

УДК 550.388.2

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕШИРОТНОЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ М- И Х-КЛАССОВ

© 2020 г. Б. Г. Гаврилов¹, *, В. М. Ермак¹, А. Н. Ляхов¹,
Ю. В. Поклад¹, **, В. А. Рыбаков¹, И. А. Ряховский¹, ***

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 15.04.2020 г.

После доработки 23.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

В работе представлены результаты восстановления эффективной высоты h' и крутизны профиля β электронной концентрации в D -слое ионосферы во время рентгеновских вспышек М- и Х-классов на средних широтах. Восстановление проведено с использованием данных измерений в обсерватории ИДГ РАН Михнево амплитуд и фаз сигналов СДВ-передатчиков GQD (19.6 кГц) и GBZ (22.1 кГц), распространяющихся вдоль одной среднеширотной трассы. В результате расчетов получены эмпирические зависимости параметров h' и β от энергии вспышки по данным измерений потока рентгеновского излучения на спутнике GOES в диапазоне 0.05–0.4 нм. Предложены критерии отбора солнечных вспышек для задач верификации теоретических вычислительных моделей.

DOI: 10.31857/S0016794020060048

1. ВВЕДЕНИЕ

Физические процессы в нижней ионосфере и их влияние на распространение СДВ-радиоволн — наиболее доступного инструмента контроля среды — были исследованы и сформулированы в начале 70-х гг. [Данилов, 1967; Mitra, 1974]. Источники ионизации средней атмосферы считались известными, и требовалось лишь уточнение зависимости потоков УФ и ГКЛ с измеряемыми индексами солнечной активности $F10.7$ [Brassier, 2005]. Ошибки теоретических моделей обычно приписывают процессам переноса малых нейтральных компонент и динамике планетарных волн [Егошин и др., 2012]. Новые задачи глобального моделирования климата привели к разработке глобальных вычислительных моделей атмосферы Земли для высот от 0 до 1000 км, сочетающих классические схемы ионизации [Brassier, 2005], трехмерную динамику и подробные схемы ионизационно-рекомбинационных циклов [Akmaev, 2011; Kulyamin and Dumnikov, 2015; Krivolutsky et al., 2015; Veronnen et al., 2016], затрагивающие NO_x группу и озон, важные для термодинамического состояния глобальной атмосферы [Mitra, 1974]. Процедура верификации моделей столкнулась с целым рядом проблем, связанных с ошибками в описании химических процессов в средней атмосфере, и с тем, что не учитывались

источники, инициирующие важные цепочки фотодиссоциационных и ионизационных процессов [Anderson et al., 2014; Kelly et al., 2018; Funke et al., 2011]. Самым надежным и доступным методом верификации моделей нижней ионосферы является мониторинг КНЧ/ОНЧ-радиоволн в диапазоне от частот шумановского резонатора до СДВ/ДВ-передатчиков [Lyakhov et al., 2019]. Доступный объем глобальных данных радиомониторинга требует корректной количественной интерпретации в терминах общепринятой эмпирической модели. Это необходимо для осмысленной модификации ионизационно-рекомбинационных схем: как набора химических реакций, так и расчетных моделей первичной ионизации, в части учета жесткой и сверхжесткой части спектра излучения Солнца.

Общепринятой эмпирической моделью нижней ионосферы является двухпараметрическая модель Фергюссона–Вайта [Wait and Spies, 1964]. В ней высотный профиль электронной концентрации в $[\text{см}^{-3}]$ определяется двумя параметрами:

$$Ne(z) = 1.43 \times 10^7 \times \exp(\beta - 0.15)(z - h') \exp(-0.15h'), \quad (1)$$

где h' (км) — эффективная высота и β (км^{-1}) — крутизна профиля. В спокойных условиях пара-

метры h' и β зависят от солнечного зенитного угла [Ferguson, 1995], $\beta \sim 0.3$, h' меняется от 72 км днем до 83 км ночью. Проблемы с моделью (1) начинаются при значительной неоднородности по трассе: оказывается возможным получать одни и те же значения амплитуды радиосигнала при разных профилях h' и β по трассе распространения. Поэтому разумно использовать данную модель в условиях, когда освещенность трассы более или менее однородна.

