто-

янной амплитуды с несущими частотами 20 500, 23 000 и 25 100 Гц.

Авторы полагают, что исследование влияния состояния ионосферы на амплитудные и фазовые характеристики сигналов передатчиков сети “Бета” при помощи численных методов поможет в интерпретации результатов наземных наблюдений, подобной проведенной в работах [5, 6]. Также это исследование поможет оценить возможность использования сигналов сети точного времени “Бета” для оценки состояния D и E слоя ионосферы по результатам регистрации ОНЧ сигналов.

В данной работе авторы провели численное моделирование распространения электромагнитных волн ОНЧ диапазона в прямоугольном участке волновода Земля-ионосфера для десяти вариантов распределений концентрации электронов в ионосфере и распределений частоты столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами. Все распределения являются горизонтально однородными и задаются вертикальными профилями. Вычислительные эксперименты распределены на две серии по пять для случаев прихода МУВ и суббури. Первый вертикальный профиль концентрации электронов в каждой серии вычислительных экспериментов соответствует условиям сильных высыпаний частиц в ионосферу в районе г. Тромсе во время прихода МУВ или суббури. Пятый вертикальный профиль концентрации электронов каждой серии вычислительных экспериментов соответствует спокойному состоянию ионосферы в районе г. Тромсе, а профили со второго по четвертый соответствуют переходным условиям.

ОБЛАСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСТОЧНИК СИГНАЛА

В качестве области моделирования для численных экспериментов авторы использовали прямоугольный участок волновода Земля-ионосфера. Горизонтальный размер участка составлял 128×400 км, по высоте в атмосфере и ионосфере — 200 км, в глубину в литосфере — 25 км. Шаг сетки над поверхностью Земли — 500 м во всех направлениях, по вертикали в литосфере — 250 м.

Источник сигнала был задан на одной из двух наименьших сторон области моделирования следующим образом. На этой стороне в узлах сетки, расположенных выше поверхности Земли и ниже верхнего поглощающего слоя, было задано горизонтальное магнитное поле в виде суммы гармонических колебаний на частотах радиотехнической сети передатчиков сигнала точного времени “Бета”, а именно 20 500, 23 000 и 25 100 Гц. Такой способ задает на части грани прямоугольной области моделирования плоские фронты волн.

Численное моделирование показало, что при распространении этих волн внутрь области моделирования их фронты искажаются, и из них выделяются моды, которые хорошо распространяются в волноводе между литосферой и ионосферой. При этом на расстоянии более 10 длин волн от границы, на которой задан источник, в сигнале остаются только те моды, которые могут распространяться в волноводе.

Для всех внешних сторон области моделирования, кроме стороны источника, использовалось условие свободного ухода волны вместе с адаптированными поглощающими слоями PML и профилем потерь Беренгера [8], аналогично тому, как это было реализовано в работе [9]. Это позволило снизить уровень отражений сигналов от границ области до 0.1%.

ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ, ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА

При численном моделировании распределения концентрации электронов и частоты их столкновений с нейтралами и ионами считались горизонтально однородными. Вертикальные профили концентрации электронов над поверхностью Земли были заданы с использованием данных радара некогерентного рассеивания VHF EISCAT, расположенного вблизи г. Тромсе (CGM lat. = 66.64° , CGM lon. = 102.9°), Норвегия, и двухпараметрической модели ионосферы Уайта [10] по формуле:

$$N_e(h) = 1.43 \cdot 10^7 e^{(-0.15h')} e^{[(\beta-0.15)(h-h')]} \quad (1)$$

где h' и β — два параметра в км и км^{-1} , обозначающих высоту D-слоя и резкость ионосферного перехода соответственно. Параметр β был выбран равным 0.2, а высота h' подбиралась для каждого профиля таким образом, чтобы он соединялся с профилем EISCAT. Геомагнитное поле бралось вертикальным, направленным к поверхности Земли и равным $5.3 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Во время события 24 января 2012 г. SSC импульс, вызванный приходом к магнитосфере межпланетной ударной волны, был зарегистрирован около 15.00 UT по вариациям SYM-H индекса. После SSC импульса наблюдалась геомагнитная буря 24–25 января 2012 г. ($D_{st} = -71$ нТл). SSC импульс вызвал увеличение суббуревой активности ($AE \sim 800$ нТл). SSC импульс сопровождался резким увеличением поглощения космического радиоизлучения (до 3 дБ) по данным рiomетра на станции АВК, расположенной вблизи от станции TRO, что говорит о высыпании заряженных частиц с энергией около 30 кэВ в ионосферу.

