

УДК 551.508.86+537.877

О. М. Лебедь, Ю. В. Федоренко, А. В. Ларченко

Влияние вспышек на Солнце в марте 2012 г. на профили проводимости высокоширотной нижней ионосферы

O. M. Lebed, Yu. V. Fedorenko, A. V. Larchenko

Influence of the solar flares in March 2012 on the conductivity profile of the high-latitude lower ionosphere

Аннотация. На распространение электромагнитных сигналов в волноводе Земля – ионосфера оказывает влияние состояние D-слоя ионосферы. Известно, что имеет место связь скорости распространения атмосфериков – электромагнитных импульсов, порождаемых молниевыми разрядами, с профилем проводимости нижней ионосферы. В работе рассмотрено влияние серии вспышек на Солнце в марте 2012 г. на скорость распространения атмосфериков и, соответственно, на состояние высокоширотной нижней ионосферы, а также продемонстрирована возможность оценки дневных профилей проводимости по результатам измерений групповых скоростей распространения атмосфериков вдоль высокоширотной трассы в спокойных и в возмущенных условиях.

Abstract. The ionospheric D-layer affects the electromagnetic waves propagated in the Earth – ionosphere waveguide. It is known that the propagation velocity of atmosphericics – electromagnetic pulses from lightning discharge depends on the conductivity profile of the lower ionosphere. In this paper the authors have considered the influence of solar flares in March 2012 on the propagation velocity of atmosphericics and thus the state of the high-latitude lower ionosphere. The possibility to estimate the conductivity profiles of the daytime ionosphere under disturbed and undisturbed geomagnetic conditions using the measurements of the propagation velocity of atmosphericics along the high-latitude path has been demonstrated.

Ключевые слова: волновод Земля – ионосфера, D-слой, скорость распространения, атмосферик, солнечная вспышка.

Key words: Earth – ionosphere waveguide, D-layer, propagation velocity, atmosphericic, solar flare.

Введение

В волноводе Земля – ионосфера распространяются электромагнитные сигналы КНЧ–СНЧ диапазонов различной природы. Среди них присутствуют как естественные сигналы, представленные атмосфериками – электромагнитными импульсами от молниевых разрядов, так и искусственные, генерируемые при организации связи на низких частотах или при электромагнитном зондировании земной коры. На распространение таких сигналов влияет состояние верхней и нижней границ волновода. Нижняя граница волновода Земля – ионосфера представляется земной поверхностью, проводимость которой в простых моделях распространения считается практически бесконечной. Верхняя стенка – ионосфера на высотах D-слоя (60–90 км). По сравнению с земной поверхностью проводимость верхней границы волновода Земля – ионосфера – нижней ионосферы – конечна и претерпевает постоянные изменения. Вариации состояния нижней ионосферы в значительной мере контролируются Солнцем [1]. Так, возникновение D-слоя ионосферы на освещенной Солнцем стороне Земли вызвано в основном ионизирующим влиянием линии L_{α} солнечного спектра (121.5 нм) на эту область. Кроме того, значительное влияние на состояние нижней ионосферы оказывают вспышки на Солнце, вторжение авроральных протонов и космические лучи. Еще одной особенностью D-слоя ионосферы является его зависимость от метеорологических условий в средней атмосфере – стратосфере и мезосфере [2].

Суточные вариации проводимости нижней ионосферы, вызванные освещенностью Земли Солнцем, многосторонне изучены еще в прошлом веке. Также были изучены основные закономерности поведения D-слоя ионосферы во время солнечных вспышек. Несмотря на это, каждая солнечная вспышка является уникальной и обладает своим набором черт, оказывающих влияние на распространение электромагнитных волн в волноводе Земля – ионосфера. Сюда относятся, например, величины потоков рентгеновских лучей и протонов, время, в которое произошла вспышка, взаимное расположение Земли и Солнца в момент вспышки, положение вспышки на Солнце и т. д. Все это говорит о сложности полного теоретического описания процессов, происходящих в ионосфере во время вспышки, что выводит на первый план необходимость в экспериментальных исследованиях.

В большинстве случаев экспериментальное изучение D-слоя ионосферы сводится к измерению в нем профилей концентрации электронов. Проведение таких измерений на высотах порядка 50–90 км сопряжено с определенными трудностями. Так, ионозонды и радары некогерентного рассеяния малоэффективны в силу низкой электронной плотности ($<10^3 \text{ см}^{-3}$) на этих высотах. Кроме того, D-слой располагается слишком низко по высоте для обычных спутников и слишком высоко для аэростатов [3]. Большинство известных

на сегодняшний день результатов измерений концентрации электронов в D-слое ионосферы получены с помощью ракетных измерений или методом частичных отражений.

В работе [4] показано, что вариации скорости распространения атмосфериков на короткой высокоширотной трассе определяются изменениями профиля проводимости нижней ионосферы в окрестности этой трассы. Поскольку разряды молний, являющиеся источниками атмосфериков, происходят на Земле практически непрерывно, это дает возможность вести практически непрерывный мониторинг локальных изменений состояния нижней ионосферы в высоких широтах. В настоящей работе приведены результаты измерений групповой скорости распространения атмосфериков на трассе "Ловозеро – Баренцбург" в марте 2012 г. в диапазоне частот 95–165 Гц, когда наблюдалась серия вспышек X-класса на Солнце, а также продемонстрирована возможность оценки дневного профиля проводимости по результатам измерений групповой скорости распространения атмосфериков в спокойных и в возмущенных условиях.

