

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.030

## СРАВНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА БЛИЗКИХ ТРАССАХ ПО ДАННЫМ ПРИЕМА СДВ ПЕРЕДАТЧИКОВ В ДВУХ ПУНКТАХ

Ю.В. Поклад, Н.С. Ачкасов, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, Е.Н. Козакова, И.А. Ряховский

ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия  
E-mails: poklad@mail.ru, boris.gavrilov34@gmail.com, ryakhovskiy88@yandex.ru

### Аннотация

Экспериментальные исследования нижней ионосферы и определение ее параметров является актуальной задачей и имеет важное научное и прикладное значение. Солнечные рентгеновские вспышки приводят к значительным изменениям в D-области ионосферы. В работе сравниваются параметры ионосферы на различных трассах распространения СДВ сигналов, принятых в обсерваториях «Михнево» и «Ульяновка» во время солнечной вспышки 03.07.2021. Показано, что разработанная методика восстановления параметров ионосферы применима к близкорасположенным трассам различной длины.

### Введение

СДВ радиоволны распространяются в волноводе Земля-ионосфера и обладают очень малым затуханием. В дневных условиях верхней стенкой волновода является D-область ионосферы. Поэтому состояние D-области оказывает непосредственное влияние на характеристики принимаемых СДВ сигналов. Одной из широко распространенных моделей нижней ионосферы, описывающих высотный профиль электронной концентрации, является двухпараметрическая модель Фергюсона-Уайта [Wait and Spies, 1964; Ferguson, 1995]. В этой модели зависимость электронной концентрации  $N_e$  от высоты  $h$  описывается следующим уравнением:

$$N_e = N_{e0} e^{(\beta - 0.15)(z - h')} e^{-0.15h'}$$

где  $N_{e0} = 1.43 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ ,  $h'$  - эффективная высота отражения и  $\beta$  — крутизна профиля или скорость нарастания электронной концентрации.

В ряде работ [McRae and Thomson, 2004; Thomson et al., 2005; Grubor et al., 2008] показана возможность восстановления параметров нижней ионосферы во время рентгеновских вспышек в рамках модели Фергюсона-Уайта. При этом, предполагалось, что начальное состояние ионосферы соответствует среднему значению:  $h' = 72 \text{ км}$  и  $\beta = 0.3 \text{ км}^{-1}$ . В [Гаврилов и др., 2019] была предложена методика восстановления параметров D-слоя ионосферы в рамках этой модели на двух близкорасположенных трассах. Особенностью этой методики является то, что она не требует задания начального состояния ионосферы и позволяет восстанавливать не только динамику высотного профиля электронной концентрации во время вспышки, но и собственно начальные условия.

### Экспериментальные результаты и обработка данных

Геофизическая обсерватория «Михнево» ИДГ РАН расположена примерно в 100 км к югу от Москвы (54.96°N, 37.76°E). Обсерватория располагается на значительном удалении от крупных населенных пунктов и промышленных объектов. С 2014 года в ней ведется непрерывная регистрация электромагнитных сигналов СДВ передатчиков. В 2021 году аналогичная аппаратура была развернута в обсерватории «Ульяновка» Калининградского филиала ИЗМИРАН. В работе использовались сигналы от передатчиков GQD GBZ и ДНО. Заметим, что передатчики GQD и GBZ расположены очень близко друг от друга. Расстояние между ними составляет 32 км. Карта расположения передатчиков, приемников и их трасс приведена на рис.1. Координаты передатчиков и приемников приведены в таблице 1.

Ранее нами была разработана методика восстановления параметров ионосферы на двухчастотной трассе [Гаврилов и др., 2019] во время мощных Солнечных рентгеновских вспышек. 3 июля 2021 года на Солнце произошла рентгеновская вспышка класса X2. Используя эту методику, мы восстановили эффективную высоту отражения  $h'$  и скорость нарастания электронной концентрации  $\beta$  на трассах GBZ/GQD – «Ульяновка» и GBZ/GQD – «Михнево». Результаты показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что для этих двух трасс, зависимость эффективной высоты отражения от времени практически совпадает. Разность не превышает 1 км. Причем в максимуме вспышки различия в эффективной высоте отражения минимальны. Различия в скорости нарастания электронной концентрации более значительны и достигают  $0.05 \text{ км}^{-1}$ . Максимальная

разность достигается в момент максимума вспышки. Это хорошо коррелирует с [Гаврилов и др., 2022], где показано, что вне зависимости от начальных условий, эффективная высота отражения в момент максимума вспышки зависит только от ее энергии в диапазоне до 0.2 нм.

