

## ПРИМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ЧАСТОТЫ СОУДАРЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ С УЧЕТОМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Е.В. Михалёва, А.С. Крюковский, Д.В. Растягаев**

АНО ВО «Российский новый университет», Москва, Россия  
kryukovsky56@yandex.ru

## APPLICATION OF AMPLITUDE DATA TO RECONSTRUCTION OF THE EFFECTIVE ELECTRON COLLISION FREQUENCY IN IONOSPHERIC PLASMA TAKING INTO ACCOUNT THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

**E.V. Mikhaleva, A.S. Kryukovsky, D.V. Rastyagaev**

Autonomous Non-commercial Organisation of Higher Education “Russian New University”, Moscow, Russia  
kryukovsky56@yandex.ru

**Аннотация.** На основе амплитудных данных о поглощении частотно-модулированного радиосигнала при вертикальном зондировании ионосферы развит метод восстановления эффективной частоты соударений электронов с учетом магнитного поля Земли. Проведено восстановление эффективной частоты соударений по данным об отражении обыкновенной волны от ионосферного слоя.

**Ключевые слова:** ионосфера, эффективной частоты соударений, зондирование, бихарактеристики, радиосигнал, расходимость, обыкновенная и необыкновенная волны.

**Abstract.** Based on the amplitude data on the absorption of a frequency-modulated radio signal during vertical sounding of the ionosphere, a method has been developed for reconstructing the effective frequency of electron collisions, taking into account the Earth's magnetic field. The effective collision frequency has been reconstructed from data on the reflection of an ordinary wave from the ionospheric layer.

**Keywords:** ionosphere, effective collision frequency, sounding, bicharacteristics, radio signal, divergence, ordinary and extraordinary waves.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена необходимостью осуществления мониторинга экстремальных явлений в атмосфере Земли [Ryabova et al., 2020]. Использование ионозондов вертикального зондирования (ВЗ) — один из наиболее эффективных и апробированных методов диагностики ионосферы [Danilkin et al., 2005; Cedrik et al., 2020]. В работе рассмотрен метод восстановления по данным ВЗ эффективной частоты соударений электронов в ионосферной плазме.

### АМПЛИТУДНЫЙ МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЧАСТОТЫ СОУДАРЕНИЙ

Эффективная частота соударений электронов  $\nu_e$  определяет поглощение  $\psi$ , а оно, в свою очередь, определяет амплитуду  $A$  сигнала, пришедшего в приемник после отражения от ионосферных слоев. С поглощением амплитуда связана формулой [Бова и др., 2019; Крюковский и др., 2022]

$$A = E_0 D \exp[-\psi], \quad (1)$$

где  $E_0$  — начальная амплитуда поля вне ионосферной плазмы на расстоянии  $r_0$  от источника;  $D$  — расходимость лучевого потока. Предположим, что источник излучения расположен в начале координат, и для простоты будем считать среду изотропной. Тогда [Крюковский и др., 2022; Kryukovsky et al., 2021]

$$E_0 = \frac{\sqrt{30W}}{r_0} \text{ [В/м]}, \quad (2)$$

где  $W$  — мощность излучателя. Далее для определенности будем считать, что  $W=1$  кВт.

Поскольку  $A$  и  $E_0$  известны, для того чтобы найти поглощение  $\psi$ , необходимо вычислить расходимость  $D$ . Для этого необходимо решить систему бихарактеристических уравнений Гамильтона — Лукина [Бова и др., 2019], дополненную начальными условиями. Результатом решения систем являются зависимости  $\vec{r}(t)$  и  $\vec{k}(t)$  для каждой выбранной частоты. Однако для определения расходимости  $D$  необходимо также знать производные  $\vec{r}(t)$  и  $\vec{k}(t)$  по углам  $\zeta$  и  $\eta$ . Эти величины можно найти, решая расширенную бихарактеристическую систему Лукина с начальными условиями [Крюковский и др., 2012].

После решения бихарактеристической системы можно найти расходимость  $D$ , которая вычисляется как корень из отношения якобиана  $J_0$  к  $J$  [Бова и др., 2019]. В отличие от [Крюковский и др., 2022; Kryukovsky et al., 2021], в данной работе учитывалось магнитное поле Земли и эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения задавалась в виде формулы Эпплтона — Хартри — Лассена.

