

УДК 551.510.535

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК НА ТРАССАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ СДВ ДИАПАЗОНА, ПРИНЯТЫХ В ОБСЕРВАТОРИЯХ «МИХНЕВО» И «УЛЬЯНОВКА»

© 2023 г. Ю. В. Поклад¹ *, Ф. С. Бессараб², Б. Г. Гаврилов¹,
В. М. Ермак¹, И. А. Ряховский¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН
Калининградский филиал, Калининград, Россия

*E-mail: poklad@mail.ru

В работе проводится сравнительный анализ восстановленных ионосферных параметров по данным приема СДВ сигналов в геофизических обсерваториях (ГФО) «Михнево» ИДГ РАН и «Ульяновка» (Калининградский филиал ИЗМИРАН) во время солнечной вспышки 03.07.2021 г. Показано, что разработанная методика восстановления параметров ионосферы применима к трассам различной длины. Предлагается дальнейшее развитие методики, которая могла бы обеспечить восстановление параметров ионосферы на одночастотной трассе по измерениям в двух точках.

Ключевые слова: солнечные вспышки, ионосфера, рентген, ультрафиолет, распространение, радиоволны.

Для цитирования: Поклад Ю.В., Бессараб Ф.С., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ряховский И.А. Оценка параметров нижней ионосферы во время рентгеновских вспышек на трассах распространения сигналов СДВ диапазона, принятых в обсерваториях «Михнево» и «Ульяновка» // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 54–61. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_54

Введение

Восстановление параметров нижней ионосферы как в спокойном состоянии, так и во время сильных возмущений является актуальной задачей и имеет важное научное и прикладное значение. Актуальность обусловлена сложностью экспериментального исследования нижней ионосферы и трудностями в ее численном моделировании из-за большого количества фотохимических процессов. СДВ радиоволны распространяются в волноводе Земля-ионосфера и используются для передачи информации на большие расстояния, поскольку обладают малым затуханием. Верхней стенкой этого волновода является D-область ионосферы. Поэтому состояние D-области оказывает непосредственное влияние на параметры СДВ сигналов. Одним из геофизических явлений, приводящих к значительным изменениям в нижней ионосфере, являются солнечные рентгеновские вспышки. Первые работы, которые позволяли связать параметры радиосигналов с процессами в ионосфере, появились в 60–70-х годах прошлого века [Данилов, 1967; Mitra, 1974]. Одной из общепринятых моделей, описывающих высотный профиль электронной концентрации, является двухпараметрическая модель Фергюсона–Уайта [Wait, Spies, 1964; Ferguson, 1995]. В этой модели зависимость электронной концентрации N_e от высоты H описывается следующим уравнением:

$$N_e = N_{e_0} \exp(\beta - 0.15)(z - h') \exp(-0.15h'),$$

где $N_{e_0} = 1.43 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ ($N_{e_0} = 1.43 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$), h' – эффективная высота отражения и β – крутизна высотного профиля или скорость нарастания электронной концентрации с высотой.

Исследование динамики нижней ионосферы во время таких сильных возмущений, как солнечные рентгеновские вспышки, является одной из актуальных задач современной геофизики. В ряде работ [Kaufman et al., 2002; McRae, Thomson, 2004; Thomson et al., 2005; Grubor et al., 2008; Kolarski, Grubor, 2014] 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: $h' = 72$ км и $\beta = 0.3$ км⁻¹. В ГФО «Михнево» с 2014 года ведется мониторинг сигналов СДВ передатчиков [Гаврилов и др., 2019а]. В работе [Гаврилов и др., 2019б] 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 значения h' и β .