Модель (1) используется многими исследователями для решения обратной задачи — восстановления профилей электронной концентрации во времени. Для этого выбирается спокойный день, для которого определяются значения параметров h' и β и базовая амплитуда A_0 . Далее исследуется динамика амплитуды во время возмущений и из решения задачи оптимизации (минимизация невязки отношений расчетной и измеренной амплитуды к базовой) находится новая пара значений h' и β [Kolarski and Grubor, 2014; Kaufmann et al., 2002; Mc Rae and Thomson, 2004; Thomson et al., 2005; Grubor et al., 2008]. В большинстве случаев расчеты выполняются с использованием программы LWPC [Ferguson, 1995].

При спокойном Солнце интенсивность рентгеновского излучения в области длин волн 0.05–0.8 нм составляет 10^{-8} – 10^{-7} Вт/м². Во время солнечной вспышки излучение в этой спектральной области может возрастать на несколько порядков и достигать величин 10^{-8} – 10^{-7} Вт/см² для рентгеновских вспышек X-класса. Жесткое излучение вызывает дополнительную ионизацию на высотах D-слоя ионосферы, т.е. в зоне отражения сигналов СДВ-диапазона. Процесс, как правило, длится от минут до 1–2 ч, что позволяет удовлетворить требованию рассмотрения динамики ионосферы в условиях однородной освещенности.

В работе [Schmitter, 2013] была предпринята попытка построить модель, являющуюся промежуточной между чисто эмпирическим подбором h' и β и полноценными плазмохимическими расчетами. Система уравнений для динамики h' и β включает ионизацию рентгеновским излучением в диапазоне 0.05–0.4 нм, рекомбинацию и прилипание, явный учет временной задержки функции источника. Результаты, полученные для двух дней и девяти вспышек, являются противоречивыми. Не совпадает качество решения для длинной (2210 км NRK, 37.5 кГц, азимут 318°) и короткой (GBZ, 800 км 19.6 кГц, азимут 298°) трасс.

Принципиальным недостатком перечисленных работ является использование данных по вариациям амплитуд и фаз КНЧ/ОНЧ-радиосигналов для одной трассы. В результате для двух неизвестных параметров h' и β получаем не доопределенную задачу. В работе [Гаврилов и др., 2019] предложена методика определения параметров h' и β

в рамках модели Фергюссона–Уайта [Waitand Spies, 1964] по данным одновременной регистрации амплитуд и относительных фаз сигналов радиостанций GBZ и GQD, расположенных на расстоянии 32 км друг от друга. Основным отличием данной методики является то, что она позволяет получить абсолютные значения параметров нижней ионосферы, а не относительные, привязанные к предполагаемому начальному состоянию. Практически совпадающие трассы распространения дают четыре измеренных параметра при двух неизвестных, что сводит проблему к классической переопределенной задаче, решаемой методом наименьших квадратов и устойчивой к малым вариациям входных параметров. С использованием этой методики проводится анализ отклика нижней ионосферы на солнечные вспышки разных классов. Задачей анализа является определение зависимости параметров h' и β от параметров вспышки и, в частности, выяснение вопроса о том, что сильнее влияет на нижнюю ионосферу, энергетика вспышки или жесткость ее спектра.

2. ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ГФО Михнево (54°57' N, 37°46' E) проводится мониторинг сигналов радиостанций СДВ-диапазона [Гаврилов и др., 2017; Поклад и др., 2019]. Регистрация сигналов выполняется высокочастотным магнитометром Metronix-ADU07 на горизонтальные магнитные антенны, ориентированные в направлениях север–юг и восток–запад. Полученные волновые формы вариаций магнитного поля с частотой оцифровки 128 кГц позволяют исследовать временной ход амплитуды и относительной фазы сигналов на частотах передатчиков в полосе 200 Гц с шагом 1 с.

