

Том I, с. 502–505

УДК: 551.510.535 + 551.510.413.5

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ D-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ДВУХЧАСТОТНОЙ СДВ ТРАССЕ

Ю. В. Поклад, Б. Г. Гаврилов, В. М. Ермак, А. Н. Ляхов, В. А. Рыбаков,  
И. А. Ряховский

*Институт динамики геосфер РАН, 119334, Ленинский проспект, 38, корпус 1, Москва, Россия  
E-mail: poklad@mail.ru*

**Аннотация.** В работе приводится методика восстановления профиля электронной концентрации D-слоя ионосферы по измерениям вариаций амплитуды и фазы радиосигнала СДВ диапазона на двух частотах во время рентгеновской вспышки X-класса.

**Ключевые слова:** ионосфера; распространение радиоволн; рентгеновская вспышка

## RECOVERY OF THE PARAMETERS OF THE D-LAYER OF THE IONOSPHERE ACCORDING TO THE AMPLITUDE-PHASE MEASUREMENTS ON THE DUAL-FREQUENCY VLF PATH

Yu. V. Poklad, B. G. Gavrilov, V. M. Ermak, A. N. Lyakhov, V. A. Rybakov,  
I. A. Ryakhovskiy

**Abstract.** The paper presents a technique for recovery of the electron concentration profile of the D-layer of the ionosphere from measurements of the amplitude and phase variations of the VLF radio signal at two frequencies during a solar X-ray flash.

**Keywords:** ionosphere; radio wave propagation; x-ray flash

### Введение

Задача измерения параметров D-области ионосферы является актуальной для современной геофизики. Параметры D-слоя ионосферы влияют на распространение сигналов как в СДВ диапазоне, так и на более коротких длинах волн. Экспериментальные исследования нижней ионосферы связаны с рядом трудностей. Высота D-слоя составляет 60-90 км, что делает невозможным использование аэростатов и спутников. Относительно низкие электронные концентрации (порядка  $10^3 \text{ см}^{-3}$ ) ограничивают использование ионозондов. Одним из способов мониторинга состояния D-слоя ионосферы является прием сигналов в СДВ диапазоне, которые распространяются в волноводе Земля-ионосфера, верхней стенкой которого и является D-слой.

Одной из основных характеристик ионосферы является высотный профиль электронной концентрации. В настоящее время существует множество теоретических и эмпирических моделей расчета высотного профиля электронной концентрации D-слоя и одной из актуальных задач исследований является их верификация по экспериментальным данным.

Одним из способов описания высотного профиля электронной концентрации D-слоя ионосферы является двухпараметрическая модель нижней ионосферы Уайта [1]. В этой модели распределение электронной концентрации с высотой может быть определено выражением (1).

$$Ne(z)[\text{см}^{-3}] = 1.49 \cdot 10^7 \cdot e^{(\beta-0.15)(z-h')} e^{-0.15h'} \quad (1)$$

где  $\beta$  ( $\text{км}^{-1}$ ) – скорость увеличения электронной плотности с высотой,  $h'$  (км) – эффективная высота отражения,  $z$  (км) – высота. Для расчета амплитуды и фазы сигналов от СДВ передатчиков использовалась программа LWPC [2].

Целью данной работы является восстановление с помощью программы LWPC параметров  $\beta$  и  $h'$  высотного профиля электронной концентрации D-слоя по вариациям амплитуды и фазы сигнала на двухчастотной СДВ трассе.

### Экспериментальные результаты и их обработка

В ГФО «Михнево» ведется мониторинг сигналов СДВ передатчиков [3]. Среди них есть две радиостанции, расположенные в Великобритании, расстояние между которыми составляет 32 км. Эти станции, называемые GQD и GBZ, работают на частотах 22.1 кГц и 19.58 кГц соответственно. Длина трассы до ГФО «Михнево» составляет порядка 2600 км. Можно считать, что сигналы от этих двух станций распространяются по одной трассе. На рис. 1 показаны вариации амплитуды и фазы сигналов от этих станций, принятых в ГФО «Михнево» 10.09.2017 г. В этот день, примерно в 16 часов мирового времени на Солнце произошла рентгеновская вспышка класса X8.3.