Таблица 1.

Наименование Передатчика/Приемника	Частота, Гц	Широта, градусы	Долгота, градусы
GBZ	19580	54.912° N	3.278° W
GQD	22100	54.732° N	2.883° W
DHO	23400	53.079° N	7.615° E
MIK	-	54.96° N	37.75° E
KGD	-	54.60° N	20.21° E

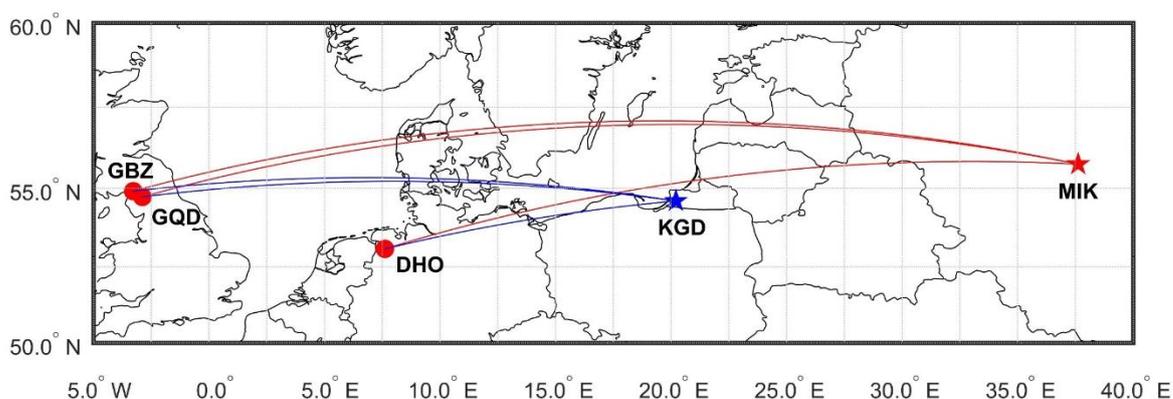


Рисунок 1. Карта расположения передатчиков, приемников и трасс распространения сигнала.

