

УДК 550.388.2

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕШИРОТНОЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКОЙ 10 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

© 2019 г. Б. Г. Гаврилов^{1, *}, В. М. Ермак^{1, *}, Ю. В. Поклад^{1, **}, И. А. Ряховский^{1, ***}

¹Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: boris.gavrilov34@gmail.com

**e-mail: poklad@mail.ru

***e-mail: ryakhovskiy88@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019 г.

После доработки 20.05.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Изменение состояния *D*- и *E*-областей ионосферы приводит к вариациям амплитудно-фазовых характеристик радиосигналов ОНЧ-диапазона. Существующие теоретические и эмпирические модели распространения низкочастотных электромагнитных волн качественно описывают относительные изменения параметров нижней ионосферы, связанные с мощными гелиогеофизическими возмущениями, однако не позволяют оценить абсолютную величину и распределение электронной концентрации. В работе использованы данные измерений амплитудно-фазовых характеристик ОНЧ-радиосигналов с отличающимися частотами, распространяющихся по двум близко расположенным трассам. Это позволило не только количественно оценить параметры *D*-области ионосферы на пространственных масштабах в тысячи км во время мощной солнечной вспышки 10 сентября 2017 г., но и восстановить профиль электронной концентрации до начала воздействия рентгеновского излучения.

DOI: 10.1134/S0016794019050043

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной геофизики является исследование ионосферных возмущений, вызванных высокоэнергетическими геофизическими событиями. При этом наименее изучены процессы, происходящие в нижней ионосфере, несмотря на то, что они могут оказывать существенное влияние на процессы в ионосфере в целом [Гаврилов и др., 2019]. Существующие теоретические, эмпирические и вероятностно-статистические модели (см., например, [Friedrich et al., 2018; Ferguson, 1995; Козлов и др., 2014]) в определенной степени описывают состояние *D*-области в различных гелиогеофизических условиях. При этом основным источником экспериментальных данных о параметрах нижней ионосферы является измерение ОНЧ-радиосигналов (3–30 кГц). Вариации их амплитудно-фазовых характеристик однозначно связаны с параметрами волновода Земля–ионосфера, и поэтому несут информацию об изменении профиля электронной концентрации на его верхней стенке в *D*-области ионосферы.

Как известно, солнечные вспышки [Mitra, 1974; Thomson et al., 2004], геомагнитные бури [Peter et al., 2006], протонные высыпания [Clilverd et al., 2006], гамма-вспышки [Tanaka et al., 2010], солнечные затмения [Klobuchar and Whitney, 1965; Singh et al., 2012], разряды молний [Rodger, 1999] и землетрясения [Hayakawa et al., 1996] могут приводить к изменению ионизации *D*-области ионосферы. Результаты многочисленных исследований [Thomson, 2010; Thomson et al., 2011] свидетельствуют о том, что изменение электронной концентрации в верхней стенке волновода во время рентгеновских солнечных вспышек приводит к существенным вариациям амплитудно-фазовых характеристик сигналов сверхдлинноволновых (СДВ) станций. Анализ вариаций этих параметров позволяет в принципе восстанавливать параметры ионосферы во время воздействия рентгеновского излучения вспышки и, с использованием определенных допущений, исходное состояние ионосферы.

Одним из способов описания *D*-области ионосферы является двухпараметрическая модель [Ferguson, 1995], в которой распределение элек-