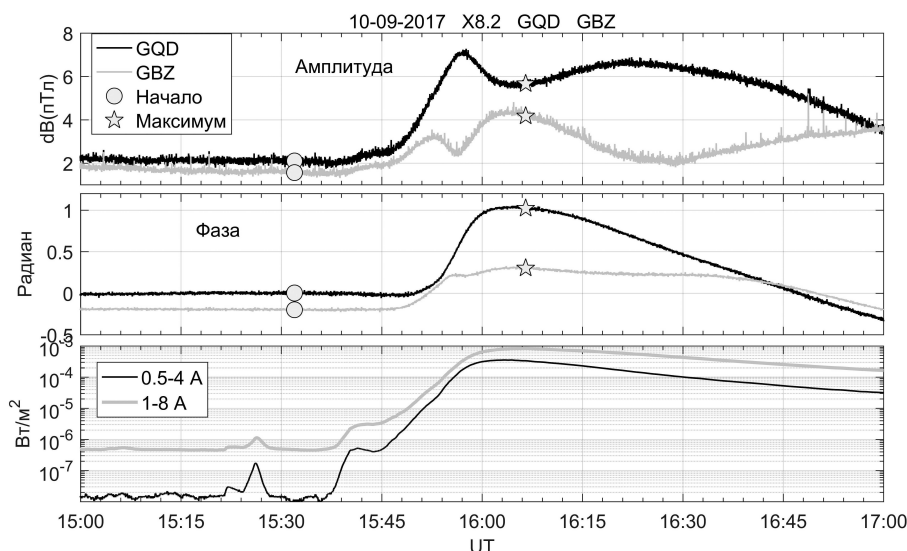


Рис. 1. Амплитуда и фаза сигналов. Поток GOES на нижней панели.

Поскольку нам не известны мощность и начальная фаза передатчиков, рассчитаем вариацию амплитуды и фазы сигналов относительно времени начала вспышки  $t_0=15:31:58$  UT. Пусть:

$$\begin{aligned} dA_i(t) &= A_i^*(t) - A_i^*(t_0) \\ dP_i(t) &= P_i^*(t) - P_i^*(t_0) \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A_i^*$  и  $P_i^*$  – измеренные значения амплитуды и фазы сигналов станций GQD ( $i=1$ ) и GBZ ( $i=2$ ). Исходя из предположения, что параметры ионосферы  $h'$  и  $\beta$  одинаковы по всей трассе, по программе LWPC были рассчитаны амплитуды  $A_i(h', \beta)$  и фазы  $P_i(h', \beta)$  сигналов от станций GQD и GBZ в зависимости от величины  $h'$  и  $\beta$ . Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Пусть  $h'_0$  и  $\beta_0$  параметры ионосферы в начальный момент времени  $t_0$ , а  $h'_{\max}$  и  $\beta_{\max}$  в момент максимума вспышки  $t_{\max}=16:06:30$  UT. Найдем все пары точек  $(h'_0, \beta_0)$  и  $(h'_{\max}, \beta_{\max})$  которые удовлетворяют условию:

$$\begin{cases} |A_i(h'_{\max}, \beta_{\max}) - A_i(h'_0, \beta_0) - dA_i(t_{\max})| < \delta A \\ |P_i(h'_{\max}, \beta_{\max}) - P_i(h'_0, \beta_0) - dP_i(t_{\max})| < \delta P \end{cases} \quad (3)$$

где  $\delta A=0.12$  дБ и  $\delta P=0.06$  радиан – точность оценки параметров ионосферы. При этом предполагается, что начальные параметры ионосферы лежат в диапазоне  $66 < h'_0 < 77$  и  $0.23 < \beta_0 < 0.36$ , а параметры ионосферы во время максимума вспышки лежат в диапазоне  $54 < h'_{\max} < 68$  и  $0.34 < \beta_{\max} < 0.8$ . Это семейство точек показано на рис. 3 черным цветом. Так же на этом рисунке тонкими черными прямоугольниками показаны области возможных параметров ионосферы в начальный момент и момент максимума вспышки. Среди найденных точек  $(h'_0, \beta_0)$  найдем такие,

для которых можно найти точки  $(h'_t, \beta_t)$

$$\begin{cases} |A_i(h'_t, \beta_t) - A_i(h'_0, \beta_0) - dA_i(t)| < \delta A \\ |P_i(h'_t, \beta_t) - P_i(h'_0, \beta_0) - dP_i(t)| < \delta P \end{cases} \quad (4)$$

где  $t_0 < t < t_{max}$ . Это семейство точек показано на рис. 3 красным цветом.