По данным радара VHF EISCAT в районе г. Тромсе в момент SSC импульса на высотах около 100 км в E-слое ионосферы наблюдался резкий рост

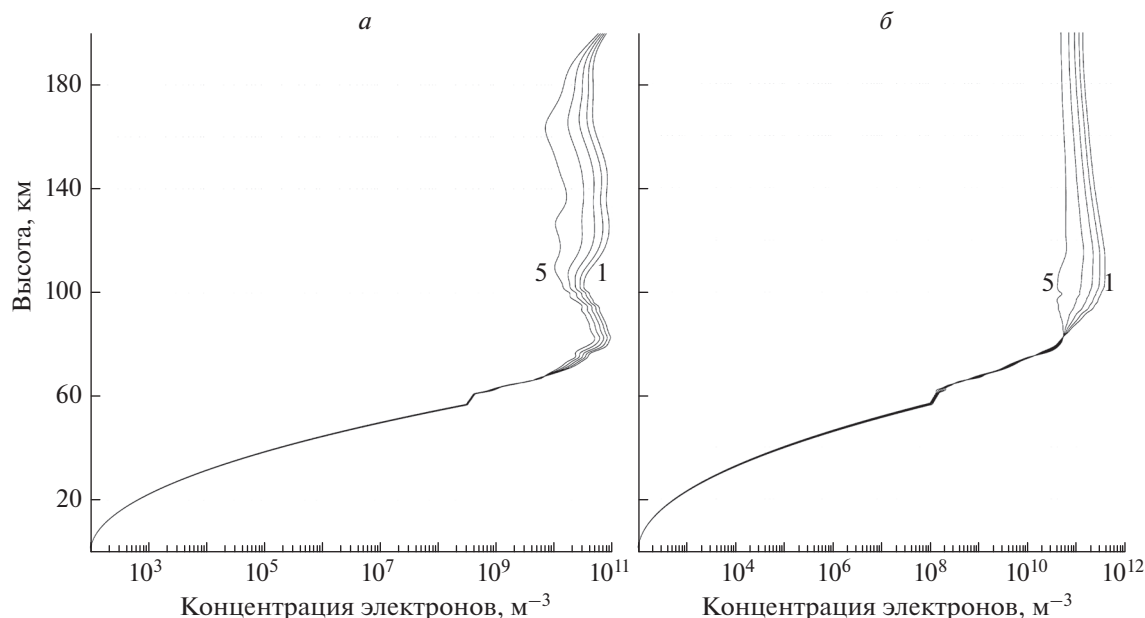


Рис. 1. Вертикальные профили концентрации электронов 24.01.2012 г. для различных геофизических условий: для условий прихода межпланетной ударной волны (МУВ) профиль, отмеченный цифрой 1, соответствует приходу МУВ в момент UT = 15:06, профиль, отмеченный цифрой 5, соответствует спокойным условиям (а); для условий суббури профиль, отмеченный цифрой 1, соответствует суббуре в момент UT = 22:00, профиль, отмеченный цифрой 5, соответствует спокойным условиям (б).

концентрации ионосферной плазмы более чем на порядок.

Для задания вертикального профиля концентрации электронов использовались данные радара VHF EISCAT в момент времени 24.01.2012 г. 15:06 UT для условий прихода МУВ, 22:00 UT для условий суббури, для спокойных условий использовались данные за полчаса до всплеска электронной концентрации, вызванного вторжением авроральных и энергичных заряженных частиц в ионосферу Земли.

На рис. 1а представлены пять вертикальных профилей концентрации электронов, использованных в численных экспериментах. Первый профиль соответствует описанным выше условиям прихода МУВ. Пятый профиль соответствует спокойным условиям. Профили со второго по четвертый соответствуют переходным условиям от возмущенного состояния ионосферы к спокойному. Эти профили были получены линейной интерполяцией между профилями 1 и 5. Аналогичным образом получены профили концентрации электронов для условий суббури, представленные на рис. 1б.