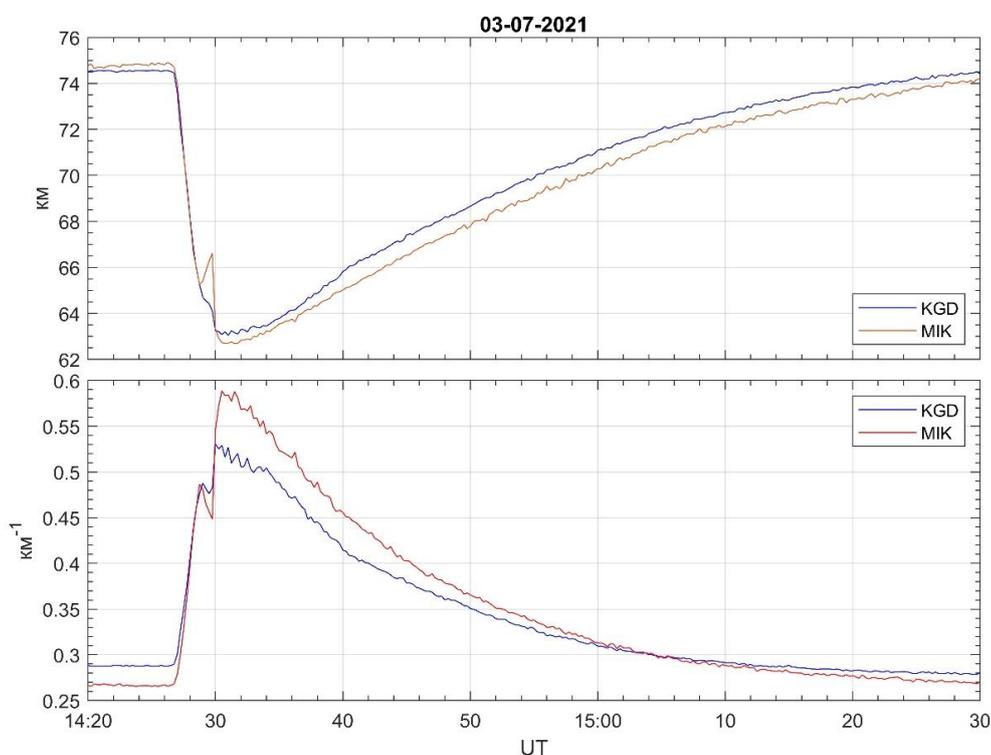
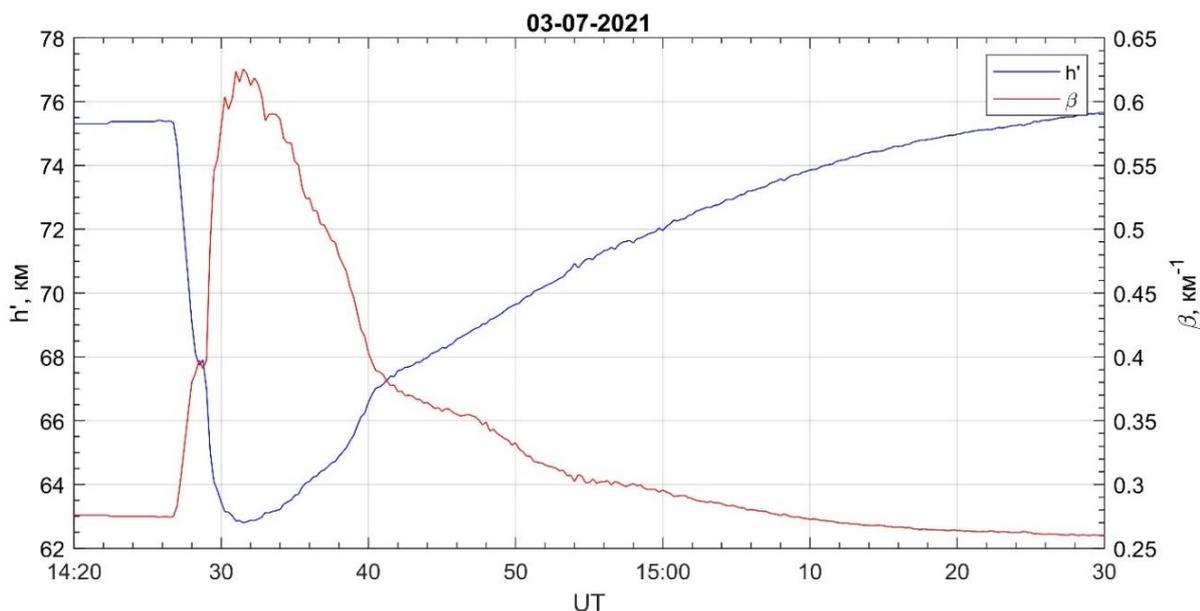


Рисунок 2. Временной ход эффективной высоты отражения  $h'$  и скорости нарастания электронной концентрации  $\beta$  на трассах GBZ/GQD–KGD и GBZ/GQD–MIK, вызванных солнечной вспышкой 03.07.2021.

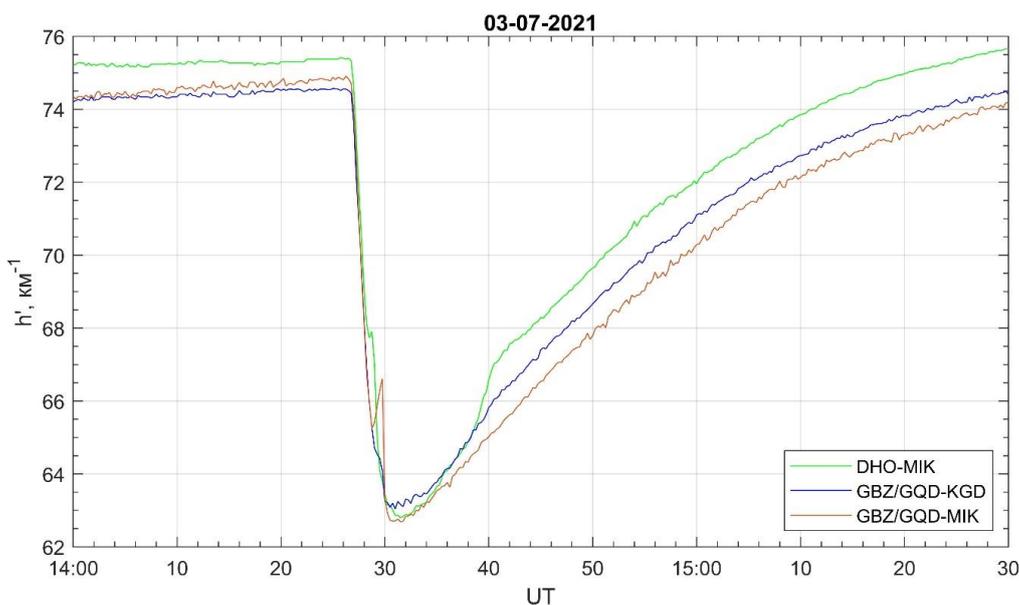
Из рис. 1 видно, что трасса DHO–MIK фактически проходит через обсерваторию «Ульяновка». Соотношение длин трасс GQD/GBZ-Михнево и GQD/GBZ-Ульяновка примерно соответствует соотношению длин трасс DHO-Михнево и DHO-Ульяновка. Это позволяет сделать предположение, что параметры высотного профиля электронной концентрации ионосферы  $h'$  и  $\beta$  будут одинаковые на трассах DHO – «Михнево» и DHO – «Ульяновка». При таких предположениях мы можем использовать эту методику для восстановления параметров ионосферы на трассе DHO-Михнево.