Восстановление параметров проводилось на двух близкорасположенных трассах распространения СДВ сигналов от передатчиков GBZ (19580 Гц, 54.912° N, 3.278° E) и GQD (22100 Гц, 54.732° N, 2.883° E) до геофизической обсерватории «Михнево» (54.9°N, 37.8° E). Передатчики расположены на расстоянии 32 км, поэтому предполагалось, что параметры ионосферы, а именно, эффективная высота отражения h' и скорость нарастания электронной концентрации с высотой β одинаковы для обеих трасс. Кроме того предполагалось, что значения h' и β одинаковы по всей длине трассы. Последнее предположение нуждается в проверке, поскольку трасса имеет длину около 2500 км и их освещенность (т.е. зенитный угол Солнца) отличается на разных участках. С 2021 года ведется прием сигналов СДВ диапазона в обсерватории «Ульяновка» (54.603° N, 20.211° E) Калининградского филиала ИЗМИРАН. Данная обсерватория расположена на расстоянии 220 км южнее трассы GBZ/GQD – «Михнево», что позволило исследовать влияние освещенности трассы, которая зависит от зенитного угла Солнца, на результаты восстановления параметров D-области ионосферы.

Постановка и результаты эксперимента

В работе использовались передатчики GBZ и GQD, расположенные в Великобритании и передатчик DHO, расположенный в ФРГ. Частота и координаты передатчиков приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Передатчик	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

Регистрация сигналов велась в ГФО «Михнево» ИДГ РАН (МИК) и обсерватории «Ульяновка» (KGD) Калининградского филиала ИЗМИРАН. Схема расположения передатчиков, приемников и трасс распространения сигналов приведена на рис. 1.

Как видно из рисунка, трасса GBZ/GQD – МИК проходит примерно на 225 км севернее обсерватории KGD. Существенно, что обсерватория «Ульяновка» лежит фактически на трассе DHO – Михнево. Расстояние до трассы около 20 км.

На рис. 2 показаны значения амплитуды и фазы сигналов на трассах GBZ/GQD – МИК и GBZ/GQD – KGD для условий солнечной вспышки 03.07.2021 г. На нижней панели отмечен поток рентгеновского излучения во время вспышки по данным спутника GOES в диапазонах 0.05–0.4 и 0.1–0.8 нм.

Используя методику [Гаврилов и др., 2019б], были восстановлены эффективная высота отражения h' и скорость нарастания электронной концентрации с высотой β на трассах GBZ/GQD – «Ульяновка» и GBZ/GQD – «Михнево». Результаты показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что зависимость эффективной высоты отражения от времени для этих двух трасс практически совпадает. Разность не

превышает 1 км. Причем, в максимуме вспышки различия в эффективной высоте отражения минимальны. Различия в скорости нарастания электронной концентрации с высотой достигает 0.05 км^{-1} . При этом максимальная разность достигается в момент максимума вспышки.

