

УДК 551.508.86, 537.877

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

## Вариации скорости распространения импульсных электромагнитных сигналов на трассе "Ловозеро – Баренцбург" в СНЧ диапазоне

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

## Variations of propagation velocity of the ELF electromagnetic pulses along the Lovozero – Barentsburg path

**Аннотация.** Рассмотрены результаты измерений скорости распространения импульсных электромагнитных сигналов от дальних разрядов молний в магнито-спокойное время на короткой высокоширотной трассе "Ловозеро – Баренцбург" в СНЧ диапазоне. Приведено краткое описание регистраторов электромагнитного поля в обсерваториях "Ловозеро" и "Баренцбург" и методов обработки данных. Для выявления связи результатов измерений с состоянием нижней ионосферы вдоль трассы применена модель распространения с двойным экспоненциальным профилем проводимости ионосферы, параметры которого оценивались с использованием IRI-2012. Показано, что зарегистрированные изменения скорости распространения импульсных сигналов линейно связаны с коэффициентом корреляции 0.89 и небольшим сдвигом во времени в 0.9 часа с изменениями скорости, рассчитанной с использованием модели IRI. Изменения измеренной на короткой трассе скорости определяются профилем проводимости нижней ионосферы в окрестности этой трассы, что дает возможность непрерывного мониторинга изменений состояния нижней ионосферы в высоких широтах.

**Abstract.** The paper discusses the results of measurements of the velocity of electromagnetic impulses produced by remote lightnings in the ELF range acquired on the Lovozero – Barentsburg path. The ELF receivers installed in the observatories Lovozero and Barentsburg and data processing methods have been described. To couple the results of measurements and the lower ionosphere conductivity profile along the propagation path the model with double-exponential conductivity profile which parameters were estimated using the IRI-2012 has been applied. It has been shown that the measured variations of the propagation velocity are closely correlated with those calculated by the IRI model with a correlation coefficient of 0.89, and a small time shift of 0.9 hour. Variations of velocity are controlled by the lower ionosphere conductivity profile near the propagation path, that makes possible to monitor alterations of the lower ionosphere at high latitudes.

**Ключевые слова:** волновод Земля-ионосфера, D-слой, скорость распространения  
**Key words:** Earth-ionosphere waveguide, D-layer, propagation velocity

### 1. Введение

В наши дни остается актуальной проблема мониторинга D-слоя ионосферы в высоких широтах. В ряде прикладных задач, например при учете влияния ионосферы на результаты электромагнитного зондирования земной коры с целью поиска залежей углеводородов (Dmitriev, 2009) и организации связи на сверхнизких частотах, важно вести непрерывные наблюдения за локальным состоянием волновода Земля-ионосфера, верхняя граница которого расположена примерно на высотах D-слоя ионосферы.

В волноводе Земля-ионосфера присутствуют электромагнитные возмущения, возникающие после молниевых разрядов (Wait, 1962). В литературе их часто называют атмосфериками. Благодаря тому что атмосферерики возбуждаются молниевым разрядом, а количество разрядов молний, происходящих на Земле ежесекундно, составляет не менее нескольких десятков, они регистрируются в любое время суток круглый год. Поскольку атмосферерики распространяются в волноводе Земля-ионосфера, его состояние оказывает влияние на их скорость распространения, а скорость распространения атмосферерикиков может являться индикатором состояния верхней границы волновода – нижней ионосферы (Fullekrug et al., 2002). Показано (Fullekrug et al., 2002), что прямое влияние на эту область ионосферы оказывает Солнце. Днем, когда ионосфера освещена, возникает D-слой, затрудняющий прохождение электромагнитных сигналов КНЧ-СНЧ диапазона по волноводу. Вспышки, возникающие на Солнце, также влияют на распространение атмосферерикиков. Приходящие с Солнца потоки рентгеновских лучей и высокоэнергичных протонов изменяют профиль электронной концентрации нижней ионосферы, особенно в авроральной области (Munra, 1977). Для отделения эффектов, вызываемых солнечными вспышками в волноводе Земля-ионосфера, от эффектов "спокойного" волновода, на первом этапе исследований следует выявить

особенности распространения электромагнитных возмущений, вызванных молниевыми разрядами, в магнито-спокойные дни.

В высоких широтах на относительно небольшом расстоянии друг от друга расположены две станции Полярного геофизического института (ПГИ) КНЦ РАН, ведущие непрерывные измерения компонент электромагнитного поля в диапазоне частот 0.1-200 Гц – это обсерватории "Ловозеро" (67°51' N, 35°10' E) и "Баренцбург" (78°04' N, 14°13' E). Сигнал атмосферика, который регистрируется этими станциями, представляет собой его низкочастотный "хвост", энергия которого распространяется в волноводе Земля-ионосфера с малым затуханием и почти не уходит в магнитосферу. Как показывают результаты, приведенные в (Greifinger, Greifinger, 1978; Sentman, 1990; Wait, 1962), его структура поля и фазовая скорость распространения в основном определяются состоянием нижней ионосферы на высотах до 100-110 км.