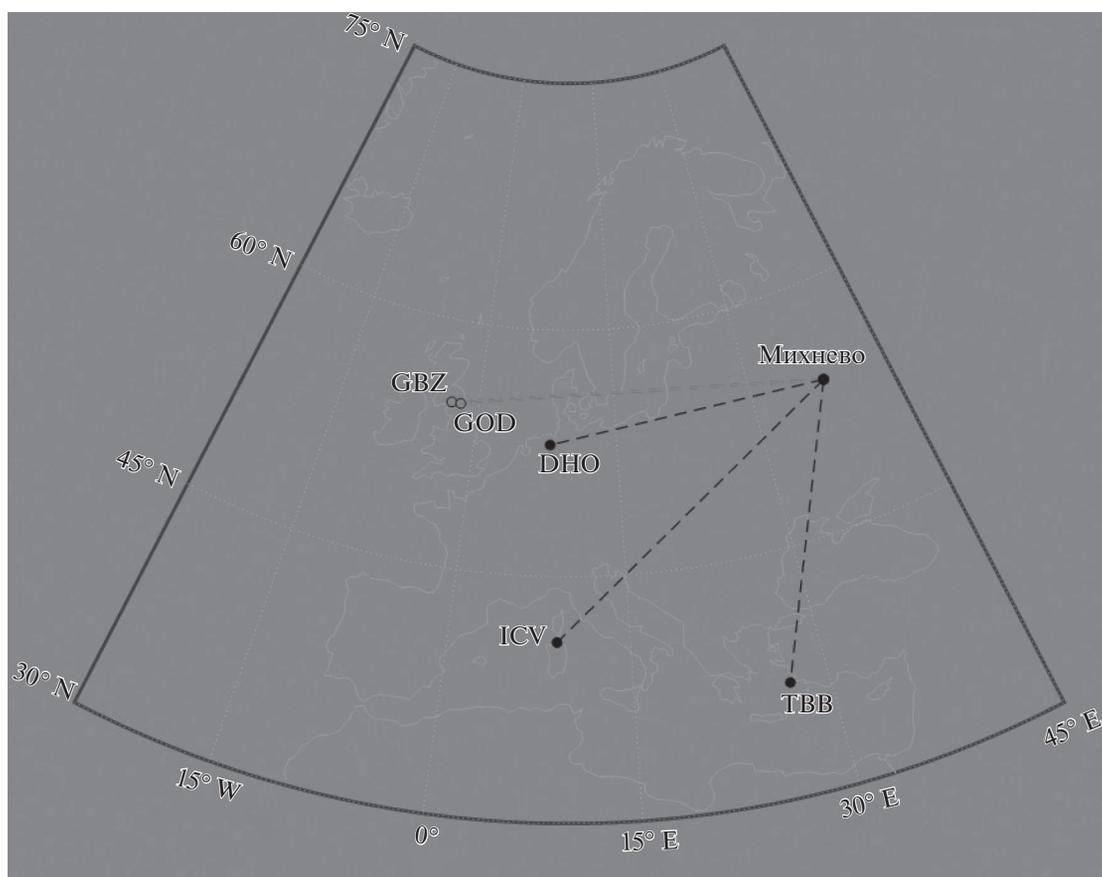


Рис. 1. Расположение СДВ-передатчиков и ГФО Михнево.

тронной концентрации в нижней ионосфере определяется двумя параметрами: h' (км) – эффективная высота отражения радиосигнала и β (км^{-1}) – скорость увеличения электронной концентрации (см^{-3}) с высотой [Wait and Spies, 1964]:

$$Ne(z) = 1.49 \times 10^7 \exp(\beta - 0.15) \times (z - h') \exp(-0.15h'), \quad (1)$$

где z – высота (км).

В рамках этой модели нами была разработана модифицированная методика восстановления параметров β и h' по амплитудно-фазовым характеристикам сигналов во время рентгеновских вспышек, использующая данные измерений параметров радиосигналов на двухчастотной трассе. Для восстановления параметров ионосферы в работе использованы данные измерений сигналов европейских СДВ-радиостанций в геофизической обсерватории ГФО Михнево (54.9° N , 37.8° E) Института динамики геосфер РАН.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Мониторинг вариаций электромагнитных полей КНЧ/ОНЧ-диапазона в ГФО Михнево ведется с использованием высокочувствительной широкополосной аппаратуры [Гаврилов и др., 2015] с 2014 г. Радиофизический комплекс обсерватории позволяет принимать сигналы от СДВ-станций, находящихся на расстояниях в несколько тысяч км от точки приема (рис. 1).