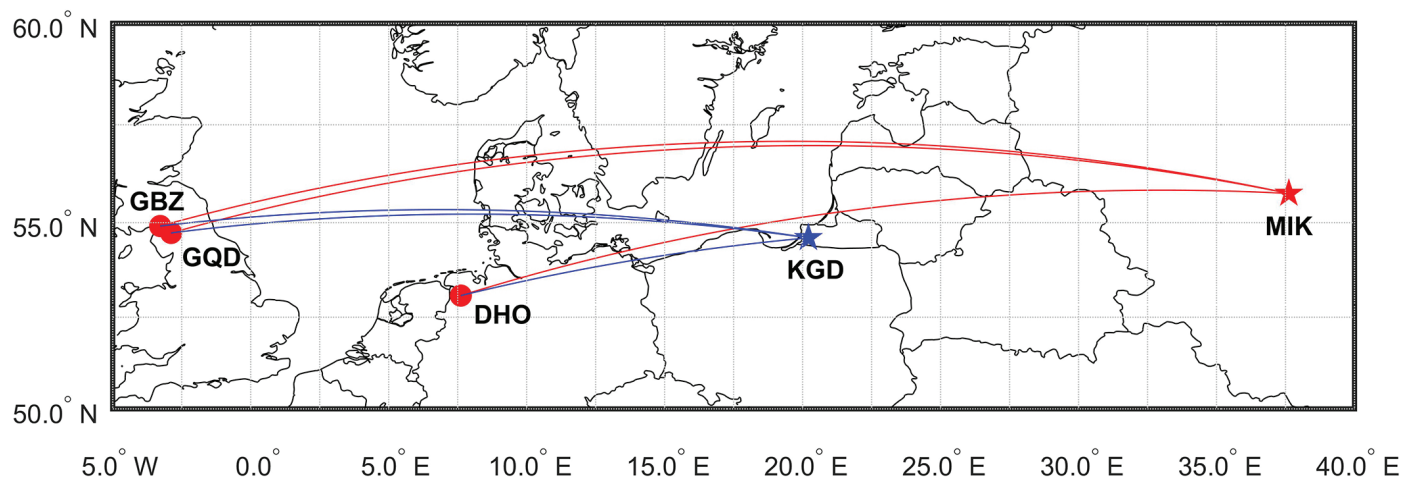


Рис. 1. Схема расположения передатчиков и приемников

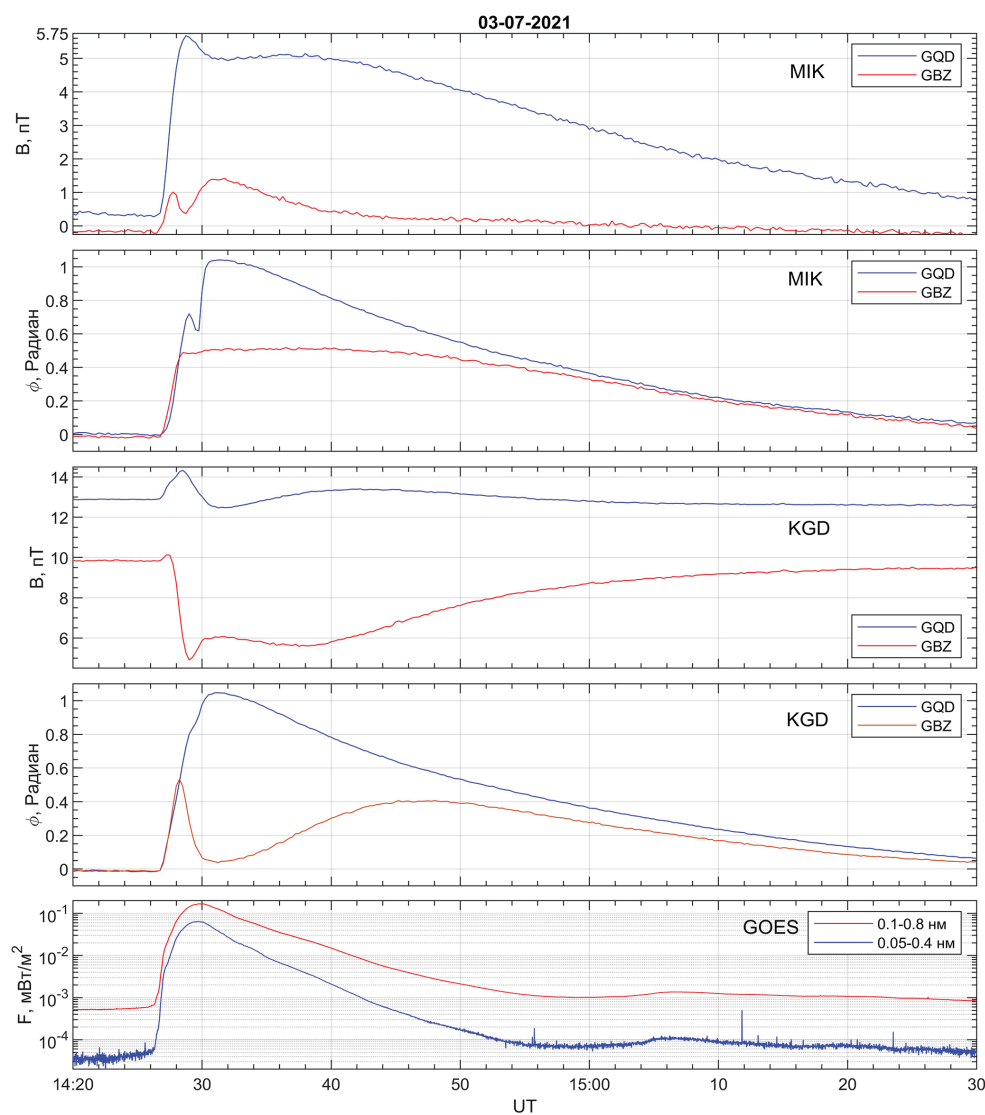


Рис. 2. Амплитуда B и фаза ϕ сигналов от передатчиков GQD и GBZ, зарегистрированных в ГФО «Михнево» (MIK) и обсерватории «Ульяновка» (KGD), во время солнечной вспышки 03.07.2021 