Распространение электромагнитных возмущений в волноводе Земля-ионосфера в КНЧ-СНЧ диапазоне можно исследовать с помощью шумановского резонанса (Fullekrug et al., 2002; Greifinger et al., 2007; Sentman, 1996). Из-за того, что формирование зависимости спектральной плотности шумановского резонанса от частоты связано с наложением множества молниевых разрядов, распределенных по всему земному шару, частоты гармоник шумановского резонанса характеризуют глобальное состояние волновода Земля-ионосфера. В работе (Schumann, 1952) показано, что, зная частоту одной из гармоник шумановского резонанса, можно оценить среднюю скорость распространения электромагнитных возмущений в волноводе Земля-ионосфера по формуле:

$$v_{sch} = \frac{2\pi a f_n}{\sqrt{n(n+1)}}, \quad (1)$$

где  $f_n$  – частоты  $n$ -й гармоники шумановского резонанса,  $a$  – радиус Земли,  $n$  – номер гармоники.

Если предположить, что скорость распространения электромагнитных возмущений в СНЧ диапазоне на короткой трассе определяется профилем проводимости волновода в окрестности этой трассы, возможно выявить и изучить связь между скоростью распространения и состоянием нижней ионосферы. В статьях (Greifinger, Greifinger, 1978; Sentman, 1990) предложен подход, который позволяет, найдя решение уравнений Максвелла, описывающих электромагнитное поле в сферическом волноводе, оценить фазовую скорость волны, распространяющейся в волноводе. Особенностью данного подхода является то, что верхняя стенка волновода представляется сферически симметричным двойным экспоненциальным профилем проводимости ионосферы в виде

$$\sigma(y) = \begin{cases} \sigma_1 e^{(y-h_1)/\xi_1} \\ \sigma_2 e^{(y-h_2)/\xi_2} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $y$  – высота над поверхностью Земли,  $\xi_1$  и  $\xi_2$  – локальные шкалы высот при  $y = h_1$  и  $y = h_2$  соответственно. Граница проводимости  $h_1$  – это высота, на которой проводимость удовлетворяет уравнению  $\sigma_1 = \epsilon_0 \omega$ . Она определяется как переходная высота, ниже которой атмосфера обладает изолирующими свойствами, а выше – проводящими. Показатель преломления на высоте  $h_1$  примерно равен единице. Граница отражения  $h_2$  находится на высоте, где характер полей изменяется от волнообразного к диффузионному и проводимость удовлетворяет уравнению  $\sigma_2 = 4/\mu_0 \omega \xi_2^2$ , где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума. Здесь показатель преломления намного больше единицы. Следует отметить, что обе высоты  $h_1$  и  $h_2$  зависят логарифмически от частоты  $\omega$  в данной модели проводимости ионосферы. Однако поскольку их вариации малы в интересующем нас частотном диапазоне, мы будем считать их константами в этом диапазоне частот (Sentman, 1990).

Решение уравнений Максвелла в данной модели проводимости ионосферы (2) приводит к выражениям для комплексных собственных частот, соответствующих собственным модам волновода Земля-ионосфера:

$$\omega_n^2 \approx n(n+1) \frac{c^2}{a^2} \frac{\left( h_1 - i \frac{\pi}{2} \xi_1 \right)}{\left( h_2 + i \frac{\pi}{2} \xi_2 \right)}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света,  $n$  – номер моды,  $a$  – радиус Земли. Вследствие того что затухание собственных мод на частотах порядка 100 Гц мало, можно оценить собственные частоты сферического волновода по действительной части выражения (3):

$$f_{nr} \approx \frac{c}{2\pi a} \left[ n(n+1) \frac{h_1}{h_2} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

С другой стороны, среднюю скорость распространения электромагнитной волны в сферическом волноводе можно оценить по формуле (1). Приравняв правые части (4) и (1), получим формулу для оценки скорости распространения электромагнитной волны  $v_{model}$  в сферическом волноводе, когда ионосфера задана двухвысотным профилем ее проводимости (2):

$$v_{model} \approx c \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Согласно определениям  $h_1$  и  $h_2$ , они расположены на высотах, где проводимости принимают значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно. Известно (Никольский, Никольская, 1989), что высотный профиль проводимости нижней изотропной ионосферы  $\sigma$  рассчитывается по формуле

$$\sigma = \frac{e^2 N_e v_e}{m_e (\omega^2 + v_e^2)},$$

где  $N_e$  – профиль электронной концентрации,  $e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона,  $v_e$  – частота соударений электронов с нейтралами и ионами.