В работе рассмотрена модель электронной концентрации  $N(z)$  (рис. 1). Зависимость электронной концентрации от высоты показана дважды, красной линии и градациями фона (рис. 1). Максимум слоя F1 расположен на высоте  $\sim 196$  км, а максимум слоя F2 — на высоте  $\sim 263$  км.

Зная начальную амплитуду  $E_0$  и амплитуду  $A$ , можно, после вычисления расходимости  $D$ , перейти к определению эффективной частоты соударений  $\nu_e$ ,

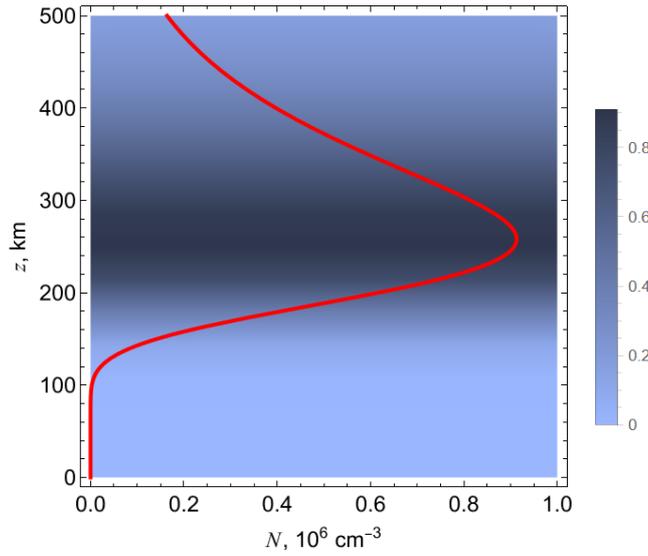


Рис. 1. Зависимость электронной концентрации от высоты

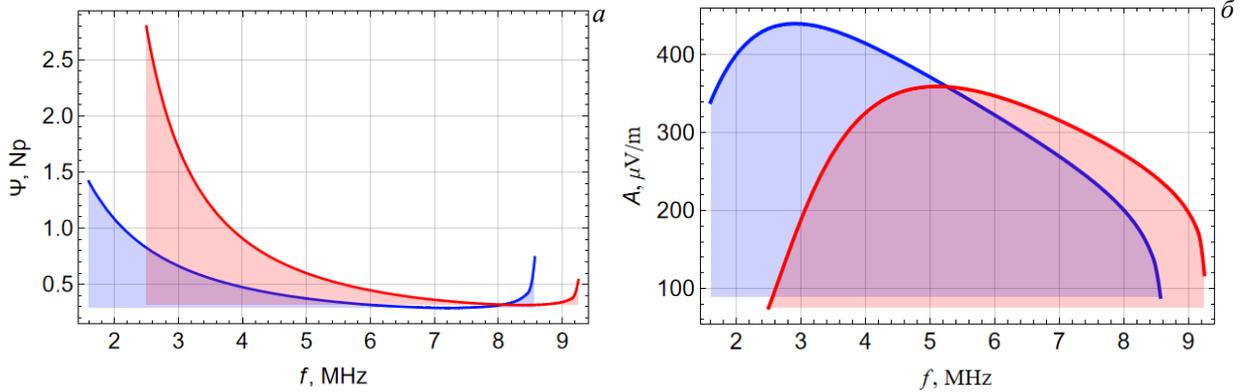


Рис. 2. Зависимость от частоты  $f$ :  $a$  — поглощения  $\psi$ ;  $b$  — амплитуды сигнала  $A$

т. е. восстановить зависимость  $v_e$  от высоты. Считается, что поглощение волны вдоль лучевой траектории пропорционально интегралу от мнимой части показателя преломления [Дэвис, 1973].