Для анализа экспериментальных данных были выбраны 6 рентгеновских вспышек M- и X-классов, произошедших в 2014–2017 гг., которые характеризовались крутым передним фронтом нарастания потока рентгеновского излучения. Список вспышек и их основные параметры приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что время нарастания потока рентгеновского излучения для всех вспышек не превышает 11 мин, кроме вспышки класса X1.3, для которой это время составило 15.5 мин.

На верхних панелях рис. 1–3 приведены временные зависимости эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β для всех рассматриваемых вспышек, рассчитанные по экспериментальным данным. На нижних панелях показано изменение потока рентгеновского излучения в диапазонах 0.05–0.4 нм и 0.1–0.8 нм по данным спутника GOES.

Таблица 1. Основные параметры вспышек

Дата	Класс	Время начала, UT	Время максимума потока 0.1–0.8 нм, UT
10.06.2014 г.	X2.2	11:38:24	11:42:05
06.09.2017 г.	X2.2	08:59:24	09:10:27
06.09.2017 г.	X9.3	11:53:24	12:02:14
07.09.2017 г.	M1.3	09:51:00	09:54:07
07.09.2017 г.	M7.3	10:13:12	10:15:47
07.09.2017 г.	X1.3	14:21:00	14:36:33

Отметим некоторые особенности спутниковых данных. Вспышка класса M 7.3 07 сентября 2017 г. последовала спустя 20 мин после вспышки класса M1.3. Из рисунка 3 видно, что параметры ионосферы после вспышки M 1.3 не успели вернуться в исходное состояние и рентгеновское излучение вспышки M 7.3 воздействовало на возмущенную ионосферу. Вспышка класса X1.3 07 сентября 2017 г. отличается длительным фронтом нарастания потока рентгеновского излучения. За

первые 10 мин поток рентгеновского излучения вырос до уровня чуть более 2×10^{-6} Вт/м², что соответствует вспышкам класса C, а длительность основного фронта нарастания потока рентгеновского излучения составила 5.5 мин.

Результаты обработки экспериментальных данных для всех анализируемых вспышек представлены на рис. 4. Приведены значения эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от энергии