г. На нижней панели – поток рентгеновского излучения F по данным спутника GOES

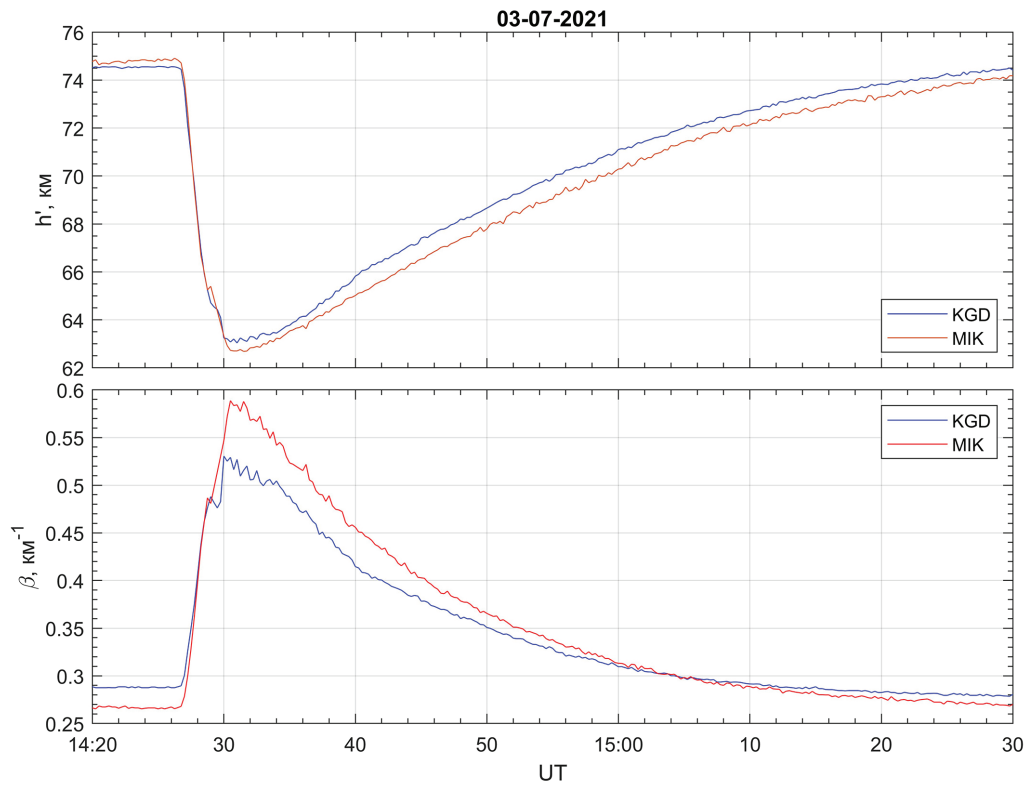


Рис. 3. Зависимость изменений эффективной высоты отражения h' и скорости нарастания электронной концентрации β на трассах GBZ/GQD – KGD и GBZ/GQD – MIK, вызванных солнечной вспышкой 03.07.2021 г.