Частота столкновений с нейтрами для соответствующих профилей электронной концентрации рассчитывалась с помощью данных EISCAT, данных модели NRLMSISE-00 и аналитической аппроксимации результатов измерений, представленной в работе [10] по формуле:

$$v_e(h) = 1.816 \cdot 10^{11} e^{(-0.15h)}, \quad (2)$$

где h обозначает высоту в км.

Профиль проводимости литосферы был задан с учетом результатов исследований проводимости земных пород на Кольском полуострове, полученных несколькими научными группами и опубликованных в работе [11], по формуле:

$$\sigma_L(z) = 2 \cdot 10^5 \cdot 10^{(-z-0.22222...)}, \quad (3)$$

где z обозначает глубину в км.

В данной работе использовалась модель распространения электромагнитных сигналов в волноводе Земля–ионосфера, основанная на численном интегрировании по времени системы уравнений Максвелла и уравнения для плотности тока с учетом инерции электронов в ионосфере на регулярной пространственной сетке. Различные модификации этой модели также использовались в работах [8, 12]. Детальное описание разработанной авторами численной схемы представлено в работе [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Межпланетная ударная волна 15:06 UT

На рис. 2а и 2б изображены отношения амплитуды сигналов на расстоянии 200 км от источника в экспериментах, моделирующих распространение волн с частотами из набора, используемого системой “Бета”, во время SSC импульса разной интенсивности, вызванного взаимодействием с магнитосферой МУВ к амплитуде сигналов, рас-