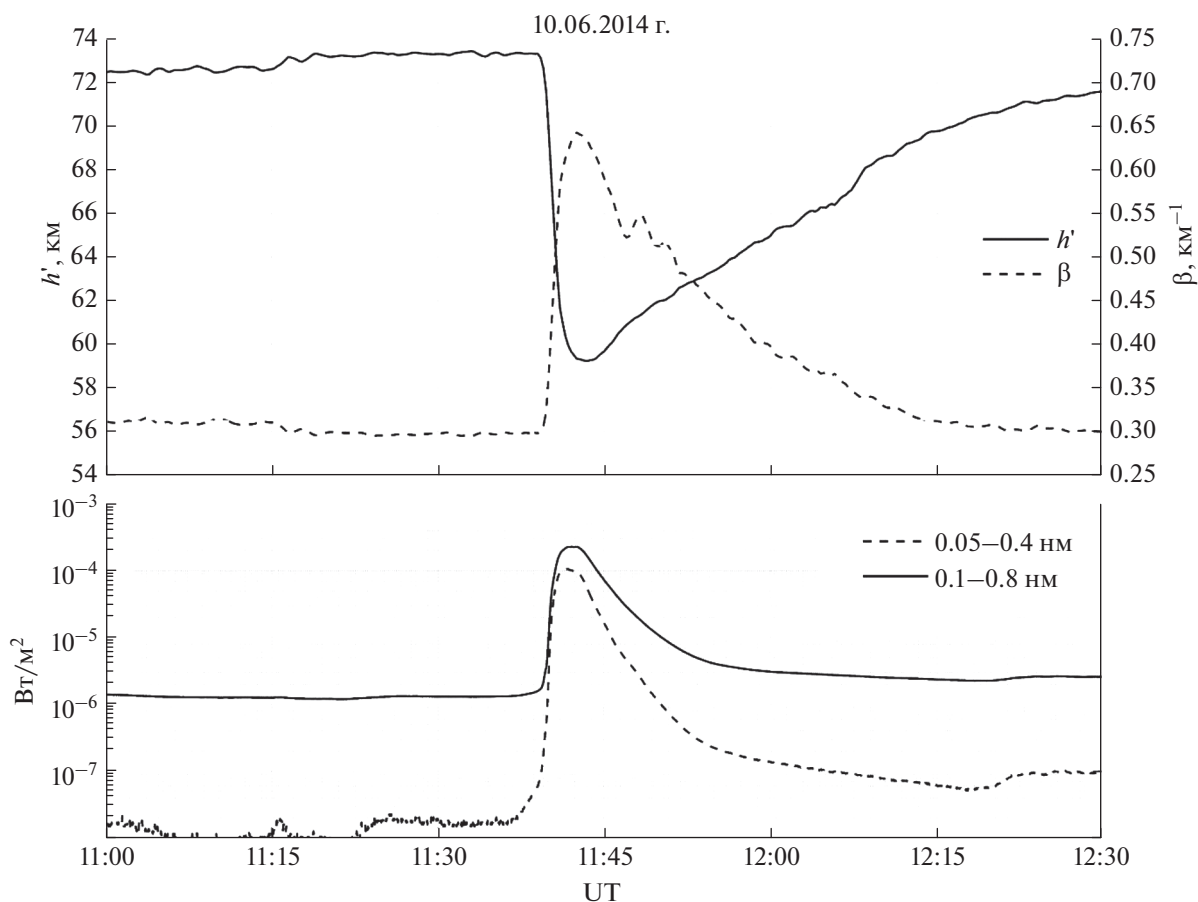


Рис. 1. Зависимость эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от времени для вспышки класса X1.3, произошедшей 10 июня 2014 г.