Профиль электронной концентрации в точке с заданными географическими координатами по заданному дате и времени позволяет получить глобальная эмпирическая модель IRI-2012 (Bilitza et al., 2011; Rawer et al., 1978), которая на сегодняшний день является одной из наиболее используемых моделей в своем классе. Профиль  $N_e$  на высотах, ниже включенных в модель IRI, рассчитывается линейной экстраполяцией  $N_e$  от высот 60-80 км днем и 80-100 км ночью до высот 40 и 50 км соответственно. Двойной экспоненциальный профиль проводимости (2) вычисляется методом наименьших квадратов. Частота соударений  $v_e$  до высот порядка 100 км с высокой точностью определяется столкновениями только с нейтральными молекулами  $N_2$  и  $O_2$ :

$$v_e = v_{e;N_2} + v_{e;O_2}.$$

Для частот  $v_{e;N_2}$  и  $v_{e;O_2}$  можно использовать эмпирические формулы (Гуревич, Швацбург, 1973), которые хорошо зарекомендовали себя при моделировании процессов в нижней ионосфере. Эти уравнения в системе СИ имеют следующий вид:

$$v_{e;N_2} = \frac{2.5 \cdot 10^{-17} N_{N_2} T_e}{1 + 0.0093 \sqrt{T_e}} \quad v_{e;O_2} = 1.82 \cdot 10^{-16} N_{O_2} \sqrt{T_e} (1 + 0.0036 \sqrt{T_e}).$$

Высотные распределения концентраций нейтралов  $N_{N_2}$  и  $N_{O_2}$  можно рассчитать по эмпирической модели NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002), а зависимость температуры  $T_e$  электронов от высоты – по эмпирической модели IRI-2012.

На основе приведенного выше анализа можно провести сравнение скоростей распространения электромагнитного возмущения СНЧ диапазона, измеренных на короткой высокоширотной трассе и оцененных по формуле (5). Такое сравнение дает возможность установить связь между скоростью распространения и параметрами профиля проводимости ионосферы  $h_1$  и  $h_2$ , позволяя тем самым вести непрерывный мониторинг состояния нижней ионосферы, используя электромагнитные возмущения от молниевых разрядов.

## 2. Описание эксперимента

В obs. "Ловозеро" измеряются все шесть компонент электромагнитного поля в диапазоне частот 0.01-250 Гц, в obs. "Баренцбург" – только три компоненты магнитного поля в том же частотном диапазоне. Датчики компонент  $H_x$  и  $H_y$  как в Ловозеро, так и в Баренцбурге сориентированы по компасу, компонента  $H_z$  – в северном направлении,  $H_y$  – в восточном. Компонента  $E_z$  в Ловозеро направлена вниз. Магнитное склонение в Ловозеро составляет 12° к востоку, в Баренцбурге – около 3° к востоку (Finlay et al., 2010). Географическое положение обсерваторий показано на рис. 1.

В данной работе мы перешли в универсальную, удобную для обработки, систему координат, связанную с дугой большого круга, проходящей через регистрирующие станции. В этой системе координат одна из осей,  $X'$ , направлена вдоль данной дуги большого круга в направлении от Ловозеро к Баренцбургу, а вторая,  $Y'$ , – перпендикулярно ей.

Для анализа данных мы выбрали частотный диапазон 75-125 Гц, основываясь, во-первых, на рабочем частотном диапазоне регистрирующих станций в Ловозеро и Баренцбурге, а во-вторых, на том, что максимум спектральной плотности регистрируемого низкочастотного "хвоста" атмосфера расположен в окрестности 100 Гц.

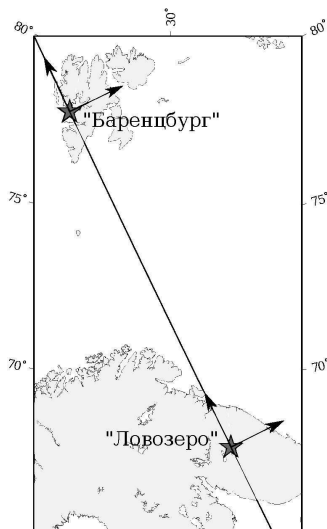


Рис. 1. Географическое положение обсерваторий "Ловозеро" и "Баренцбург"

### 3. Методика оценки скорости распространения электромагнитного возмущения

Расстояние между обсерваториями составляет примерно 1300 км, что в сравнении с окружностью Земли позволяет пользоваться приближением простой модели волновода, в которой кривизна поверхности Земли не учитывается. Расположение станций и их удаленность от главных очагов грозовой активности приводит к тому, что большинство регистрируемых электромагнитных возмущений приходит с расстояния порядка 10 000 км. Этого расстояния достаточно, чтобы считать фронт пришедшей электромагнитной волны плоским и пренебречь полями ближней зоны источника. Кроме того, рассматривая распространение электромагнитного возмущения в СНЧ диапазоне на короткой трассе, которая в основном проходит над морем, мы можем считать земную поверхность бесконечно проводящей. В силу этого при оценке скорости распространения электромагнитного возмущения вертикальной компонентой магнитного поля  $H_z$  и горизонтальными компонентами электрического поля  $E_x$  и  $E_y$  можно пренебречь. Тогда скорость распространения электромагнитного возмущения определяется так:

$$v = (l / \tau) \cos \varphi, \quad (6)$$

где  $l$  – расстояние между станциями,  $\tau$  – разность времен прихода электромагнитного сигнала на станции,  $\varphi$  – в выбранной нами системе координат угол между волновой нормалью и дугой большого круга, проходящей через регистрирующие станции.