Воздействие ионизирующего излучения на трассу зависит от ее освещенности. Основным фактором, вызывающим изменение освещенности, является изменение зенитного угла Солнца. Для описания ослабления излучения при его падении под разными углами на экспоненциальную атмосферу используют функцию Чепмена [Chapman, 1931]. Для оценки ослабления потока излучения в зависимости от зенитного угла Солнца мы использовали аналитическое приближение функции Чепмена из работы [Fitzmaurice, 1964]. В этой работе функция Чепмена аппроксимируется следующим выражением:

$$Ch(X, \alpha) = \sqrt{\frac{\pi X}{2}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{X}{2}} \cos(\alpha) \right) \exp \left(\sqrt{\frac{X}{2}} \cos^2(\alpha) \right),$$

$$X = \frac{R_E + z}{H},$$

где R_E – радиус Земли, z – высота, H – приведенная высота атмосферы.

Для трассы GBZ/GQD – «Михнево» зенитный угол Солнца в момент максимума вспышки менялся от 34.7° до 55° . Соответственно поток ионизирующего излучения менялся в 1.7 раза. Для трассы GBZ/GQD – «Ульяновка» зенитный угол Солнца менялся от 34.7° до 44.3° , поток ионизирующего излучения менялся в 1.2 раза. Таким образом, увеличение неравномерности освещенности трассы на 40% (с 1.2 до 1.7) не оказало влияния на изменение эффективной высоты отражения. Скорость роста высотного профиля электронной концентрации β в момент максимума вспышки увеличилась примерно на 0.3 км^{-1} . Таким образом, различия в скоростях нарастания электронной концентрации β в момент максимума вспышки достигают почти 20%, что делает влияние этого фактора уже достаточно заметным.

Как видно из рис. 1, трасса DHO – МІК фактически проходит через обсерваторию «Ульяновка». Для этой трассы зенитный угол Солнца, в момент максимума вспышки, менялся от 37.3° до 54° . Соответственно поток ионизирующего излучения менялся в 1.6 раза. Для трассы GBZ/GQD – KGD зенитный угол Солнца менялся от 37.3° до 44.3° , а поток ионизирующего излучения менялся в 1.15 раза. Таким образом, неравномерность в освещенности этих двух трасс примерно соответствует неравномерности в освещенности трасс GBZ/GQD – «Михнево» и GBZ/GQD – «Ульяновка». Проведенные наблюдения дают основание предполагать, что параметры высотного профиля электронной концентрации ионосферы h' и β будут одинаковые на трассах DHO – «Ульяновка» и DHO – «Михнево». Это позволяет использовать данную методику для восстановления ее параметров.

На рис. 4 приведены восстановленные значения h' и β для этой пары трасс. На рис. 5 приведена эффективная высота отражения для всех трех трасс: GBZ/GQD – KGD, GBZ/GQD – МІК и DHO – МІК.