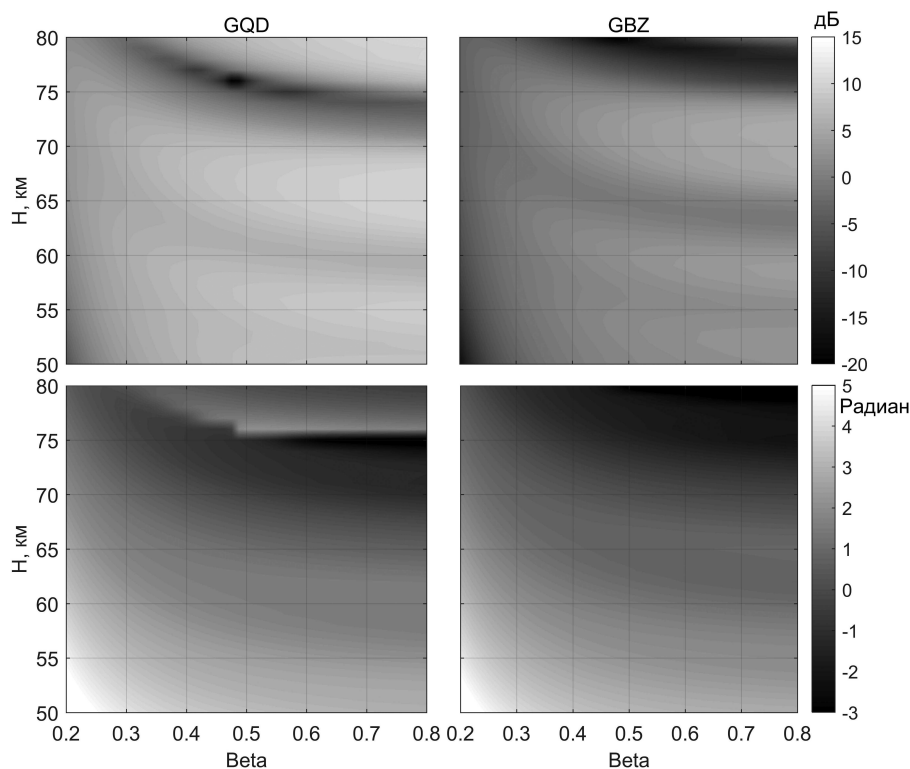


Рис. 2. Расчетные значения амплитуды (верхние панели) и фазы (нижние панели) сигналов станций GQD и GBZ.

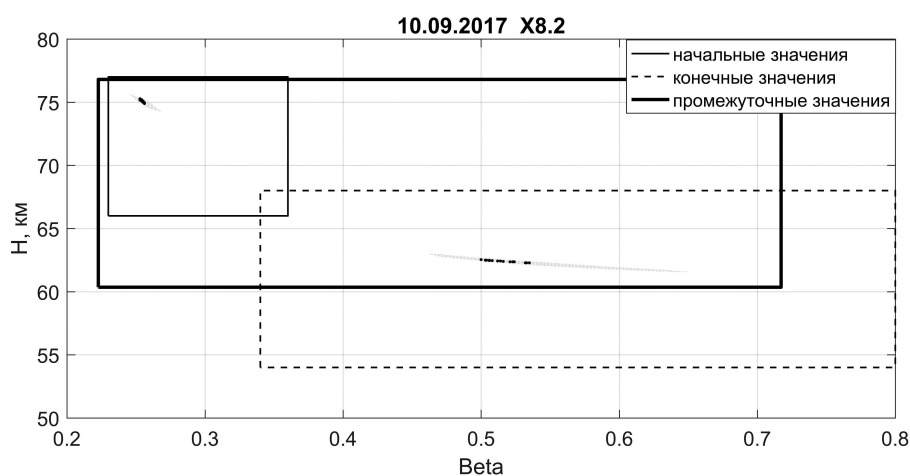


Рис. 3. Значения  $h'$  и  $\beta$ , при которых расчетные значения вариаций амплитуды и фазы сигналов в начале и максимуме вспышки совпадают с измеренными вариациями (показаны серым). Черным цветом выделены значения  $h'$  и  $\beta$ , для которых совпадают и промежуточные значения вариаций.