Если предположить, что мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости много меньше вещественной и пренебречь влиянием внешнего магнитного поля, можно получить упрощенное выражение

$$\psi'(t) \approx \tilde{\psi}'(t) = -\frac{\omega}{2} \varepsilon_2, \quad \varepsilon_2 = \text{Im } \varepsilon_r. \quad (3)$$

Для восстановления эффективной частоты соударений использовалась формула (3). По ранее произведенным вычислениям получаем интегральное уравнение Вольтерра второго рода относительно функции  $G = v_e N_e$ . Для решения данного уравнения был применен метод итераций [Крюковский др., 2022; Kryukovsky et al., 2020, 2021], причем, поскольку существует нижняя граница ионосферы  $z(t_{m0})$ , ниже которой электронная концентрация равна нулю, то до частоты  $f_0$ , для которой время  $t_m$  равно  $t_{m0}$ , интеграл в левой части уравнения Вольтерра второго

рода равен нулю.

После вычислений  $G_j$  эффективная частота соударений находится делением  $G_j$  на значение электронной концентрации  $N(z)$  в соответствующей точке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2,  $a$  показана зависимость от частоты  $f$  поглощения  $\psi$ , а на рис. 2,  $b$  — амплитуды сигналов для обыкновенной (синяя линия) и необыкновенной (красная линия) волны. Амплитуда сигнала, отраженного от ионосферы, с увеличением частоты сначала растет, а потом убывает (рис. 2,  $b$ ). В правой части рис. 2,  $b$  видно, что амплитуда необыкновенной волны превышает амплитуду обыкновенной волны.

Перейдем теперь к результатам восстановления эффективной частоты соударений. На рис. 3,  $a$  показаны результаты моделирования зависимости эффективной частоты соударений  $v_e$  от высоты  $z$  для обыкновенной волны: белая линия соответствует исходным значениям  $v_e$ , черная линия — результатам моделирования. На рис. 3,  $b$  показаны зависимость ло-

гарифма эффективной частоты соударений от высоты (белая линия) и интерполяционные кривые, построенные по исходным данным (красная линия) и по результатам моделирования (синяя линия). Видно хорошее совпадение интерполяционных кривых.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе амплитудных данных об ослаблении частотно-модулированного (ЧМ) радиосигнала при вертикальном зондировании ионосферы Земли разработан метод реконструкции эффективной частоты соударений электронов.

Проведено восстановление эффективной частоты соударений по данным обыкновенной волны. Исследованы параметры радиосигналов в точке приема. Получено хорошее совпадение исходных значений эффективной частоты соударений и расчетных значений.

Исследование выполнялось в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00299).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Распространение частотно-модулированного излучения электромагнитных волн в ионосфере Земли с учетом поглощения и внешнего магнитного поля. *Радиотехника и электроника*. 2019. Т. 64, № 1. С. 3–14.

Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973. 502 с.

Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме. *Радиотехника и электроника*. 2012. Т. 57, № 9. С. 1028–1034.

Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалева Е.В., Растягаев Д.В. Развитие метода восстановления эффективной частоты соударений электронов в ионосферной плазме. *Радиотехника и электроника*. 2022. Т. 67, № 2. С. 117–129.

Cedrik M., Podlesnyi A., Kurkin V. The different scale TIDs diagnostics based on chirp-signals amplitude measurements data in vertical and near-vertical ionosphere sounding. *Proceedings 2020 7<sup>th</sup> All-Russian Microwave Conference (RMC)*. Russia, Moscow, November 25–27, 2020. 2020. P. 260–262.

Danilkin N.P., Denisenko P.F., Barabashov B.G., Vertogradov G.G. Electron collision frequency and HF-waves attenuation in the ionosphere. *Intern. J. Geomag. Aeron.* 2005. Vol. 5, no. 3. P. GI3009.

Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Mikhaleva E.V., et al. Diagnostics of the effective frequency of electronic collisions in the ionosphere based on analysis of the amplitude characteristics of continuous linear frequency modulated radio signals. *Proceedings 2020 7<sup>th</sup> All-Russian Microwave Conference (RMC)*. November 25–27, 2020, Moscow, Russia. 2020. P. 211–215.

Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Mikhaleva E.V., Rastyagaev D.V. Application of the bi-characteristic method for reconstructing the effective frequency of electron collisions in the ionosphere. *J. Phys.: Conference Ser. "Russian Open Scientific Conference "Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction", MPRSRWPD 2021"*. 2021. P. 012001.

Ryabova M.I., Ivanov D.V., Chernov A.A., Ovchinnikov V.V. Experimental study of phase-frequency responses of HF radio channels with the use of SDR Ionosonde. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Svetlogorsk, Russia, 2020. P. 1–4.