Таким образом, для оценки скорости распространения электромагнитного возмущения, как следует из (6), нужно определить угол  $\varphi$  и время  $\tau$ . Мы будем использовать компоненты  $H_x$ ,  $H_y$  и  $E_z$ , регистрируемые в obs. "Ловозеро", для определения угла  $\varphi$ , предполагая, что он не изменяется при распространении сигнала от obs. "Ловозеро" к obs. "Баренцбург", и компоненты  $H_x$  и  $H_y$ , регистрируемые в obs. "Ловозеро" и "Баренцбург", – для определения времени  $\tau$ .

Направление волновой нормали электромагнитного возмущения в настоящей работе определяется как угол между волновой нормалью и осью  $X'$ . Учитывая, что электромагнитная мода TEM, на которой распространяется сигнал атмосферика, является поперечной (Wait, 1962), в выбранной нами системе координат этот угол можно оценить по двум горизонтальным компонентам магнитного поля как  $\varphi = \pi / 2 + \arctan(H_y / H_x)$ . Здесь  $H_x$  и  $H_y$  – значения максимумов временных форм горизонтальных компонент магнитного поля выбранного атмосферика. К сожалению, данный метод определяет этот угол с неопределенностью в  $\pm\pi$  и не дает возможности однозначно определить квадрант системы координат, в котором расположена волновая нормаль пришедшего электромагнитного возмущения. Поэтому мы воспользовались тем, что направление волновой нормали совпадает с направлением вектора Пойнтинга  $\mathbf{P}$  в принятой нами модели распространения (Wait, 1962). Вектор Пойнтинга можно записать так:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = -E_z H_y^* \mathbf{e}_x + E_z H_x^* \mathbf{e}_y,$$

где  $\mathbf{e}_x$  и  $\mathbf{e}_y$  – единичные вектора, образующие на земной поверхности ортогональный базис, "\*" означает комплексно-сопряженную величину. Угол  $\varphi$  определяется так:

$$\varphi = \begin{cases} \arctan(P_y / P_x) & P_x > 0, \\ \arctan(P_y / P_x) + \pi & P_y \geq 0, \quad P_x < 0, \\ \arctan(P_y / P_x) - \pi & P_y < 0, \quad P_x < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Соотношения (7) позволяют определять направление волновой нормали электромагнитного возмущения во всем диапазоне ее возможных направлений  $[-\pi; +\pi]$ .

Установленная в obs. "Ловозеро" и "Баренцбург" аппаратура позволяет с точностью до 1 мкс привязывать отсчеты данных к мировому времени (Пильгаев и др., 2008; Федоренко и др., 2009). Максимальная разность времен прихода атмосферика  $\tau_{\max}$  на станции будет наблюдаться при  $\varphi = 0$ , т.е. когда волновая нормаль направлена по касательной к дуге большого круга, проходящей через станции, при этом ожидаемое значение  $\tau_{\max}$  составит примерно 6 мс. Средний период анализируемого сигнала при выбранной нами частотной полосе 75-125 Гц имеет величину около 10 мс, что почти в 2 раза больше  $\tau_{\max}$ . В таких условиях, когда оценка времени распространения сигнала по трассе происходит при характерном времени распространения, меньшем его периода, следует с высокой точностью измерить и учесть задержки, вносимые аппаратурой.

Следует отметить, что антенные усилители для компонент  $H_x$  и  $H_y$  в obs. "Ловозеро" и "Баренцбург" вносят задержку примерно в 3.3 мс на частоте 100 Гц, для компоненты  $E_z$  задержка несколько меньше – примерно 1.6 мс. Для исключения этой задержки мы использовали метод, описанный в (Лебедь и др., 2011), который позволяет корректировать передаточные функции измерительных комплексов, в частности, приводить их к одинаковому виду. Суть метода заключается в том, что сначала выбирается одинаковая для всех компонент поля передаточная функция  $H(s) = B(s) / A(s)$ ,  $s = 2\pi jf$ , где  $f$  – частота,  $j = \sqrt{-1}$ . Затем передаточные функции измерительных комплексов в obs. "Ловозеро" и "Баренцбург" аппроксимируются дробно-рациональной функцией вида  $P(s)/Q(s)$ . Далее рассчитывается передаточная функция корректирующего фильтра  $W(s) = B(s)Q(s)/A(s)P(s)$ , которая преобразуется в коэффициенты БИХ-фильтра при помощи, например, билинейного преобразования или так называемого "ZOH" преобразования (Сергиенко, 2002). После прохождения сигналов компонент через корректирующий фильтр результирующие амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики измерительных каналов компонент  $H_x$ ,  $H_y$  и  $E_z$  становятся одинаковыми, поэтому задержки, вносимые аппаратурой, также становятся одинаковыми и их вклад в разность времен прихода атмосферика на станции можно не учитывать. Таким образом, приведение передаточных функций компонент поля к одинаковому виду  $H(s)$  позволяет с высокой точностью оценивать время распространения электромагнитного возмущения, необходимое для оценки его скорости распространения, даже на короткой трассе.