Модель распространения электромагнитных сигналов в СНЧ диапазоне

В литературе при исследовании распространения электромагнитных сигналов в СНЧ–СДВ диапазонах практически всегда применяется одноэкспоненциальная модель проводимости ионосферы, являющаяся частным случаем двухэкспоненциальной модели [5–7]. За высотное поведение вертикальной электрической компоненты и горизонтальных магнитных компонент поля в нижней ионосфере отвечают два характерных участка профиля проводимости [8]. Вне этих характерных участков свойства ионосферы практически не влияют на распространение электромагнитных волн в волноводе. Эти участки ионосферы имеют характерные высоты, которые, как правило, обозначают h_1 и h_2 . Граница проводимости h_1 – это высота, на которой проводимость удовлетворяет уравнению $\sigma_1 = \varepsilon_0 \omega$. Она определяется как переходная высота, ниже которой атмосфера обладает изолирующими свойствами, а выше – проводящими. Граница отражения h_2 находится на высоте, где проводимость удовлетворяет уравнению $\sigma_2 = 1/4 \mu_0 \omega \xi^2$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, ξ – локальная шкала высот. Тогда профиль проводимости ионосферы в существенной для распространения области высот $h_1 < h < h_2$ и частоты $\omega_0 = 130$ Гц выглядит следующим образом:

$$\sigma(h) = \varepsilon_0 \omega_0 e^{(h-h_0)/\xi}. \quad (1)$$

Как показано в [5–6], решение уравнений Максвелла в данной модели проводимости ионосферы (1) приводит к выражению для оценки фазовой скорости распространения электромагнитной волны v_{ph} в сферическом волноводе:

$$v_{ph} \approx c \sqrt{h_1 / h_2}. \quad (2)$$

Таким образом, данная модель позволяет установить связь между фазовой скоростью распространения электромагнитной волны и параметрами профиля проводимости ионосферы h_1 и h_2 . На практике же электромагнитное возмущение от молниевых разрядов (атмосферик) необходимо рассматривать как волновой пакет и, соответственно, использовать понятие групповой скорости. В данной работе электромагнитный сигнал ограничен полосой частот 95–165 Гц. Представляет интерес вопрос: на сколько могут отличаться между собой значения фазовой и групповой скоростей в заданном диапазоне частот.

Для оценки зависимости фазовой скорости (2) от частоты в рамках модели, описанной в статье [5], выпишем характерные высоты h_1 и h_2 как функции частоты. Как показано в [5], высота h_1 на произвольной частоте ω находится из соотношений $\sigma(h_1) = \varepsilon_0 \omega$ и $\sigma(h_1) = \varepsilon_0 \omega_0 \exp((h_1 - h_0)/\xi)$, откуда следует, что

$$h_1(\omega) = h_0 + \xi \ln \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (3)$$

Выражение для проводимости $\sigma_2 = 1/4 \mu_0 \omega \xi^2$ [5] приводит к следующему выражению для высоты h_2 :

$$h_2(\omega) = h_0 + \xi \ln \frac{c^2}{4\omega \omega_0 \xi^2}. \quad (4)$$

Из [5] следует выражение для фазовой скорости, зависящей от частоты,

$$v_{ph}(\omega) \approx c \sqrt{h_1(\omega) / h_2(\omega)}. \quad (5)$$

Записывая фазовую постоянную распространения $k = \omega/v_{ph}$ и подставляя (3) и (4) в (5), найдем групповую скорость распространения $v_{gr} = d\omega/dk$

$$v_{gr}(\omega) = c \cdot \frac{2h_1(\omega) \sqrt{h_1(\omega) h_2(\omega)}}{2h_1(\omega) h_2(\omega) - \xi(h_1(\omega) + h_2(\omega))}. \quad (6)$$

Для анализа поведения фазовой и групповой скорости мы воспользуемся типовыми профилями электронной концентрации из работы [9]. Эти профили выбраны, поскольку проведенное в работе [9] сравнение экспериментальных результатов с расчетами, использовавшими различные численные методы, показало их хорошее соответствие. На рис. 1, верхняя панель, приведены фазовая и групповая скорости распространения электромагнитных возмущений, рассчитанные в рамках модели распространения [5] и модели ионосферы, взятой из [9].

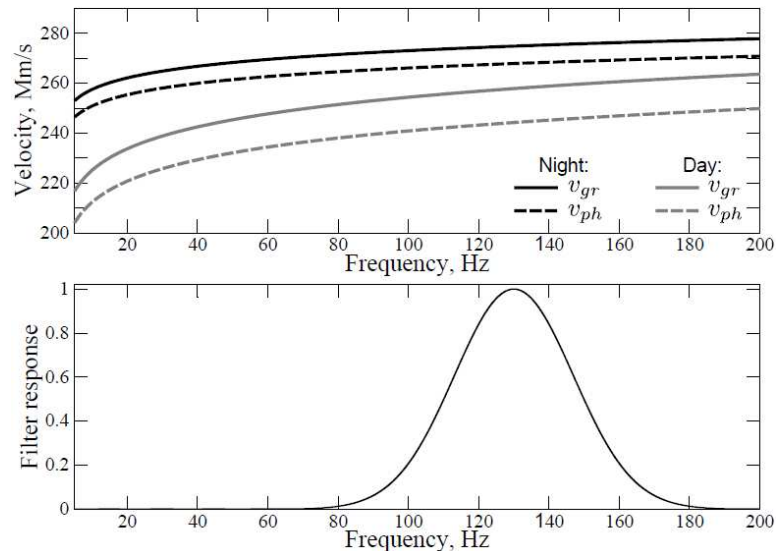


Рис. 1. Фазовая и групповая скорости распространения как функции частоты (вверху) и полоса пропускания фильтра, использованного для выделения диапазона исследуемых частот (внизу)