Для анализа параметров ионосферы во время вспышек использовались данные регистрации сигналов от двух СДВ-передатчиков: GQD (22100 Гц , 54.732° N , 2.883° E) и GBZ (19580 Гц , 54.912° N , 3.278° E), расположенных в Великобритании на расстоянии 32 км друг от друга. Выбор этих передатчиков обусловлен тем, что расстояние между ними пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием до приемника ($\sim 2500 \text{ км}$). Поэтому можно считать, что их сигналы распространяются вдоль одной трассы.

Использование двухчастотной трассы позволило разрешить одну из проблем, возникающих

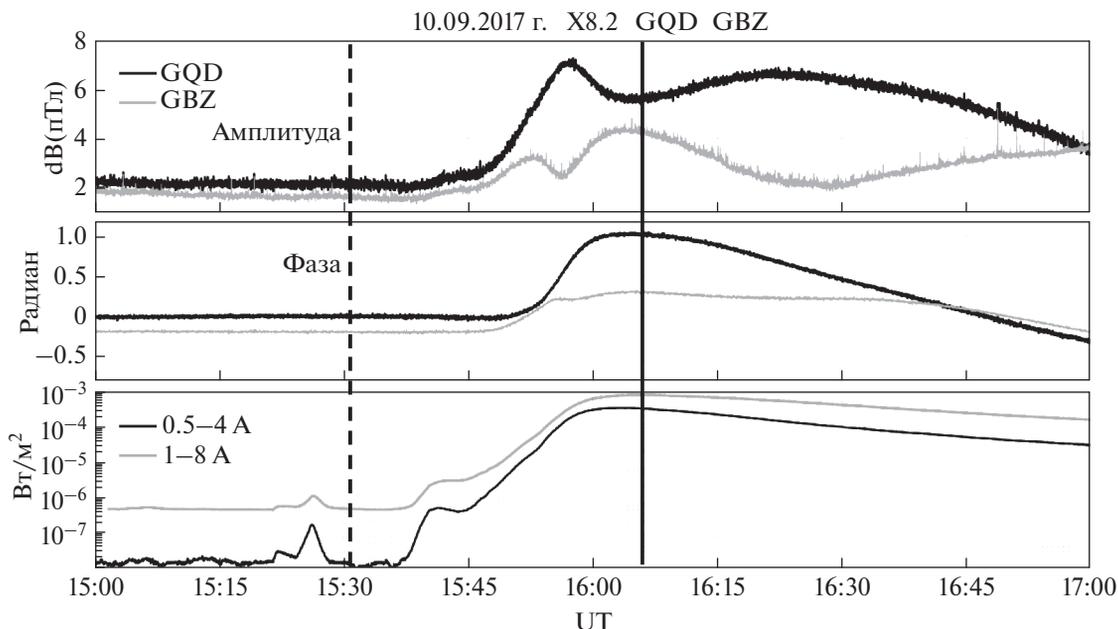


Рис. 2. Амплитуды (верхняя панель) и фазы (средняя панель) сигналов от станций GBZ (серая кривая) и GDQ (черная кривая), зарегистрированные во время солнечной вспышки 10 сентября 2017 г. Поток рентгеновского излучения вспышки по данным спутника GOES-15 (нижняя панель) в канале 0.5–4 Å (черная линия) и в канале 1–8 Å (серая линия).

при восстановлении параметров возмущенной рентгеновскими вспышками нижней ионосферы: неопределенность состояния спокойной (предвспышечной) ионосферы.

По экспериментальным данным оценивается изменение амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов от обоих передатчиков во время вспышки. Затем с использованием программы LWPC [Ferguson, 1998] рассчитываются возможные значения амплитуды и фазы от этих передатчиков для различных значений β и h' по трассе. Экспериментальные данные сопоставляются с результатами расчетов, что позволяет оценить значения параметров β и h во время вспышки и до нее.

Исследования выполнены для вспышки X-класса 10 сентября 2017 г.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОЦЕНОК

На рисунке 2 показаны графики вариаций амплитуды и фазы сигналов от передатчиков GQD и GBZ и изменение потока рентгеновского излучения во время вспышки 10 сентября 2017 г. Штриховой вертикальной линией отмечено время начала вспышки $t_0 = 15:31:58$ UT, а сплошной линией – время, когда наблюдался максимум плотности потока излучения вспышки $t_1 = 16:06:30$ UT в канале 1–8 Å.