Оценка разности времен прихода атмосферика на станции "Ловозеро" и "Баренцбург" велась по той компоненте магнитного поля, в которой отобранные для дальнейшего анализа атмосферика имели лучшее отношение сигнал/шум в obs. "Ловозеро" и "Баренцбург".

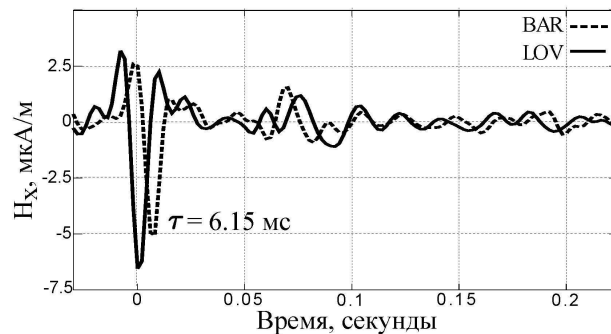


Рис. 2. Зависимость  $H_x$  компоненты атмосферика от времени в Ловозеро (сплошная линия) и Баренцбурге (пунктирная линия)

На рис. 2 приведен пример временных форм компоненты  $H_x$  атмосферика в Ловозеро и Баренцбурге за 21 февраля 2012 г. Видно, что атмосферик пришел раньше в Ловозеро, а не в Баренцбург. Оценка направления волновой нормали для данного атмосферика дала угол в  $-7^\circ$  к оси  $X'$ . Разность времен прихода электромагнитного возмущения на станции оценивалась по максимуму кросскорреляционной функции между компонентами  $H_x$  или  $H_y$  в Ловозеро и Баренцбурге. Для атмосферика, изображенного на рис. 2, она составила 6.15 мс, что не противоречит выбранной модели

распространения. Поскольку формы сигналов  $H_x$  и  $H_y$  практически одинаковые (см. рис. 2), использование кросскорреляционной функции, на наш взгляд, является оптимальным для оценки  $\tau$ .

#### 4. Результаты измерения локальной скорости распространения атмосфериков на трассе "Ловозеро – Баренцбург"

Для оценки скорости распространения электромагнитных сигналов из всего множества атмосфериков мы выбрали те, которые были одиночными и их амплитуда была больше  $4\sigma$ , где  $\sigma$  – текущее среднеквадратическое отклонение горизонтальной компоненты магнитного поля в Ловозеро. Наложение атмосфериков друг на друга может привести к искажению оценок  $\tau$  и  $\phi$ , как и малое отношение сигнал/шум.

Помимо непосредственной оценки скорости распространения атмосфериков на трассе "Ловозеро – Баренцбург" представляет интерес сравнение ее временной зависимости  $v(t)$  с временным ходом скорости, полученной из частоты шумановского резонанса,  $v_{sch}(t)$ . Скорость  $v_{sch}$  рассчитывалась согласно формуле (1). Оценка значения частоты шумановского резонанса  $f_n$  выполнялась по данным компоненты магнитного поля, направленной перпендикулярно линии большого круга, соединяющей станции "Ловозеро" и "Баренцбург", обозначенной нами ранее как  $X'$ .

На рис. 3 вверху показаны зависимости скорости распространения атмосфериков  $v_{sch}$  и  $v$  от времени, внизу – зависимости зенитных углов Солнца в Ловозеро и в Баренцбурге за период с 21 по 25 февраля 2012 г. Для зенитных углов выполнено разделение на 2 части, соответствующие освещенной (жирная линия) и неосвещенной (тонкая линия) областям на высоте 80 км.

Из рисунка видно, что зависимость  $v(t)$  имеет регулярный суточный ход. Для рассматриваемого периода времени ее значения варьируются примерно от 210 тыс. км/с днем и до 255 тыс. км/с ночью. Скорость распространения атмосфериков  $v_{sch}(t)$ , оцененная по частоте шумановского резонанса, также испытывает суточные вариации, но ее суточный ход радикально отличается от хода скорости  $v(t)$  расположением своих минимумов и максимумов. Они антикоррелируют между собой с коэффициентом  $-0.79$ . Средние значения скоростей  $v(t)$  и  $v_{sch}(t)$  составили 227 тыс. и 229 тыс. км/с соответственно. Дисперсия скорости  $v_{sch}(t)$  оказалась примерно в 3.5 раза меньше дисперсии скорости  $v(t)$ . Все это свидетельствует в пользу гипотезы о преимущественном влиянии участка волновода Земля-ионосфера в окрестности трассы "Ловозеро – Баренцбург" на скорость распространения по трассе электромагнитных возмущений от удаленного источника.