Из рисунка видно, что частотный ход фазовой и групповой скорости практически одинаков, а групповая скорость всегда превышает фазовую. Предполагая, что частотный спектр сигнала в полосе пропускания изменяется слабо, получим усредненные по полосе фильтра фазовую $\langle v_{ph} \rangle$ и групповую $\langle v_{gr} \rangle$ скорости, приведенные в табл. 1. Отметим, что усредненные по полосе частот скорости и скорости, вычисленные на центральной частоте, различаются только в четвертом знаке.

Таблица 1

Усредненные по полосе фильтра фазовая и групповая скорости

	$\langle v_{ph} \rangle$, тыс. км/с	$\langle v_{gr} \rangle$, тыс. км/с	$\langle v_{gr} \rangle - \langle v_{ph} \rangle$, тыс. км/с	$2(\langle v_{gr} \rangle - \langle v_{ph} \rangle) / (\langle v_{gr} \rangle + \langle v_{ph} \rangle)$, %
День	244	258	14	5.5
Ночь	268	275	7	2.6

Из таблицы следует, что фазовая и групповая скорости значительно различаются по абсолютной величине, а относительные их отличия малы и составляют 5.5 % днем и 2.6 % ночью. Таким образом, при качественных оценках влияния состояния нижней ионосферы на распространение электромагнитных возмущений можно использовать групповую скорость наравне с фазовой, а при количественных оценках следует приводить результаты измерений групповой скорости к фазовой скорости, поведение которой описывается известными моделями распространения.

Измерение групповой скорости распространения естественных импульсных сигналов

В обсерваториях Полярного геофизического института "Ловозеро" (67°51' N, 35°10' E) и "Баренцбург" (78°04' N, 14°13' E) ведутся непрерывные измерения компонент электромагнитного поля в диапазоне частот 0.1–200 Гц. Здесь используется аппаратура, позволяющая с высокой точностью определять времена отсчетов данных [10–11], что необходимо при измерении задержек прихода электромагнитных сигналов на регистрирующие станции. Если источники находятся далеко от регистрирующих станций, а поверхность Земли можно считать плоской, фронт электромагнитного возмущения (атмосферика) на земной поверхности с высокой степенью точности можно аппроксимировать прямой линией. Время распространения возмущения в этом случае вычисляется как $\tau = l \cos \phi / v_{gr}$. В нашем случае τ – время запаздывания прихода фронта атмосферика в Баренцбург относительно Ловозера, $\tau = t_{BAR} - t_{LOZ}$, $l = 1300$ км – расстояние между Ловозером и Баренцбургом, измеренное вдоль дуги большого круга, v_{gr} – групповая скорость распространения возмущения по волноводу Земля – ионосфера, а ϕ – угол между вектором Пойнтинга, измеренным в Ловозере, и направлением на Баренцбург вдоль дуги большого круга, соединяющей эти станции. Измерения времени

задержки и направления прихода электромагнитного возмущения в спокойных гелиогеофизических условиях показали, что в реальности связь между τ и φ не описывается простой формулой. Расстояние до вероятных источников электромагнитных возмущений составляет от четырех до восьми тыс. км, что сравнимо с расстоянием между регистрирующими станциями в 1300 км. При больших φ на таких расстояниях нельзя пренебрегать кривизной волнового фронта. К тому же ниже экспериментально показано (рис. 2), что максимальные значения τ достигаются при $\varphi = -14^\circ$, а не при $\varphi = 0^\circ$, как это следует из простой формулы. По-видимому, это происходит из-за местного искажения структуры электромагнитного поля неоднородностями земной коры, которые трудно или вообще невозможно учесть. В настоящей работе связь между τ и φ аппроксимирована полиномом третьей степени $C(\varphi)$, коэффициенты которого получены из уравнения регрессии измеренных значений времени задержки τ по направлению распространения φ (рис. 2).