### Обсуждение результатов и выводы

Из рис. 3 видно, что начальные параметры ионосферы лежат в очень узком диапазоне – примерно 0.5 км по  $h'$  и 0.005 по  $\beta$ . Разброс параметров ионосферы в момент максимума вспышки примерно такой же по  $h'$  и в 7 раз больше по  $\beta$  (около 0.035). Это связано с тем, что вспышка была достаточно мощная и в момент максимума потока рентгеновского излучения «жесткость» верхней стенки волновода стала настолько большой, что ее дальнейшее увеличение уже фактически перестало влиять на амплитудно-фазовые характеристики принимаемых сигналов. На рис. 4 показан временной ход параметров  $h'$  и  $\beta$  во время вспышки. Зависимость эффективной высоты отражения  $h'$  и «жесткости» верхней стенки волновода  $\beta$  от максимума потока рентгеновского излучения исследовалась в [4, 5]. Значения  $h'$  и  $\beta$  для максимального потока рентгеновского излучения согласно этим работам, приведены на рис. 4 и находятся в хорошем соответствии с нашими расчетами. Следует так же отметить, что наша методика позволяет не только оценить параметры ионосферы во время рентгеновской вспышки, но и получить значения  $h'$  и  $\beta$  для не возмущенных условий предшествующих этому событию.

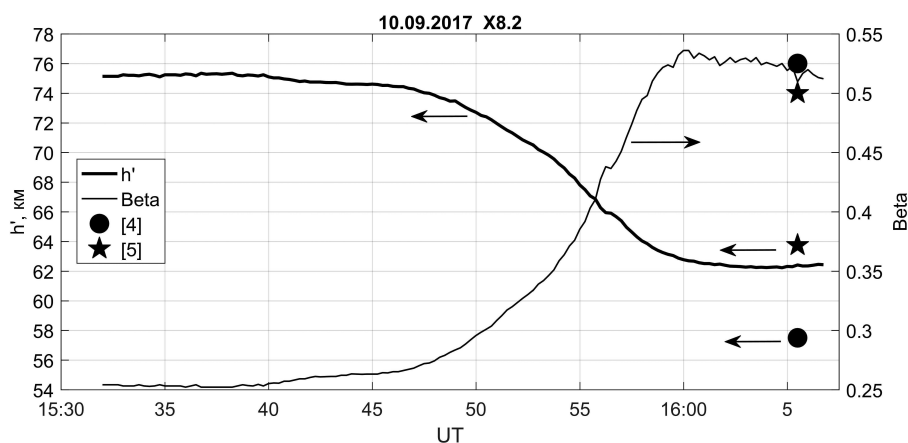


Рис. 4. Временная зависимость вариаций значений  $h'$  и  $\beta$  во время вспышки. Кружками и звездочками нанесены оценки согласно [4, 5].

### Благодарности

Работа выполнена по госзаданию № 0146-2017-0013.

### Список литературы

1. Wait, J. R., Spies, K. P., Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. NBS Tech. Note 300, 1964.
2. Ferguson, J. A., Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength RadioCommunications, Version 2.0., Technical document 3030, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, 1998.
3. Поклад Ю.В., Рыбаков В.А., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Крашенинников А.В., Ряховский И.А., Соловьев С.П. Влияние солнечных рентгеновских вспышек на изменения атмосферного электрического поля и прохождение волн СДВ диапазона. Динамические процессы в геосферах. 2015, выпуск 7, с.161-167.
4. Thomson, N.R., Rodger, C.J., Clilverd, M.A. Large solar flares and their ionospheric D region enhancements. J. Geophys. Res. 110, A06306 (2005). DOI:10.1029/2005JA011008.
5. Ashutosh K. Singh A.K. Singh Rajesh Singh R.P. Singh. Solar Flare induced D-region ionospheric perturbations evaluated from VLF measurements. Astrophys Space Sci (2014) 350:1-9. DOI: 10.1007/s10509-013-1699-4.