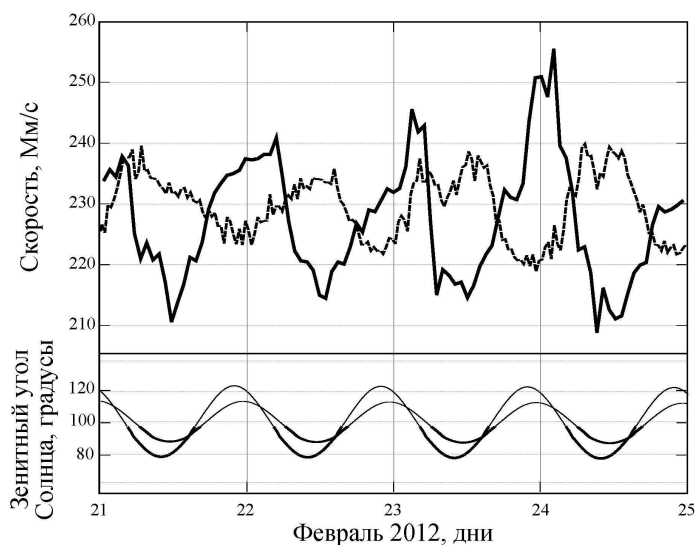


Рис. 3. Вверху – зависимости скорости распространения атмосфериков между Ловозеро и Баренцбургом  $v$  (сплошная линия) и средней скорости распространения  $v_{sch}$  (пунктирная линия) от времени. Внизу – временные зависимости зенитных углов Солнца в Ловозеро и Баренцбурге

Времена локального полдня и полночи в Ловозеро и Баренцбурге различаются всего на 2 часа. С ними практически совпадают минимумы и максимумы скорости распространения атмосфериков на трассе "Ловозеро – Баренцбург". Этот факт свидетельствует о связи скорости распространения электромагнитных возмущений с состоянием D-слоя нижней ионосферы, который в основном контролируется уровнем освещенности на высотах 50-100 км.

## 5. Обсуждение результатов

Наличие суточного хода в локальных скоростях распространения атмосфериков по короткой трассе "Ловозеро – Баренцбург" во время, свободное от геомагнитных возмущений и вспышек на Солнце, свидетельствует о регулярных изменениях параметров волновода Земля-ионосфера в окрестности трассы. О том же свидетельствует и наблюдаемое совпадение суточного хода локальной скорости распространения атмосфериков с суточным ходом зенитного угла в Ловозеро и Баренцбурге, связывающее его возникновение с освещенностью трассы распространения Солнцем. С целью проверки гипотезы о влиянии свойств волновода в окрестности трассы распространения на локальную скорость распространения мы воспользовались моделью распространения электромагнитных волн в волноводе, учитывающую изменения нижней ионосферы в течение суток (Sentman, 1990; Greifinger, Greifinger, 1978).

Экспериментально полученная скорость распространения атмосфериков по трассе "Ловозеро – Баренцбург" является средней скоростью вдоль трассы  $\bar{v}_m$ .

$$\bar{v}_m = \frac{l}{\int_0^l \frac{dx}{v_m(x)}},$$

где  $l$  – расстояние между станциями "Ловозеро" и "Баренцбург", а  $v_m(x)$  – скорость на участке  $dx$ .

На рис. 4 показаны зависимости скоростей распространения электромагнитных возмущений на трассе "Ловозеро – Баренцбург" по экспериментальным данным и данным модели с двухвысотным профилем проводимости от времени за период с 21 по 25 февраля 2012 г.

Из рисунка видно, что суточные ходы с высокой степенью точности совпадают. Наблюдается сдвиг всего в 0.9 часа, а коэффициент корреляции составляет примерно 0.89. Значения скоростей, полученных по экспериментальным данным, несколько ниже, чем полученные по модели.

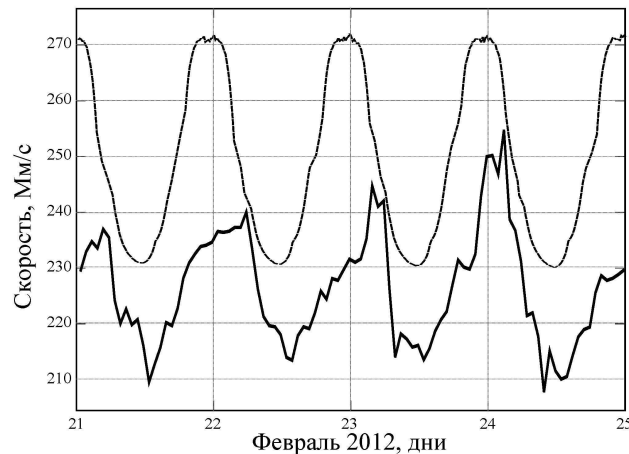


Рис. 4. Зависимости скоростей распространения электромагнитных возмущений на трассе "Ловозеро – Баренцбург" по экспериментальным данным (сплошная линия) и данным модели с двухвысотным профилем проводимости (пунктирная линия) от времени