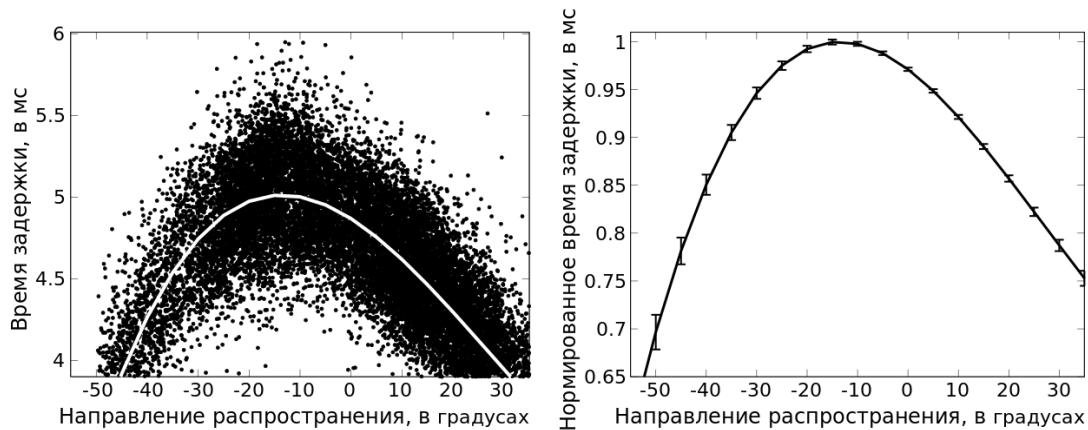


Рис. 2. Диаграмма рассеяния измеренных τ и φ вместе с регрессионной кривой, аппроксимирующей статистическую связь между ними полиномом третьей степени (слева) и полином $C(\varphi)$ с доверительными интервалами шириной $\pm\Delta C$, рассчитанными для доверительной вероятности 0.99 (справа)

Мы считаем, что зависимость времени задержки от измеренного угла прихода возмущения $\tau(\varphi) = IC(\varphi)/v_{gr}$ одинакова днем и ночью, так как в основном зависит от строения земной коры и в меньшей степени – от состояния ионосферы. Это предположение дает возможность статистически учесть как влияние локальных искажений структуры поля, так и кривизны волнового фронта и сферичности земной поверхности на оценку скорости распространения возмущений на трассе "Ловозеро – Баренцбург". Отметим, что если пренебречь кривизной волнового фронта и местными искажениями структуры поля неоднородностями земной коры, то $C(\varphi) \approx \cos\varphi$. Из рис. 1 (справа) следует, что доверительные интервалы, внутри которых с вероятностью 99 % находятся значения $C(\varphi)$, малы, а относительная ошибка $\delta C(\varphi) = \Delta C(\varphi)/C(\varphi)$ даже на краях диапазона интересующих нас углов прихода не превышает 3 %. В диапазоне углов прихода $\pm 20^\circ$, соответствующего расположению африканского грозового очага, $\delta C(\varphi) \leq 1\%$. Такой точности вполне достаточно для оценки скорости распространения возмущений на трассе "Ловозеро – Баренцбург".

Результаты измерения скоростей распространения электромагнитных сигналов

Для того чтобы исследовать влияние вспышек на Солнце на вариации групповой скорости распространения атмосфериков на трассе "Ловозеро – Баренцбург", мы анализировали период со 2 по 14 марта 2012 г., в течение которого наблюдалась серия вспышек на Солнце, причем одна из них была X-класса. На рис. 3 показаны зависимости от времени групповой скорости распространения электромагнитных возмущений на трассе "Ловозеро – Баренцбург", потока протонов по данным спутника GOES-15¹ и риометрического поглощения в обл. "Ивало"². Кружками отмечены значения скорости во время локального полудня на середине трассы "Ловозеро – Баренцбург".

Период времени со 2 по 5 марта характеризовался спокойными гелиогеофизическими условиями. Поток рентгеновских лучей не превышал 10^{-5} Вт/м², Kp -индекс изменялся от 0 до 3, Dst -индекс был выше -30 нТл³. Из рис. 3 видно, что в этот промежуток времени в групповых скоростях атмосфериков, измеренных на трассе "Ловозеро – Баренцбург", наблюдается регулярный суточный ход. Днем скорости минимальны, а ночью – максимальны. Данный суточный ход согласуется с тем, что обсуждался в [4].

Пятого марта 2012 г. на Солнце произошла небольшая вспышка, вызвавшая относительно небольшой, до $10^+ \text{p} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, поток высокоэнергичных протонов с энергиями выше 60 МэВ. При этом Kp -индекс

¹ URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/>

² URL: <http://www.sgo.fi/Data/Riometer/riometer.php>

³ URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/>; URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

не превысил значения 3, а *Dst*-индекс не опускался ниже -28 нТл⁴. Как видно из рис. 3, данное явление вызвало смещение хода групповой скорости распространения вниз примерно на 20 тыс. км/с. Это может свидетельствовать об уменьшении средней по трассе эффективной высоты волновода, что характерно для него в возмущенном состоянии. Следует отметить, что на эту вспышку никак не отреагировало риометрическое поглощение, которое обычно используют для диагностики D-слоя ионосферы. Если изменения проводимости ионосферы имели место на высокоширотной части трассы "Ловозеро – Баренцбург", это объясняет изменения средней групповой скорости распространения и отсутствие изменений риометрического поглощения в окрестности обс. "Ловозеро" и обс. "Ивало".