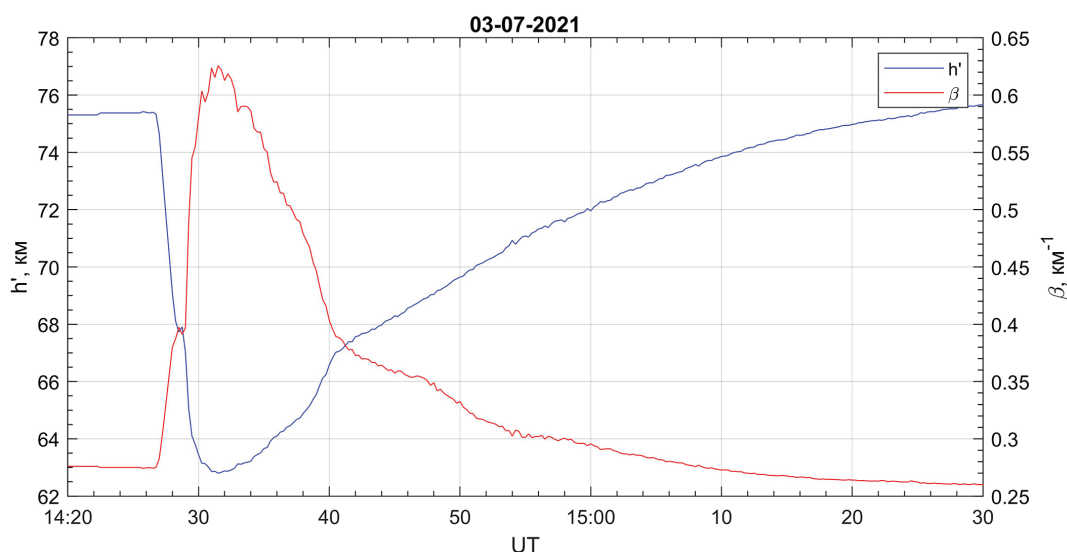


Рис. 4. Временной ход параметров h' и β на трассе DHO – «Михнево»

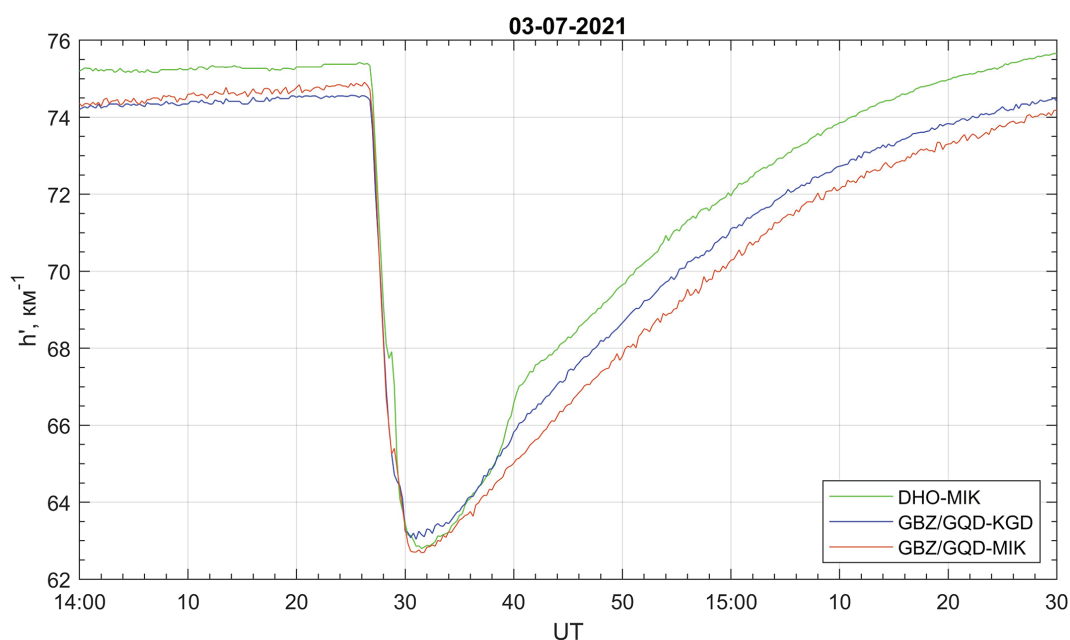


Рис. 5. Зависимость эффективной высоты отражения от времени для трех трасс

Из рисунка видно, что перед вспышкой эффективная высота отражения на трассе ДНО – «Михнево» примерно на 1 км выше, чем на двух других трассах. Это, по-видимому, связано с тем, что трасса расположена южнее. Тем не менее, в момент максимума вспышки эффективная высота отражения для всех трех трасс совпадает. Это хорошо коррелирует с [Гаврилов и др., 2022], где показано, что вне зависимости от начальных условий, эффективная высота отражения в момент максимума вспышки зависит от ее энергии в диапазоне до 0.2 нм.