Вариации параметров сигналов во время вспышки можно представить в виде:

$$dA_i(t) = A_i(t) - A_i(t_0), \quad dP_i(t) = P_i(t) - P_i(t_0),$$

где A_i и P_i – амплитуда и фаза сигналов станций GQD ($i = 1$) и GBZ ($i = 2$) в различные моменты времени. В табл. 1 приведены данные по изменению амплитуды и фазы сигналов для станций GQD и GBZ за период времени с t_0 до t_1 .

Для восстановления параметров ионосферы нами использовалась программа LWPC, которая широко применяется для исследования условий распространения сигналов СДВ-диапазона в волноводе Земля–ионосфера. Программа позволяет рассчитать амплитуду и фазу сигнала в точке приема в зависимости от его частоты, координат передатчика и высотного профиля электронной концентрации на трассе распространения. В на-

Таблица 1. Изменение амплитуды и фазы сигналов от станций GQD и GBZ за время вспышки

Станции	$dA_i(t_1)$, дБ	$dP_i(t_1)$, рад
GQD ($i = 1$)	3.61	1.02
GBZ ($i = 2$)	2.61	0.5

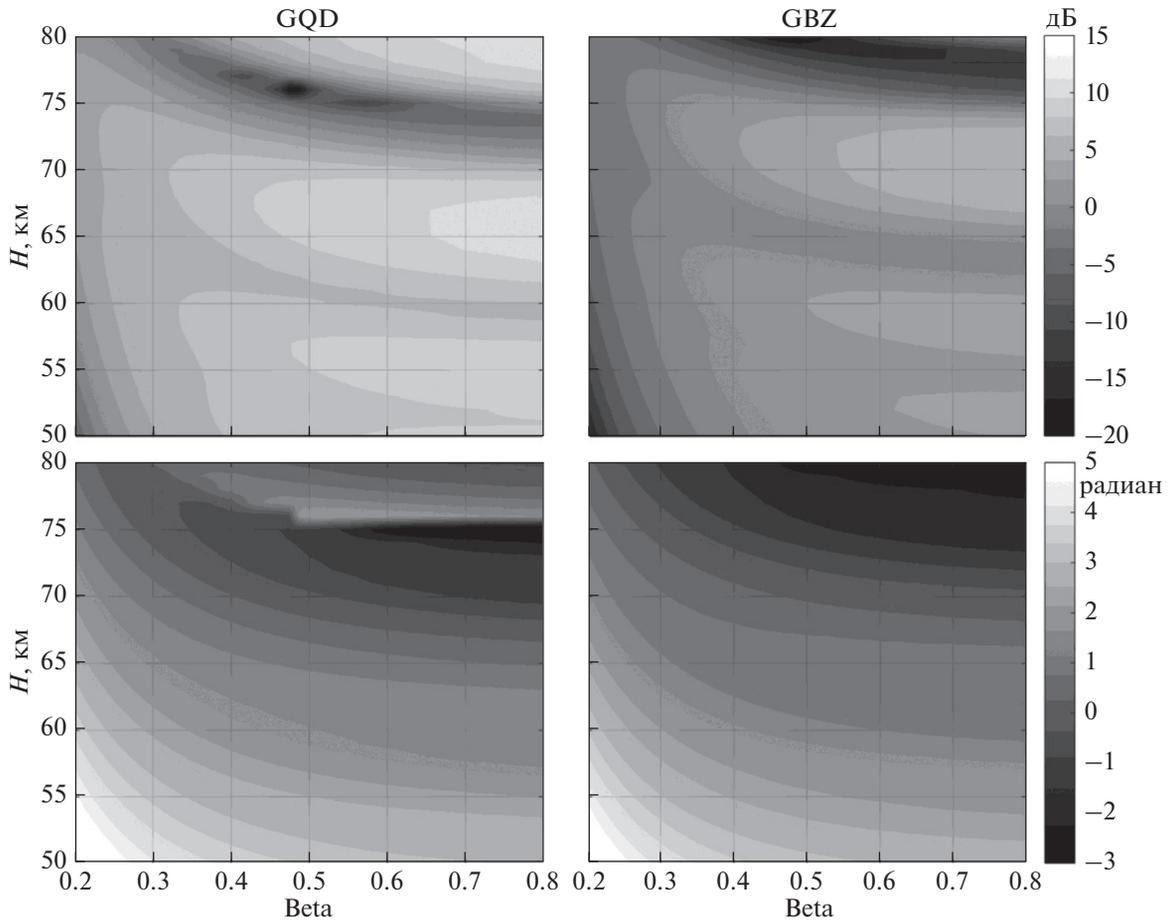


Рис. 3. Поля возможных значений амплитуды $A_i(\beta, h')$ (верхние панели) и фазы $P_i(\beta, h')$ (нижние панели) сигналов СДВ-передатчиков GQD и GBZ для различных β и h' , рассчитанных с использованием программы LWPC.

ших расчетах параметров сигналов с использованием LWPC принимается, что профиль электронной концентрации по трассе является изотропным. Были получены значения амплитуд и фаз сигналов от передатчиков GQD и GBZ для параметров верхней стенки волновода, которые варьировались в диапазонах от 50 до 80 км (h') и от 0.2 до 0.95 км⁻¹ (β). Результаты расчетов показаны на рис. 3.