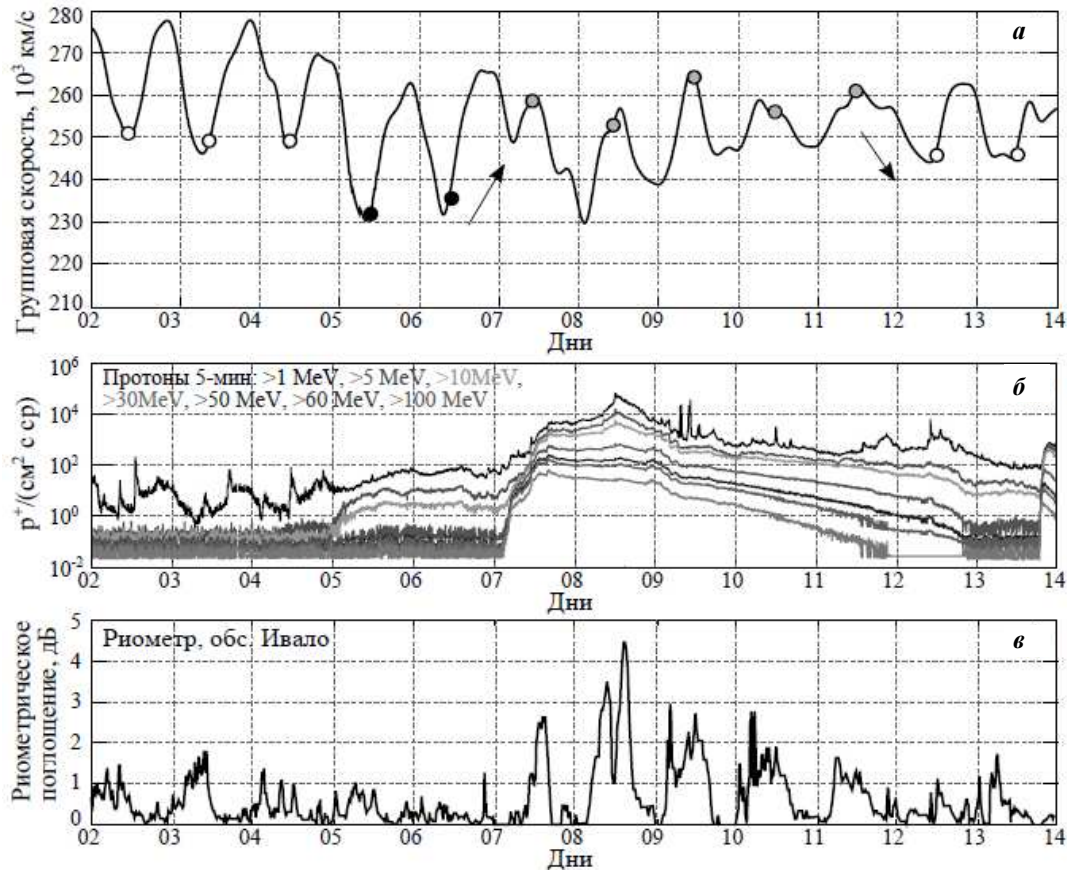


Рис. 3: а – групповая скорость распространения атмосфериков на трассе "Ловозеро – Баренцбург"; б – поток протонов; в – риометрическое поглощение

Вторая и самая мощная вспышка на Солнце за рассматриваемый интервал времени произошла 7 марта 2012 г. Поток рентгеновских лучей достигал значений $5 \cdot 10^{-3}$ Вт/м², *Kp*-индекс 7 марта был равен 6, а 9 марта достиг значения 8. *Dst*-индекс 7 марта опустился до -74 нТл, а 9 марта до -130 нТл⁵. Величина потока протонов с энергиями больше 60 МэВ составила 100 p⁺см⁻²с⁻¹sr⁻¹. Вторжение потока высокоэнергичных протонов продолжалось вплоть до 13 марта. После этой вспышки наблюдалась смена режима суточных изменений групповой скорости электромагнитных возмущений на трассе "Ловозеро – Баренцбург", продолжавшаяся до 12 марта. В это время вместо ожидаемых максимумов скорости ночью наблюдались минимумы, а вместо минимумов днем – максимумы. Данная смена режима изменения скорости не описывается ни одной из известных нам моделей, в том числе и сферически-слоистой моделью ионосферы, и, скорее всего, связана с возникновением неоднородностей в ионосфере в области трассы распространения электромагнитных возмущений. После 12 марта значения и суточный ход скорости вернулись к режиму изменений, соответствующему спокойным гелиогеофизическим условиям. Риометрическое поглощение также отреагировало на возрастание потока протонов, его значения в это время достигали 4.5 дБ. Это, по всей видимости, связано с тем, что высокоэнергичные протоны проникли до широт, на которых расположены обс. "Ловозеро" и обс. "Ивало".

Следует отметить, что в данном случае наблюдалось хорошее соответствие между поведением групповой скорости распространения и регистрируемыми спутником GOES-15 потоками высокоэнергичных

⁴ URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/>; URL: <http://www.sgo.fi/Data/Riometer/riometer.php>

⁵ URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/>; URL: <http://www.sgo.fi/Data/Riometer/riometer.php>

протонов. Перед солнечной вспышкой, произошедшей 5 марта, наблюдалась спокойная геомагнитная обстановка. Об этом свидетельствуют Kp - и Dst -индексы, а также риометрическое поглощение. В течение первых двух дней после этой вспышки геомагнитные индексы не изменялись, следовательно, наблюдаемое понижение групповой скорости было вызвано влиянием солнечных протонов на ионосферу. После вспышки 7 марта 2012 г. возникли возмущенные геомагнитные условия, которые обнаруживались и в геомагнитных индексах, и в риометрическом поглощении. Поведение групповой скорости распространения в это время, а именно: во время смены режима изменения скоростей, по-видимому, определялось не только протонами, но и геомагнитной обстановкой.

Проведенный анализ групповой скорости распространения атмосфериков на трассе "Ловозеро – Баренцбург" показал, что регистрируемые изменения скорости отражают изменения локального состояния нижней ионосферы как в спокойное, так и в возмущенное время.