Заключение

Наличие двух пунктов регистрации СДВ сигналов позволило оценить влияние неравномерности освещенности трассы на восстановление ее параметров, изменившихся в результате воздействия солнечной вспышки 03.07.2021 г. Результат восстановления параметров h' и β высотных профилей электронной концентрации для трасс длиной до 2500 км показывает, что неравномерность освещенности не приводит к значимым изменениям электронной концентрации в нижней ионосфере во время солнечной вспышки. Вопрос о применимости полученных результатов к более длинным трассам с разной ориентацией по отношению к солнечному терминатору требует дополнительных исследований. Использование нескольких пунктов регистрации сигналов СДВ передатчиков на близких или пересекающихся трассах 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.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900175-6).

Благодарности

Результаты получены с использованием оборудования УНУ «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/310424/>).

Авторы выражают благодарность В. В. Молярову за помощь в сборе и обработке экспериментальных данных в обсерватории «Ульяновка» Калининградского филиала ИЗМИРАН.

Список литературы

Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Ряховский И.А., Ляхов А.Н., Рыбаков В.А., Егоров Д.В., Ермак В.М. Радиофизический измерительный комплекс геофизической обсерватории «Михнево». В сб. Триггерные эффекты в геосистемах / под редакцией В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. Москва. 2019а. С. 349–357.

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. 2019б. Т. 59. № 5. С. 628–634. <https://doi.org/10.1134/S0016794019050043>

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. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020080>

Данилов А.Д. Химия ионосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1967. – 295 с.

Chapman S. The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth // Proc. Phys. Soc. 1931. Vol. 43 (1). P. 26–45. <http://doi.org/10.1088/0959-5309/43/1/305>

Ferguson J.A. Ionospheric model validation at VLF and LF // Radio Sci. 1995. Vol. 30 (3). P. 775–782. <https://doi.org/10.1029/94RS03190>

Fitzmaurice J.A. Simplification of the Chapman Function for Atmospheric Attenuation // Applied Optics. 1964. Vol. 3 (5). P. 640. <http://doi.org/10.1364/ao.3.000640>

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. Vol. 26. P. 1731–1740. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1731-2008>

Kaufmann P., Piazza L.R., Fernandez J.H. Solar flares not producing sudden phase advances // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. P. 1219. <http://doi.org/10.1029/2001JA000292>

Kolarski A., Grubor D. Sensing the Earth's low ionosphere during solar flares using VLF signals and GOES solar X-ray data // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53. P. 1595–1602. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.022>

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. Vol. 66. P. 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.09.009>

Mitra A.P. Ionospheric effects of solar flares. D. Reidel Publishing Company. 1974. – 307 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-2231-6>

Thomson N.R., Rodger C.J., Clilverd M.A. Large solar flares and their ionospheric D-region enhancements // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. P. A06306. <https://doi.org/10.1029/2005JA011008>

Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. NBS Tech. 1964. Note 300. <https://doi.org/10.6028/NBS.TN.300>

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE LOWER IONOSPHERE DURING X-RAY FLARES ON THE PROPAGATION PATHS OF VLF SIGNALS RECEIVED AT THE MIKHNEVO AND UL'YANOVKA OBSERVATORIES

**© 2023 Yu. V. Poklad^{1,*}, F. S. Bessarab², B. G. Gavrilov¹,
V. M. Ermak¹, I. A. Ryakhovskiy¹**

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*²Kaliningrad branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia*

**E-mail: poklad@mail.ru*

The paper presents a comparative analysis of the reconstructed ionospheric parameters based on the data of receiving VLF signals at the Mikhnevo and Ul'yanovka observatories during the solar flare on 07/03/2021. It is shown that the developed method for reconstructing ionospheric parameters is applicable to paths of various lengths. A further development of the technique is proposed, which could ensure the reconstruction of the ionospheric parameters on a single-frequency path from measurements at two points.

Keywords: solar flares, ionosphere, X-ray, ultraviolet, propagation, radio waves.