С использованием этих данных определялись начальные и конечные значения параметров ионосферы, при которых расчетное изменение амплитуд и фаз соответствовали зарегистрированным.

Данное условие может быть представлено в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \left| A_i(\beta_1, h'_1) - A_i(\beta_0, h'_0) - dA_i(t_1) \right| < \delta A \\ \left| P_i(\beta_1, h'_1) - P_i(\beta_0, h'_0) - dP_i(t_1) \right| < \delta P, \end{cases} \quad (2)$$

где $A_i(\beta_0, h'_0)$ и $P_i(\beta_0, h'_0)$ – возможные значения амплитуды и фазы сигналов в момент времени t_0 , $A_i(\beta_1, h'_1)$ и $P_i(\beta_1, h'_1)$ – значения амплитуды и фазы сигналов в момент времени t_1 , а $dA_i(t_1)$ и $dP_i(t_1)$ – зарегистрированное изменение амплитуды и фазы для станций GQD ($I = 1$) и GBZ ($I = 2$).

Принятые значения $\delta A = 0.12$ дБ и $\delta P = 0.06$ рад примерно соответствуют точности определения амплитуды и фазы СДВ-радиосигнала по результатам измерений.

Область возможных значений параметров β_0 и h'_0 для невозмущенной ионосферы показана на рис. 4 (область 1). Было принято, что в начальный момент времени t_0 значения этих параметров находятся в диапазонах $0.23 < \beta < 0.36$ и $66 < h' < 77$, а во время максимума вспышки t_1 значения этих параметров β_1 и h'_1 лежат в диапазонах $0.34 < \beta < 0.8$ и $54 < h' < 68$ (область 2 на рис. 4).

Отметим, что эти диапазоны существенно превышают диапазон значений параметров спокой-