Среднее значение скорости  $v_{model}(t)$  составило примерно 249 тыс. км/с, что на 22 тыс. км/с больше скорости  $v(t)$ . Это может быть связано либо с неточностью модели, связывающей ионосферный профиль проводимости со скоростью распространения ТЕМ-моды (Sentman, 1996), либо с ошибкой расчета профиля по модели IRI-2012 на высотах менее 90-100 км, которая практически не учитывает изменения параметров нижней ионосферы во время авроральных возмущений. Однако сам факт совпадения временных ходов измеренной скорости распространения с рассчитанной по модели позволяет предположить, что наши измерения дают возможность практически непрерывно оценивать локальные изменения профиля проводимости нижней ионосферы в авроральной зоне.

## 6. Заключение

Экспериментально оценена скорость распространения атмосфериков на короткой высокоширотной трассе "Ловозеро – Баренцбург". Установлено, что изменения скорости распространения атмосфериков антикоррелируют со скоростью, рассчитанной по частотам первого шумановского резонанса, характеризующего среднюю по земному шару скорость распространения электромагнитных возмущений в волноводе Земля-ионосфера, и линейно связаны с коэффициентом

корреляции 0.89 и небольшим сдвигом во времени в 0.9 часа с изменениями скорости, рассчитанной с использованием модели IRI. Значения измеренной скорости ниже рассчитанной примерно на 10 %, что может быть связано с неточностью оценки профиля нижней ионосферы по модели IRI. Отсюда следует, что изменения измеренной на короткой трассе скорости определяются профилем проводимости нижней ионосферы в окрестности этой трассы, что дает возможность практически непрерывного мониторинга изменений состояния нижней ионосферы в высоких широтах.

## Литература

- Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T.** The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future. *J. Geodesy*, v. 85, p. 909-920, 2011.
- Dmitriev V.I.** Modelling the effect of the ionosphere on electromagnetic sounding. *Computational Mathematics and Modeling*, v. 20, N 4, p. 373-382, 2009.
- Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D. et al.** International Geomagnetic Reference Field: The eleventh generation. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. *Geophys. J. Int.*, v. 183, iss. 3, p. 1216-1230, 2010.
- Fullekrug M., Fraser-Smith A.C., Schlegel K.** Global ionospheric D-layer height monitoring. *Europhys. Lett.*, v. 59(4), p. 626-632, 2002.
- Greifinger C., Greifinger P.** Approximate method for determining ELF eigenvalues in the earth-ionosphere cavity. *Radio Sci.*, v. 13, p. 831, 1978.
- Greifinger P.S., Mushtak V.C., Williams E.R.** On modeling the lower characteristic ELF altitude from aeronomical data. *Radio Science*, v. 42, p. RS2S12, 2007.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.** NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, v. 107(A12), p. 1468, 2002.
- Schumann W.O.** On the radiation free self-oscillations of a conducting sphere, which is surrounded by an air layer and an ionospheric shell. *Zeitschrift und Naturforschung*, v. 7a, p. 149-154, 1952 (in German).
- Sentman D.D.** Approximate Schumann resonance parameters for a two-scale-height ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 52, N 1, p. 35-46, 1990.
- Sentman D.D.** Schumann resonance spectra in a two-scale-height Earth-ionosphere cavity. *JGR*, v. 101, N D5, p. 9479-9487, April 27, 1996.
- Rawer K., Bilitza D., Ramakrishnan S.** Goals and status of the international reference ionosphere. *Rev. Geophys.*, v. 16, p. 177-181, 1978.
- Wait J.R.** Electromagnetic waves in stratified media. *New York, Macmillan Co.*, 372 p., 1962.
- Гуревич А.В., Швацбург А.Б.** Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. *М., Наука*, 272 с., 1973.
- Лебедь О.М., Зубов Р.А., Федоренко Ю.В.** Суточные вариации отношения E/H, наблюдаемые в Ловозеро в диапазоне частот 150-200 Гц. *Электронный ресурс ФГОУВПО МГТУ 03211, Информреестр*, 0321100504, с. 232-239, 2011.
- Митра А.** Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. *М., Мир*, 370 с., 1977.
- Никольский В.В., Никольская Т.И.** Электродинамика и распространение радиоволн. *М., Наука*, Гл. ред. физ.-мат. лит., 544 с., 1989.
- Пильгаев С.В., Ахметов О.И., Филатов М.В., Федоренко Ю.В.** Универсальное устройство синхронизации данных от GPS приемника. *ИТЭ*, т. 3, с. 175-176, 2008.
- Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. *СПб., Пупер*, 606 с., 2002.
- Федоренко Ю.В., Пильгаев С.В., Филатов М.В., Ахметов О.И.** Прецизионный четырехканальный 22-разрядный аналого-цифровой преобразователь на основе AD7716. *ИТЭ*, т. 4, с. 179-180, 2009.