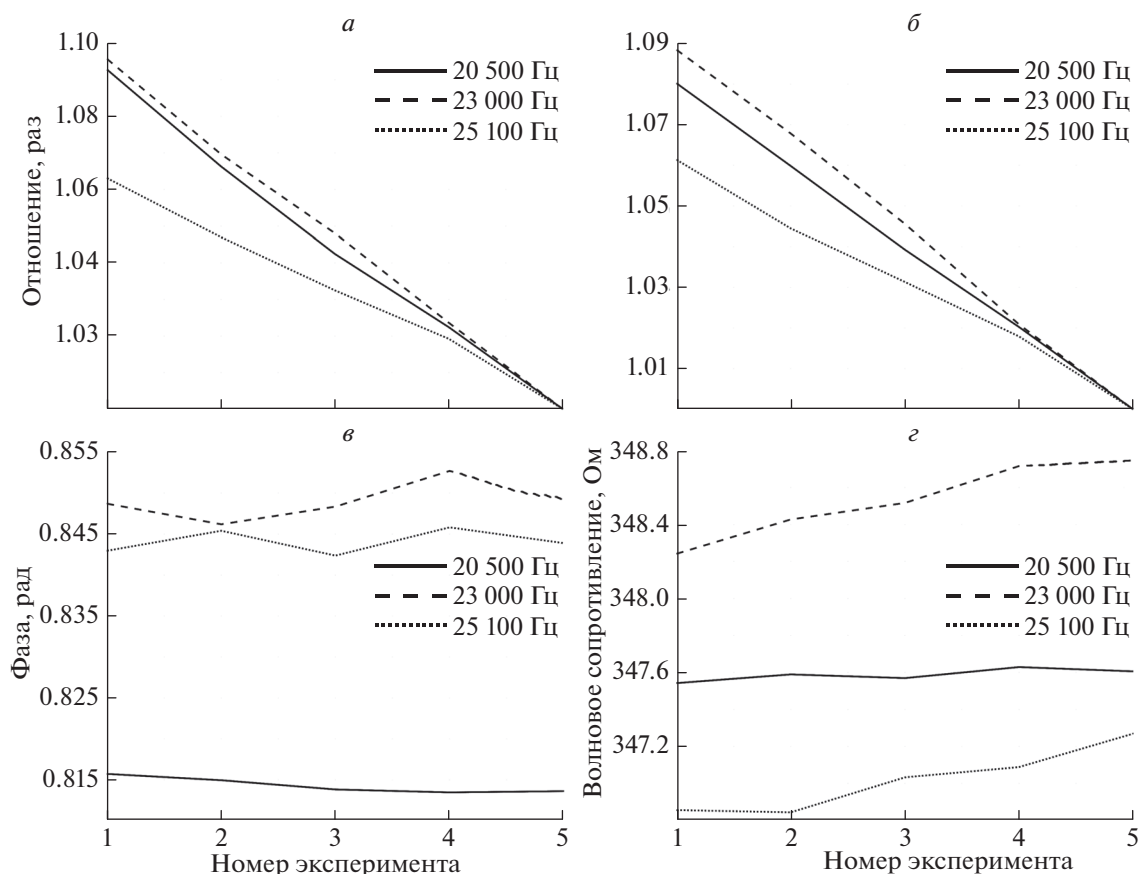


Рис. 2. Отношения амплитуд компоненты E_z электрического поля на поверхности Земли на расстоянии 200 км от источника, полученные в разных вычислительных экспериментах во время прихода МУВ, к амплитуде компоненты E_z в той же точке, полученной в вычислительном эксперименте 5, который соответствует спокойным условиям (*a*); отношения амплитуд компоненты H_x магнитного поля (*б*); разность фаз между основными компонентами напряженности поля E и H на расстоянии 250 км от источника (*в*); волновое сопротивление среды на расстоянии 250 км от источника (*г*). По оси x указан номер вычислительного эксперимента, а тип линии указывает частоту сигнала.

пространяющихся в невозмущенных условиях. Видно незначительное усиление поля примерно на 10%, для электрической и магнитной компонент сигнала. Заметно, что реакция сигналов различной частоты на возмущенные условия в случае возмущения вызванного МУВ как для электрического, так и для магнитного поля в целом одинакова.

Вычислительные эксперименты, проведенные для возмущенных состояний ионосферы, соответствующих приходу МУВ показали, что на расстоянии от источника более 200 км разность фаз между электрической и магнитной компонентами электромагнитного поля и волновое сопротивление среды слабо изменяются при изменении расстояния от источника. Это означает, что на расстоянии от источника более 200 км режим распространения сигнала в волноводе Земля-ионосфера устанавливается в соответствии с вертикальными профилями концентрации электронов и частоты столкновений.

Анализ разности фаз между электрической и магнитной компонентами электромагнитного поля на расстоянии 250 км до источника в зависимости от интенсивности возмущения электронной концентрации ионосферы, вызванного приходом МУВ (вычислительные эксперименты 1–5 по оси x) рис. 2*в* не выявил заметного влияния событий, связанных с приходом МУВ, на разность фаз в исследуемом частотном диапазоне. Зависимость разности фаз от частоты так же очень слабая — менее двух градусов. На рис. 2*г* показано волновое сопротивление среды на расстоянии 250 км до источника в зависимости от номера вычислительного эксперимента. Волновое сопротивление снижается в возмущенных условиях во время прихода межпланетной ударной волны, однако снижение не превышает 1 Ом относительно спокойных условий.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что межпланетная ударная волна и последующее заметное повышение электронной концентрации в E и D области ионосферы оказывает