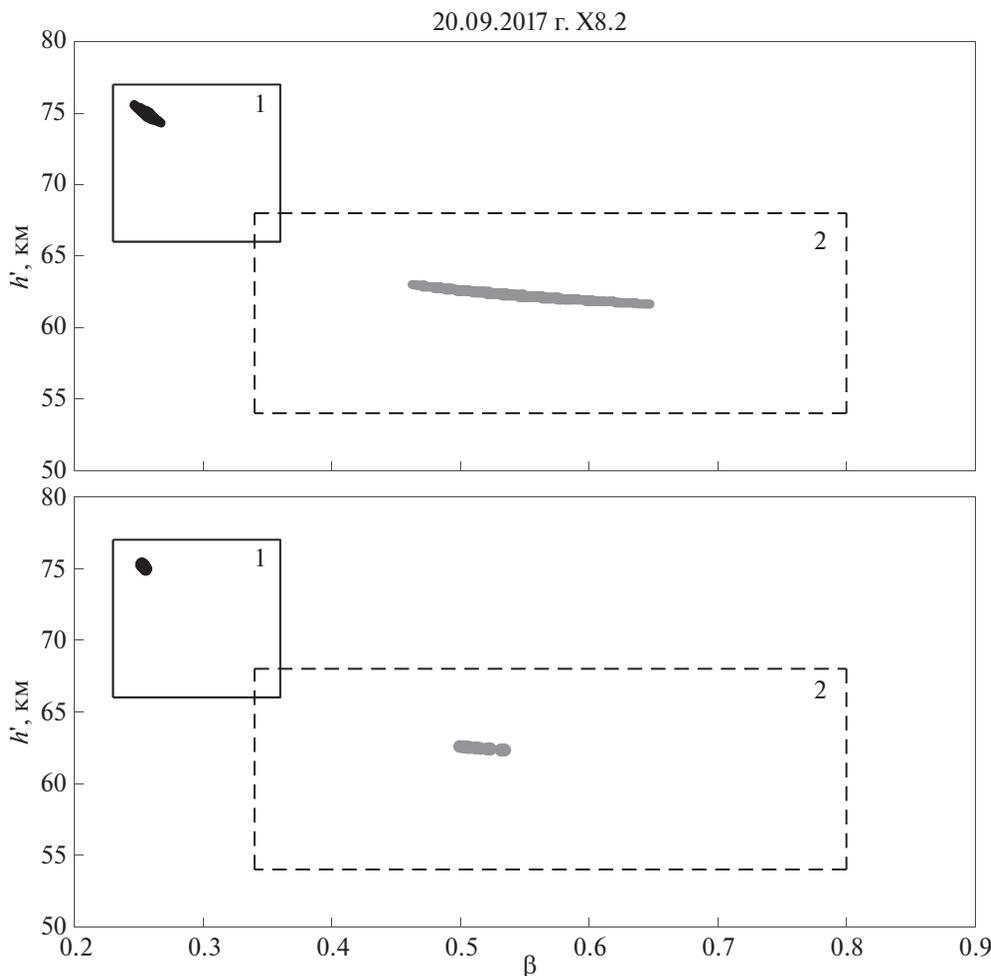


Рис. 4. Область значений параметров β и h' , при которых амплитуда и фаза сигналов в начале и в максимуме вспышки удовлетворяют системе (2) (верхняя панель) и системе (3) (нижняя панель).

ной и возмущенной ионосферы. На рисунке 4а показаны найденные значения β и h' , удовлетворяющие системе уравнений (2): β_0 и h'_0 – скоплением черных точек, β_1 и h'_1 – скоплением серых точек.

Среди полученных начальных и конечных значений β и h' были найдены такие значения, для которых вариации амплитуды и фазы за время от начала до максимума вспышки соответствует измеренным, т.е. удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{cases} \left| A_i(\beta_i, h'_i) - A_i(\beta_0, h'_0) - dA_i(t) \right| < \delta A \\ \left| P_i(\beta_i, h'_i) - P_i(\beta_0, h'_0) - dP_i(t) \right| < \delta P \\ t_0 < t < t_1. \end{cases} \quad (3)$$

Значения параметров β и h' в спокойных и возмущенных условиях, полученные в результате решения системы (3), показаны на рис. 4б скоплениями точек черного и серого цвета соответственно.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ результатов измерений и выполненных оценок показал, что вспышка привела к существенным изменениям состояния нижней ионосферы. Разработанная методика позволила восстановить параметры ионосферы, предшествующие вспышке. На рисунке 5 показаны зависимости параметров β и h' от потока рентгеновского излучения, полученные в нашей работе для вспышки X-класса 10 сентября 2017 г. (черные кривые), и значения тех же параметров, полученные в работах [Thomson, 2005; Basak and Chakrabarti, 2013] для ряда солнечных вспышек 2000–2011 гг. (серые кружки). В целом результаты оценок и расчетов близки. Незначительное расхождение между ними может быть обусловлено тем, что в реальных условиях состояние нижней ионосферы зависит от географического положения трассы и солнечно-зенитного угла.