Оценка дневного профиля проводимости по результатам измерения скорости

Как следует из модели (2), скорость распространения электромагнитного сигнала в волноводе Земля – ионосфера в основном определяется профилем проводимости нижней ионосферы. Представляет интерес решение обратной задачи, а именно: восстановление профиля проводимости по данным значений групповой скорости распространения, полученных в ходе нашего эксперимента. Если принять представление профиля проводимости в виде $\sigma(h) = \varepsilon_0 \omega \exp((h - h_1)/\xi)$, а ξ задано, связь между параметром h_1 и измеренной скоростью v_{gr} устанавливается уравнением (6). Так как в нашем случае усредненная по используемой полосе частот групповая скорость совпадает с групповой скоростью, вычисленной на центральной частоте $f_0 = 130$ Гц, запишем (6) следующим образом:

$$v_{gr} = c \cdot \frac{2h_1 \sqrt{h_1 h_2}}{2h_1 h_2 - \xi(h_1 + h_2)}, \quad (7)$$

где

$$h_2 = h_0 + \xi \ln \frac{c^2}{4\omega_0^2 \xi^2}; \quad \sigma(h_0) = \varepsilon_0 \omega_0. \quad (8)$$

Мы оценили дневные профили проводимости нижней ионосферы для спокойных и возмущенных дней рассмотренного выше случая. Для определения параметра h_1 уравнения (7) и (8) решались численно. Для описания дневной ионосферы были взяты измеренные значения групповых скоростей распространения атмосфериков во время локального полудня на середине трассы "Ловозеро – Баренцбург" (рис. 3). При этом из рассмотрения был исключен период с 7 по 11 марта 2012 г., поскольку состояние ионосферы в это время явно не описывается простой сферически-слоистой одноэкспоненциальной моделью, что проявилось в изменении суточного хода скорости на обратный.

Поскольку нам не известно значение параметра ξ , мы воспользовались тем, что его значения лежат в интервале от 2 до 5 км [12]. Перебирая значения ξ с шагом 0.01 км и сравнивая полученные методом частичных отражений и измеренные в ракетных экспериментах профили проводимости нижней ионосферы [9], [13–16] с теми, что получаются при использовании выражений (7) и (8), мы выбрали то значение ξ , при котором совпадение профилей было наилучшим.

На рис. 4 приведены профили проводимости, оцененные из значений скоростей распространения электромагнитных возмущений на трассе "Ловозеро – Баренцбург" в марте 2012 г. и профили проводимости, полученные методом частичных отражений и измеренные в ракетных экспериментах. В табл. 2 приведены рассчитанные по данным групповых скоростей в марте 2012 г. параметры одноэкспоненциального профиля ионосферы.

Таблица 2

Параметры одноэкспоненциального профиля ионосферы, рассчитанные по данным групповых скоростей в марте 2012 г.

День месяца, март 2012 г.	v_{gr} , Мм/с	h_1 , км	h_2 , км	ξ , км
2	251	47.48	80.05	4.35
3	249	49.02	80.47	4.15
4	250	48.25	80.26	4.25
5	232	30.49	65.74	4.85
6	236	32.89	66.55	4.55
12	246	44.93	78.85	4.6
13	246	44.93	78.85	4.6

На рис. 4 профили, приведенные для 2–4 и 12–13 марта, характеризуют невозмущенные гелиогеофизические условия, а профили, приведенные для 5–6 марта, – возмущенные условия. Из рисунка видно, что используемый способ оценки параметров профиля проводимости ионосферы по данным групповой скорости распространения электромагнитных возмущений позволил получить достаточно хорошее согласование между экспериментальными и оцененными профилями проводимости. Следует обратить внимание на разделение профилей, соответствующих спокойным дням (расположены левее) и возмущенным (расположены правее), имеющее место как в измеренных профилях, так и в профилях, оцененных авторами. Такое разделение объясняется уменьшением характерной высоты D-слоя ионосферы h_1 во время возмущений. Это подтверждается и результатами расчетов, приведенными в табл. 2. Высота h_1 в среднем уменьшилась со значения 47 км до значения 32 км. Следует отметить, что параметр ξ практически не изменился в возмущенных условиях. Его среднее значение составило 4.4 км в спокойных условиях и 4.7 км в возмущенных условиях. Этот факт согласуется с результатами работы [12], где было показано, что во время гелиогеофизических возмущений наклон профиля проводимости сохраняется. Хорошее согласие экспериментально полученных и оцененных профилей говорит о том, что предлагаемая нами методика оценки профиля проводимости дневной ионосферы может служить для индикации возмущенности нижней ионосферы и мониторинга изменения ее состояния.