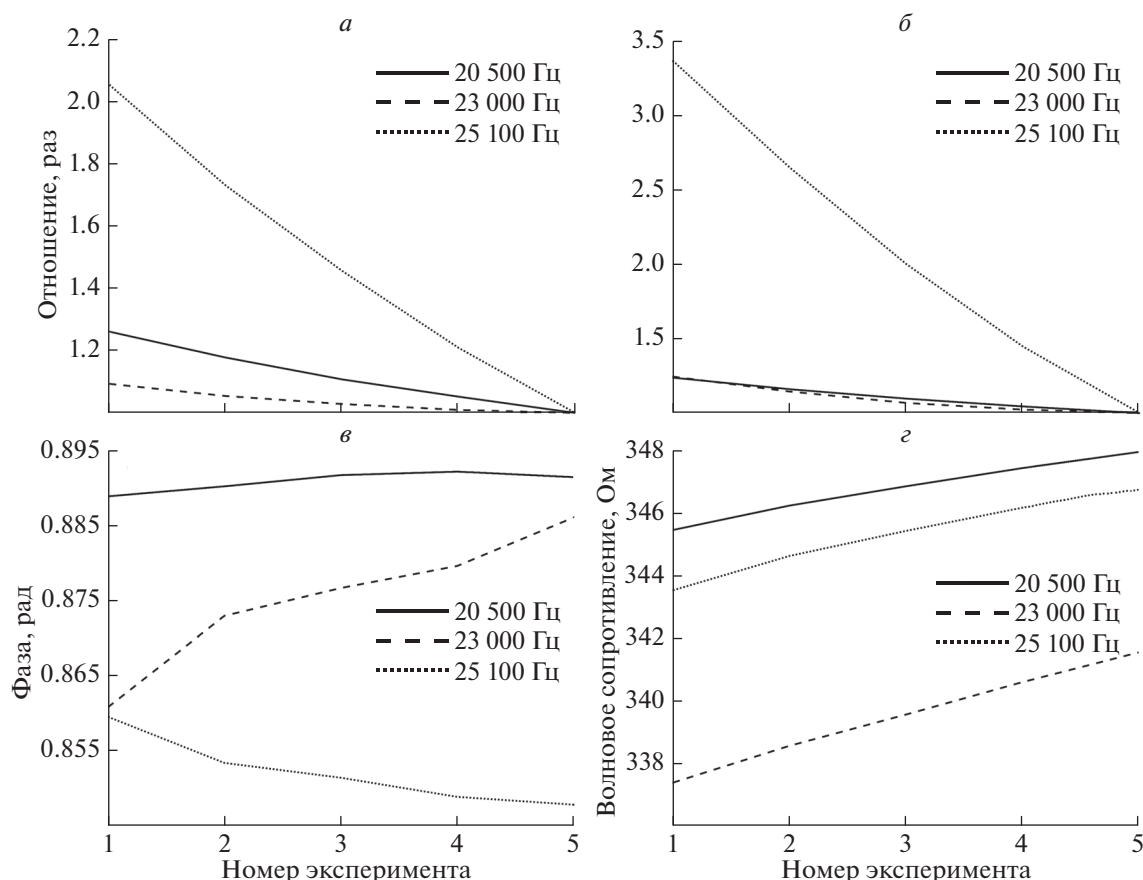


Рис. 3. Отношения амплитуд компоненты E_z электрического поля на поверхности Земли на расстоянии 200 км от источника, полученные в разных вычислительных экспериментах во время суббури, к амплитуде компоненты E_z в той же точке, полученной в вычислительном эксперименте 5, который соответствует спокойным условиям (а); отношения амплитуд компоненты H_x магнитного поля (б); разность фаз между основными компонентами напряженности поля E и H на расстоянии 250 км от источника (в); волновое сопротивление среды на расстоянии 250 км от источника (г). По оси x указан номер вычислительного эксперимента, а тип линии указывает частоту сигнала.

незначительное влияние на амплитуду и фазу электромагнитных волн на частотах, используемых системой вещания эталонных сигналов точного времени и частоты “Бета”.

Суббуря 22:00 UT

На рис. 3а и 3б изображены отношения амплитуды сигналов на расстоянии 200 км от источника в экспериментах моделирующих распространение волн с частотами из набора, используемого системой “Бета”, во время суббури разной силы к амплитуде сигналов, распространяющихся в невозмущенных условиях. Видно заметное усиление поля на частоте 25100 Гц в 2 раза для электрической компоненты и более чем в 3 раза для магнитной компоненты сигнала. Заметно, что реакция амплитуды сигналов различной частоты на возмущенные условия в случае суббури существенно отличается, так амплитуда сигнала с частотой 25100 Гц реагирует сильнее, чем амплитуды сигналов с частотами 23000 и 20500 Гц.

На рис. 3в представлены разности фаз между электрической и магнитной компонентами напряженности электромагнитного поля на расстоянии 250 км до источника в зависимости от интенсивности ионосферных возмущений электронной концентрации, вызванных суббурей. На рис. 3г показано волновое сопротивление среды на расстоянии 250 км до источника рассчитанное по напряженностям электрического и магнитного поля в зависимости от номера вычислительного эксперимента. Волновое сопротивление снижается в возмущенных условиях суббури более заметно, чем в случае прихода МУВ, снижение превышает 3–4 Ом относительно спокойных условий. Волновое сопротивление сигналов на всех моделируемых частотах демонстрирует схожие вариации при изменении вертикальных профилей концентрации и частоты столкновений электронов в волноводе Земля–ионосфера от спокойных условий к условиям суббури.