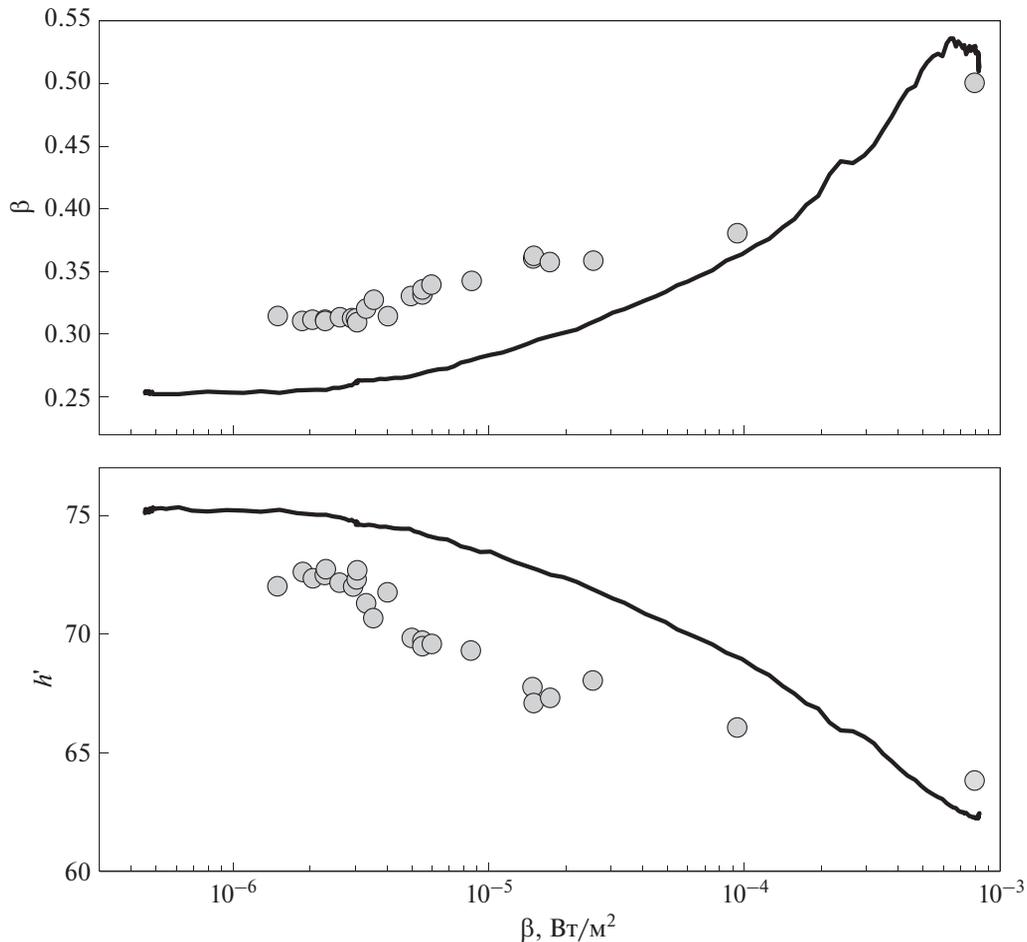


Рис. 5. Значения параметра β (верхняя панель) и параметра h' (нижняя панель) в зависимости от потока рентгена. Сплошными линиями показаны результаты, полученные в нашей работе, серыми кружками – результаты, полученные в работах [Thomson, 2005; Basak, Chakrabarti, 2013].

Наиболее существенным отличием нашей методики от подхода, использованного в работах [Thomson 2005, Basak and Chakrabarti, 2013] является то, в этих работах значения параметров спокойной (предвспышечной) ионосферы определялись по данным статистических и эмпирических моделей. В нашей работе значения параметров спокойной дневной ионосферы были получены путем анализа данных по изменению амплитудно-фазовых характеристик СДВ-сигналов на двухчастотной трассе во время вспышки.