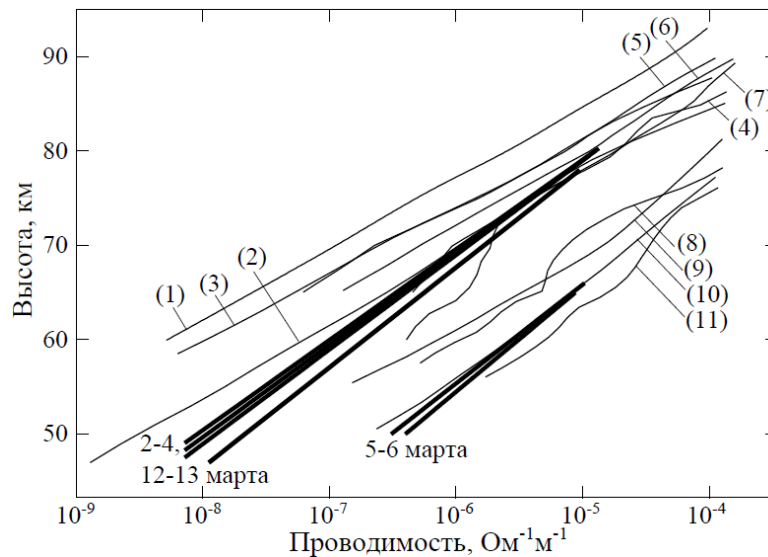


Рис. 4. Тонкими линиями показаны экспериментальные профили проводимости ионосферы, толстыми – оцененные из групповой скорости распространения.

Профили проводимости, полученные экспериментально: 1 – типичный дневной профиль [9];

- 2 – типичный ночной профиль [9]; 3 – спокойный дневной профиль [13]; 4 – спокойный дневной профиль [14];
 5 – спокойный дневной профиль, полученный методом частичных отражений в п. Туманный 25 сентября 1986 г. 14 ч. [16];
 6 – спокойный дневной профиль, полученный методом частичных отражений в п. Туманный 15 октября 1986 г. 13 ч. [16];
 7 – спокойный дневной профиль, полученный методом частичных отражений в п. Туманный 15 октября 1986 г. 14 ч. [16];
 8 – профиль во время РСА, полученный методом частичных отражений [14]; 9 – профиль во время сильной вспышки [13];
 10 – профиль во время РСА [13]; 11 – профиль во время РСА, полученный в ракетном эксперименте [15]

Заключение

В данной работе продемонстрирована возможность оценки дневных профилей проводимости по измеренным значениям групповой скорости распространения атмосфериков на короткой высокоширотной трассе. Показано, что возмущенность нижней ионосферы приводит к изменению характера зависимости скорости распространения от времени. Полученные методом частичных отражений и измеренные в ракетных экспериментах профили проводимости хорошо согласуются с оцененными в настоящей работе. Это позволяет утверждать, что предложенный нами подход к выявлению изменений профиля проводимости нижней ионосферы и оценке дневного профиля проводимости может использоваться для мониторинга изменений состояния нижней ионосферы, в особенности во время геомагнитных возмущений, вызванных вспышками на Солнце.

Благодарности

Работа была поддержана программой № 9 Президиума РАН. Авторы благодарны коллективам обс. "Ловозеро" и обс. "Баренцбург" за добросовестно выполненные наблюдения.

Библиографический список

1. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М. : Мир, 1977. 370 с.
2. Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Введение в физику околоземной космической среды : пер. на рус. яз. Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. 352 с.
3. Cummer S. A. Ionospheric D-region remote sensing using VLF radio atmospherics // *Radio Science*. 1998. V. 33, N 6. P. 1781–1792.
4. Вариации скорости распространения импульсных электромагнитных сигналов на трассе "Ловозеро – Баренцбург" в СНЧ диапазоне / О. М. Лебедь, М. В. Кузнецова, Ю. В. Федоренко, А. В. Ларченко // *Вестник МГТУ*. 2014. Т. 17, № 1. С. 204–212.
5. Greifinger C., Greifinger P. Approximate method for determining ELF eigenvalues in the Earth – ionosphere cavity // *Radio Science*. 1978. V. 13. P. 831.
6. Sentman D. D. Approximate Schumann resonance parameters for a two-scale-height ionosphere // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1990. V. 52, N 1. P. 35–46.
7. Galejs J. ELF waves in the presence of exponential ionospheric conductivity profiles // *IRE Transactions on antennas and propagation*. 1961. P. 554–562.
8. Madden T., Thompson W. Low frequency electromagnetic oscillations of the Earth – ionosphere cavity // *Reviews of Geophysics*. 1965. V. 3. P. 211–254.
9. Cummer S. A. Modeling electromagnetic propagation in the Earth – ionosphere waveguide // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2000. V. 48, N 9. P. 1420–1429.
10. Универсальное устройство синхронизации данных от GPS приемника / С. В. Пильгаев, О. И. Ахметов, М. В. Филатов, Ю. В. Федоренко // *ПТЭ*. 2008. № 3. С. 175–176.
11. Прецизионный четырехканальный 22-разрядный аналого-цифровой преобразователь на основе AD7716 / Ю. В. Федоренко, С. В. Пильгаев, М. В. Филатов, О. И. Ахметов // *ПТЭ*. 2009. № 4. С. 179–180.
12. Wait J. R., Spies K. P. Characteristics of the Earth – ionosphere waveguide for VLF radio waves. National Bureau of Standards, Technical note 300, 1964.
13. Ulwick J. C. Proc. COSPAR symp. solar particle event of November 1969. Air Force Cambridge Research Laboratories, U.S. Air Force, AFCRL-72-0474, 1972. P. 395.
14. Belrose J. S. Present knowledge of the lowest ionosphere // *Propagation of radio waves at frequencies below 300 kc/s*. Ed. W. T. Blackband. Oxford : Pergamon Press. 1964. P. 3–24.
15. Kane J. A. Re-evaluation of ionospheric electron densities and collision frequencies derived from rocket measurements of refractive index and attenuation. *J. Atmos. Terrest. Phys.* 1961. V. 23. P. 338–347.
16. Каталог профилей электронной концентрации в высокоширотной ионосфере, полученных методом частичных отражений, сравнение с результатами теоретической модели D-области ионосферы : препринт ПГИ-88-02-62 / Н. В. Смирнова, Ф. С. Сагидуллин, Ю. Г. Мизун [и др.]. Апатиты : Изд-во КФ АН СССР. 1988. 30 с.