На рис. 3 приведены восстановленные значения  $h'$  и  $\beta$  для этой пар трассы.



**Рисунок 3.** Временной ход эффективной высоты отражения  $h'$  и скорости нарастания электронной концентрации  $\beta$  на трассе DHO-Михнево.

На рис. 4 приведена эффективная высота отражения для всех трех трасс: GBZ/GQD – Ульяновка, GBZ/GQD – Михнево и DHO – Михнево. Из рисунка видно, что состояние ионосферы перед вспышкой на трассе DHO-«Михнево» отличается от двух других трасс. Эффективная высота отражения примерно на 1 км выше. Это может быть связано с тем, что трасса расположена южнее и восточнее. Тем не менее в момент максимума вспышки эффективная высота отражения для всех трех трасс совпадает. Это еще раз подтверждает вывод сделанный в [Гаврилов и др., 2022] о том, что минимум эффективной высоты отражения не зависит от начальных условий, а зависит от энергетики вспышки.



**Рисунок 4.** Зависимость эффективной высоты отражения от времени для трех трасс.

Регистрация СДВ сигналов в двух пунктах позволило сравнить параметры ионосферы на разных трассах во время солнечной рентгеновской вспышки 03.07.2021. Показано, что результаты восстановления параметров  $h'$  и  $\beta$  высотных профилей электронной концентрации для трасс длиной до 2500 км показывают близкие результаты. Это может свидетельствовать о том, что различные параметры на трассах, такие как неравномерность освещенности и различные зенитные углы, не приводят к значимым изменениям электронной концентрации в нижней ионосфере во время солнечной вспышки. Этот факт существенно расширяет возможности восстановления параметров ионосферы по данным распространения СДВ сигналов. Становится возможным восстанавливать параметры ионосферы не только на двухчастотной трассе, но и по данным приема сигналов от одного передатчика в двух пунктах. Вопрос о применимости полученных результатов к более длинным трассам с разной ориентацией по отношению к солнечному терминатору требует дополнительных исследований. Использование сети регистрации сигналов СДВ передатчиков существенно расширяет возможность исследования и прогнозирования эффектов воздействия геофизических возмущений на состояние и динамику D области ионосферы и условия распространения СДВ радиосигналов в спокойных и возмущенных условиях.

Работа выполнена по государственному заданию 122032900175-6.

### **Литература**

- Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Поклад Ю.В., Ряховский И.А. Оценка параметров среднеширотной нижней ионосферы, вызванных солнечной вспышкой 10 сентября 2017 года // Геомагнетизм и аэрономия. 2019, Т. 59, № 5, С. 628-634.
- Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Ряховский И.А., Ермак В.М. Зависимость возмущений D-области среднеширотной ионосферы от спектрального состава рентгеновского излучения солнечных вспышек по экспериментальным данным // Геомагнетизм и аэрономия. 2022, Т. 62, № 2, С. 239-244.
- Ferguson J.A. Ionospheric model validation at VLF and LF // Radio Sci. 1995, V. 30, N. 3, P. 775–782.
- Grubor D.P., Sulic D.M., Zigman V. Classification of X-ray solar flares regarding their effects on the lower ionosphere electron density profile // Ann. Geophys. 2008, V. 26, P. 1731–1740, doi:10.5194/angeo-26-1731-2008
- McRae W.M., Thomson N.R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2004, V. 66, P. 77–87.
- Thomson N.R., Rodger C.J., Clilverd M.A. Large solar flares and their ionospheric D-region enhancements // J. Geophys. Res. 2005, V. 110, A06306. <https://doi.org/10.1029/2005JA011008>
- Wait J.R. and Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, NBS Tech. Note 300, 1964.