Следует отметить, из рис. 1 видно, что суббуря вызывает более заметное повышение плотности

ионосферной плазмы, чем повышение, вызванное приходом к магнитосфере межпланетной ударной волны. Влияние суббури, оказываемое на амплитуды сигналов, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера с частотами, соответствующими частотам используемой системой вещания эталонных сигналов точного времени и частоты “Бета” заметно сильнее, чем в случае возмущений, вызванных взаимодействием магнитосферы с МУВ. Однако влияние на фазовые характеристики моделируемых сигналов оказалось одинаково низким как для суббури, так и в случае МУВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в данной работе результаты численного моделирования распространения электромагнитных волн ОНЧ диапазона в области высоких широт в прямоугольном участке волновода Земля-ионосфера для вариантов распределений концентрации электронов в ионосфере и распределений частоты столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами, соответствующим ответу ионосферы на приход к магнитосфере межпланетной ударной волны 24 января 2012 г. и последующему развитию суббури, позволяют сделать следующие выводы:

Межпланетная ударная волна и последующее заметное повышение электронной концентрации в E и D области ионосферы оказывает влияние на амплитуду и фазу электромагнитных волн на частотах, используемых системой вещания эталонных сигналов точного времени и частоты “Бета”, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера. Однако вариации рассмотренных параметров недостаточны для стабильной регистрации существующими инструментальными методами на фоне радиощумов естественного и техногенного характера.

Анализ вычислительных экспериментов в условиях суббури разной интенсивности показал заметное влияние изменений профилей концентрации и частоты столкновений электронов в волноводе

Земля-ионосфера от спокойных условий к условиям суббури на амплитудные характеристики, и незначительное влияние на фазовые характеристики моделируемых сигналов.

Использование сигналов системы вещания эталонных сигналов точного времени и частоты “Бета” для исследований D и E слоя ионосферы по результатам регистрации пунктами приема ОНЧ сигналов наземного базирования представляется нецелесообразным.

Исследование выполнено за счет средств проекта Российского научного фонда № 18-77-10018 (Ахметов О.И., Белаховский В.Б.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
2. Gail W.B., Inan U.S., Helliwell R.A. et al. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95(A1). P. 119.
3. Воробьев В.Г. // Геомагн. и аэроном. 1974. Т. 14. № 1. С. 90.
4. Zhou X.-Y., Strangeway R.J., Anderson P.C. et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108(A4). Art. No. 009701.
5. Стародубцев С.А., Баишев Д.Г., Григорьев В.Г. и др. // Солн.-земн. физ. 2019. Т. 5. № 1. С. 17; Starodubtsev S.A., Baishev D.G., Grigoryev V.G. et al. // J. Sol.-Ter. Phys. 2019. V. 5. 1. P. 14.
6. Bashkuev Y., Advokatov V., Buyanova D., Pushkarev M. // E3S Web Conf. 2018. V. 62. Art. No. 01002.
7. Эталонные сигналы частоты и времени. Бюллетень В15/2015. ФГУП “ВНИИФТРИ”, 2015.
8. Berenger J.-P. // J. Comput. Phys. 1994. V. 114. No. 2. P. 185.
9. Akhmetov O., Mingalev O., Mingalev I. et al. // Proc. RWP-2019 (Kazan, 2019). P. 224.
10. Wait J.R., Spies K.P. Technical Note 300. Boulder: National Bureau of Standards, 1964. 96 p.
11. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A. et al. // Earth Planets Space. 2002. V. 54. No. 5. P. 535.
12. Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В. и др. // Солн.-земн. физ. 2019. Т. 5. № 4. С. 99.
13. Мингалев И.В., Мингалев О.В., Ахметов О.И., Суворова З.В. // Мат. модел. 2018. Т. 30. № 12. С. 17.

Propagation of electromagnetic waves in the region of high latitudes at different conditions of the ionosphere at frequencies of the precision time system “Beta”

O. I. Akhmetov^{a,*}, I. V. Mingalev^{a,b}, O. V. Mingalev^{a,b}, V. B. Belakhovsky^a, Z. V. Suvorova^a

^aPolar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

^bMurmansk Arctic State University, A branch in Apatity, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: akhmetov@pgia.ru

The ionospheric disturbances caused by the arrival of an interplanetary shock wave on January 24, 2012 and subsequent substorm are considered. Effect of the changes in the vertical profile of electron concentration on the amplitude and phase characteristics of signals measured at the Earth's surface at the carrier frequencies of the “Beta” system of transmitters of the exact time system are analyzed.