References

1. Mitra A. *Vozdeystvie solnechnyh vspyshek na ionosferu Zemli* [Effects of solar flares on the Earth's ionosphere]. M. : Mir, 1977. 370 p.
2. Hargrivs Dzh. K. *Verhnyaya atmosfera i solnechno-zemnye svyazi. Vvedenie v fiziku okolozemnoy kosmicheskoy sredy* [The upper atmosphere and solar-terrestrial relations. Introduction to the physics of the near-Earth space environment] : per. na rus. yaz. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1982. 352 p.
3. Cummer S. A. Ionospheric D-region remote sensing using VLF radio atmospherics // *Radio Science*. 1998. V. 33, N 6. P. 1781–1792.
4. Variatsii skorosti rasprostraneniya impulsnyh elektromagnityh signalov na trasse "Lovozero – Barentsburg" v SNCh diapazone [Variations of propagation velocity of the ELF electromagnetic pulses along the "Lovozero – Barentsburg" path] / O. M. Lebed, M. V. Kuznetsova, Yu. V. Fedorenko, A. V. Larchenko // *Vestnik MGTU*. 2014. V. 17, N 1. P. 204–212.
5. Greifinger C., Greifinger P. Approximate method for determining ELF eigenvalues in the Earth – ionosphere cavity // *Radio Science*. 1978. V. 13. P. 831.
6. Sentman D. D. Approximate Schumann resonance parameters for a two-scale-height ionosphere // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1990. V. 52, N 1. P. 35–46.
7. Galejs J. ELF waves in the presence of exponential ionospheric conductivity profiles // *IRE Transactions on antennas and propagation*. 1961. P. 554–562.
8. Madden T., Thompson W. Low frequency electromagnetic oscillations of the Earth – ionosphere cavity // *Reviews of Geophysics*. 1965. V. 3. P. 211–254.
9. Cummer S. A. Modeling electromagnetic propagation in the Earth – ionosphere waveguide // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2000. V. 48, N 9. P. 1420–1429.

10. Universalnoe ustroystvo sinhronizatsii dannykh ot GPS priemnika [The universal device for synchronization of the GPS receiver data] / S. V. Pilgaev, O. I. Ahmetov, M. V. Filatov, Yu. V. Fedorenko // PTE. 2008. N 3. P. 175–176.

11. Pretsizionnyi chetyrehkanalnyi 22-razryadnyi analogo-tsifrovoy preobrazovatel na osnove AD7716 [Precision four-channel 22-bit analog-to-digital converter based on AD7716] / Yu. V. Fedorenko, S. V. Pilgaev, M. V. Filatov, O. I. Ahmetov // PTE. 2009. N 4. P. 179–180.

12. Wait J. R., Spies K. P. Characteristics of the Earth – ionosphere waveguide for VLF radio waves. National Bureau of Standards, Technical note 300, 1964.

13. Ulwick J. C. Proc. COSPAR symp. solar particle event of November 1969. Air Force Cambridge Research Laboratories, U.S. Air Force, AFCRL-72-0474, 1972. P. 395.

14. Belrose J. S. Present knowledge of the lowest ionosphere // Propagation of radio waves at frequencies below 300 kc/s. Ed. W. T. Blackband. Oxford : Pergamon Press. 1964. P. 3–24.

15. Kane J. A. Re-evaluation of ionospheric electron densities and collision frequencies derived from rocket measurements of refractive index and attenuation. J. Atmos. Terrest. Phys. 1961. V. 23. P. 338–347.

16. Katalog profiley elektronnoy kontsentratsii v vysokoshirotnoy ionosfere, poluchennykh metodom chastichnykh otrazheniy, sravnenie s rezultatami teoreticheskoy modeli D-oblasti ionosfery [Catalogue of profiles of the electron density in the high-latitude ionosphere, obtained by the partial reflection, comparison with the results of the theoretical model of the D-region of the ionosphere] : preprint PGI-88-02-62 / N. V. Smirnova, F. S. Sagidullin, Yu. G. Mizun [i dr.]. Apatity : Izd-vo KF AN SSSR. 1988. 30 p.

Сведения об авторах

Лебедь Ольга Михайловна – Полярный геофизический институт, мл. науч. сотрудник;
e-mail: olgamihs@yandex.ru

Lebed O. M. – Polar Geophysical Institute, Junior Researcher; e-mail: olgamihs@yandex.ru

Федоренко Юрий Валентинович – Полярный геофизический институт, канд. физ.-мат. наук, доцент;
e-mail: yury.fedorenko@gmail.com

Fedorenko Yu. V. – Polar Geophysical Institute, Cand. of Phis.-Math. Sci., Associate Professor;
e-mail: yury.fedorenko@gmail.com

Ларченко Алексей Викторович – Полярный геофизический институт, мл. науч. сотрудник;
e-mail: alexey.larchenko@gmail.com

Larchenko A. V. – Polar Geophysical Institute, Junior Researcher; e-mail: alexey.larchenko@gmail.com