## References

- Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T.** The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future. *J. Geodesy*, v. 85, p. 909-920, 2011.
- Dmitriev V.I.** Modelling the effect of the ionosphere on electromagnetic sounding. *Computational Mathematics and Modeling*, v. 20, N 4, p. 373-382, 2009.
- Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D. et al.** International Geomagnetic Reference Field: The eleventh generation. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. *Geophys. J. Int.*, v. 183, iss. 3, p. 1216-1230, 2010.
- Fullekrug M., Fraser-Smith A.C., Schlegel K.** Global ionospheric D-layer height monitoring. *Europhys. Lett.*, v. 59(4), p. 626-632, 2002.



- Greifinger C., Greifinger P.** Approximate method for determining ELF eigenvalues in the earth-ionosphere cavity. *Radio Sci.*, v. 13, p. 831, 1978.
- Greifinger P.S., Mushtak V.C., Williams E.R.** On modeling the lower characteristic ELF altitude from aeronautical data. *Radio Science*, v. 42, p. RS2S12, 2007.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.** NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, v. 107(A12), p. 1468, 2002.
- Schumann W.O.** On the radiation free self-oscillations of a conducting sphere, which is surrounded by an air layer and an ionospheric shell. *Zeitschrift und Naturforschung*, v. 7a, p. 149-154, 1952 (in German).
- Sentman D.D.** Approximate Schumann resonance parameters for a two-scale-height ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 52, N 1, p. 35-46, 1990.
- Sentman D.D.** Schumann resonance spectra in a two-scale-height Earth-ionosphere cavity. *JGR*, v. 101, N D5, p. 9479-9487, April 27, 1996.
- Rawer K., Bilitza D., Ramakrishnan S.** Goals and status of the international reference ionosphere. *Rev. Geophys.*, v. 16, p. 177-181, 1978.
- Wait J.R.** *Electromagnetic waves in stratified media*. New York, Macmillan Co., 372 p., 1962.
- Gurevich A.V., Shvatsburg A.B.** *Nelineynaya teoriya rasprostraneniya radiovoln v ionosfere* [Nonlinear theory of the propagation of radio waves in the ionosphere]. M., Nauka, 272 p., 1973.
- Lebed O.M., Zubov R.A., Fedorenko Yu.V.** Sutochnyie variatsii otnosheniya E/H, nablyudaemye v Lovozero v diapazone chastot 150-200 Gts [Daily variations in the ratio E/H observed in Lovozero in the frequency range 150-200 Hz]. *Elektronnyy resurs FGOUVPO MGTU 03211, Informregistr, 0321100504*, p. 232-239, 2011.
- Mitra A.** *Vozdeystvie solnechnykh vspyishek na ionosferu Zemli* [Effects of solar flares on the Earth's ionosphere]. M., Mir, 370 p., 1977.
- Nikolskiy V.V., Nikolskaya T.I.** *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and Propagation]. M., Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 544 p., 1989.
- Pilgaev S.V., Ahmetov O.I., Filatov M.V., Fedorenko Yu.V.** *Universalnoe ustroystvo sinhronizatsii dannykh ot GPS priemnika* [Universal device for synchronizing data from the GPS receiver]. *PTE*, v. 3, p. 175-176, 2008.
- Sergienko A.B.** *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. SPb., Piter, 606 p., 2002.
- Fedorenko Yu.V., Pilgaev S.V., Filatov M.V., Ahmetov O.I.** *Pretsizionnyy chetyrehkanalnyy 22-razryadnyy analogo-tsifrovoy preobrazovatel na osnove AD7716* [Precision quad 22-bit analog-to-digital converter based on the AD7716]. *PTE*, v. 4, p. 179-180, 2009.

#### **Информация об авторах**

**Лебедь Ольга Михайловна** – Полярный геофизический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник, e-mail: olgamihsh@yandex.ru

**Lebed O.M.** – Polar Geophysical Institute KSC RAS, Junior Researcher, e-mail: olgamihsh@yandex.ru

**Кузнецова Марина Владимировна** – Полярный геофизический институт КНЦ РАН, конструктор, e-mail: kuznetsova@pgia.ru

**Kuznetsova M.V.** – Polar Geophysical Institute KSC RAS, Designer, e-mail: kuznetsova@pgia.ru

**Федоренко Юрий Валентинович** – Полярный геофизический институт КНЦ РАН, канд. физ.-мат. наук, зав. сектором, доцент, e-mail: yury.fedorenko@gmail.com

**Fedorenko Yu.V.** – Polar Geophysical Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Head of Department, Associate Professor, e-mail: yury.fedorenko@gmail.com

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

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