Такой подход позволяет использовать параметры ионосферы, определенные в период рентгеновских вспышек, как дополнительный инструмент для восстановления профиля электронной концентрации невозмущенной D -области ионосферы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А17-117112350014-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Ряховский И.А. Коррелированные возмущения верхней и нижней ионосферы по данным синхронных измерений параметров сигналов ГНСС и радиосигналов ОНЧ-диапазона // Космич. исслед. Т. 57. № 1. С. 1–8. 2019.
- Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Ермак В.М. Удаленная регистрация КНЧ/ОНЧ излучения, вызванного экспериментами по искусственной модификации ионосферы // Геомагнетизм и аэронамия. Т. 55. № 4. С. 466–472. 2015.
- Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэронамия. Т. 54. № 6. С. 767–779. 2014.
- Basak T., Chakrabarti S.K. Effective recombination coefficient and solar zenith angle effects on low-latitude D-region ionosphere evaluated from VLF signal amplitude and its time delay during X-ray solar flares // Astrophys. Space Sci. 2013.
<https://doi.org/10.1007/s10509-013-1597-9>

- *Clilverd M.A., Seppala A., Rodger C.J., Thomson N.R., Verronen P.T., Turunen E., Ulich T., Lichtenberger J., Steinbach P.* Modeling polar ionospheric effects during the October–November 2003 solar proton events // *Radio Sci.* 41. RS2001. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005RS003290>
- *Ferguson J.A.* Ionospheric model validation at VLF and LF // *Radio Sci.* V. 30. № 3. P. 775–782. 1995.
- *Ferguson J.A.* Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0. Technical document 3030. Space and Naval Warfare Systems Center. San Diego. 1998.
- *Friedrich M., Pock C., Torkar K.* FIRI-2018, an updated empirical model of the lower ionosphere // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 123. P. 6737–6751. 2018.
- *Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E.* The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals // *J. Commun. Res. Lab.* V. 43. P. 169–180. 1996.
- *Klobuchar J.A., Whitney H. E.* Ionospheric electron content measurements during a solar eclipse // *J. Geophys. Res.* V. 70. P. 1254–1257. 1965.
- *Mitra A.P.* Ionospheric effects of solar flares. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co. 307 p. 1974.
- *Peter W.B., Chevalier M.W., Inan U.S.* Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 111. A03301. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011346>
- *Rodger C.J.*, Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations // *Rev. Geophys.* V. 37. P. 317–336. 1999.
- *Singh A.K., Singh R., Veenadhari B., Singh A.K.* Response of low latitude D – region ionosphere to the total solar eclipse of 22 July 20 09 deduced from ELF/VLF analysis // *Adv. Space Res.* V. 50. P. 1352–1361. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.07.005>
- *Tanaka Y.T., Raulin J.P., Bertoni F.C.P., Fagundes P.R., Chau J., Schuch N.J., Hobara Y., Terasawa T., Takahashi T.* First very low frequency detection of short repeated bursts from magnetar sgr j1550–5418 // *Astrophys. J. Lett.* V. 721. P. 24–27. 2010.
- *Thomson N.R., Rodger C.J., Clilverd M.A.* Large solar flares and their ionospheric D region enhancements // *J. Geophys. Res.* V. 110. A06306. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011008>
- *Thomson N.R., Rodger C.J., Clilverd M.A.* Daytime D region parameters from long-path VLF phase and amplitude // *J. Geophys. Res.* V. 116. A11305. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016910>
- *Thomson N.R., Rodger C.J., Dowden R.L.* Ionosphere gives size of greatest solar flare // *Geophys. Res. Lett.* V. 31. L06803. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003GL019345>
- *Thomson N.R.* Daytime tropical D region parameters from short path VLF phase and amplitude // *J. Geophys. Res.* V. 115. A09313. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015355>
- *Wait J.R., Spies K.P.* Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves: NBS Technical Note, 300. 1964.