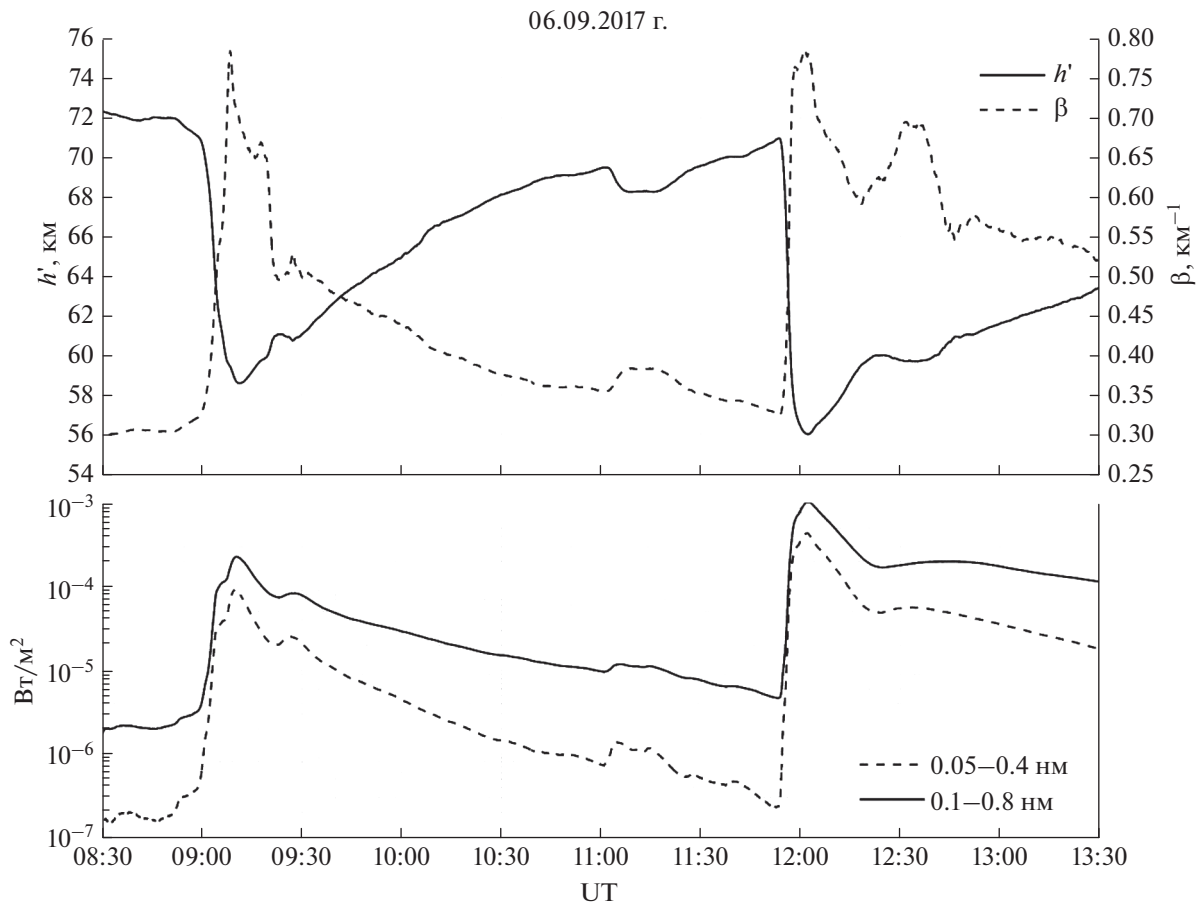


Рис. 2. Зависимость эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от времени для вспышек класса X2.2 и X9.3, произошедших 06 сентября 2017 г.

рентгеновского излучения в диапазоне 0.05–0.4 нм по данным спутника GOES. Энергия вычислялась интегрированием потока рентгеновского излучения, умноженного на косинус зенитного угла Солнца на середине трассы. Из рисунка 4 хорошо видно, что вне зависимости от начальных условий, зависимость эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от энергии выходит на единый тренд начиная с энергии $\sim 0.04\text{--}0.07$ мДж/см². Если предположить, что зависимость h' и β от логарифма энергии излучения в диапазоне 0.07–15 мДж/см² является линейной, то уравнения этих прямых будут иметь вид:

$$h' = -5.3\lg(E) + 63.3, \quad (2)$$

$$\beta = 0.18\lg(E) + 0.54. \quad (3)$$

Эти прямые на рис. 4 показаны штрихпунктирной и пунктирной линиями соответственно. Среднеквадратичное отклонение параметров ионосферы от линейных трендов (2) и (3) составляет 1.1 км и 0.04 км^{-1} соответственно.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Погрешность определения градиента электронной концентрации β по данным сигналов СДВ-радиостанций растет с увеличением энергии рентгеновского излучения вспышки. Это может быть связано с эффектом насыщения, когда дальнейшее увеличение электронной концентрации на верхней стенке волновода уже не оказывает существенного влияния на параметры СДВ-сигналов.

Наибольшее отличие зависимости h' и β от линейных трендов для вспышки класса M7.3 07 сентября 2017 г. может быть объяснено наличием в спектре этой вспышки заметной компоненты сверх жесткого рентгеновского излучения (СЖР).

Отличие зависимостей h' и β от линейных трендов для вспышки класса X1.3 07 сентября 2017 г. в диапазоне энергий 0.02–0.2 Дж/м² в диапазоне 0.05–0.4 нм может быть связано с плавным нарастанием потока излучения перед основным фронтом вспышки.

В работах [Pacini and Raulin, 2006; Pandey et al., 2015] приводятся зависимости относительного

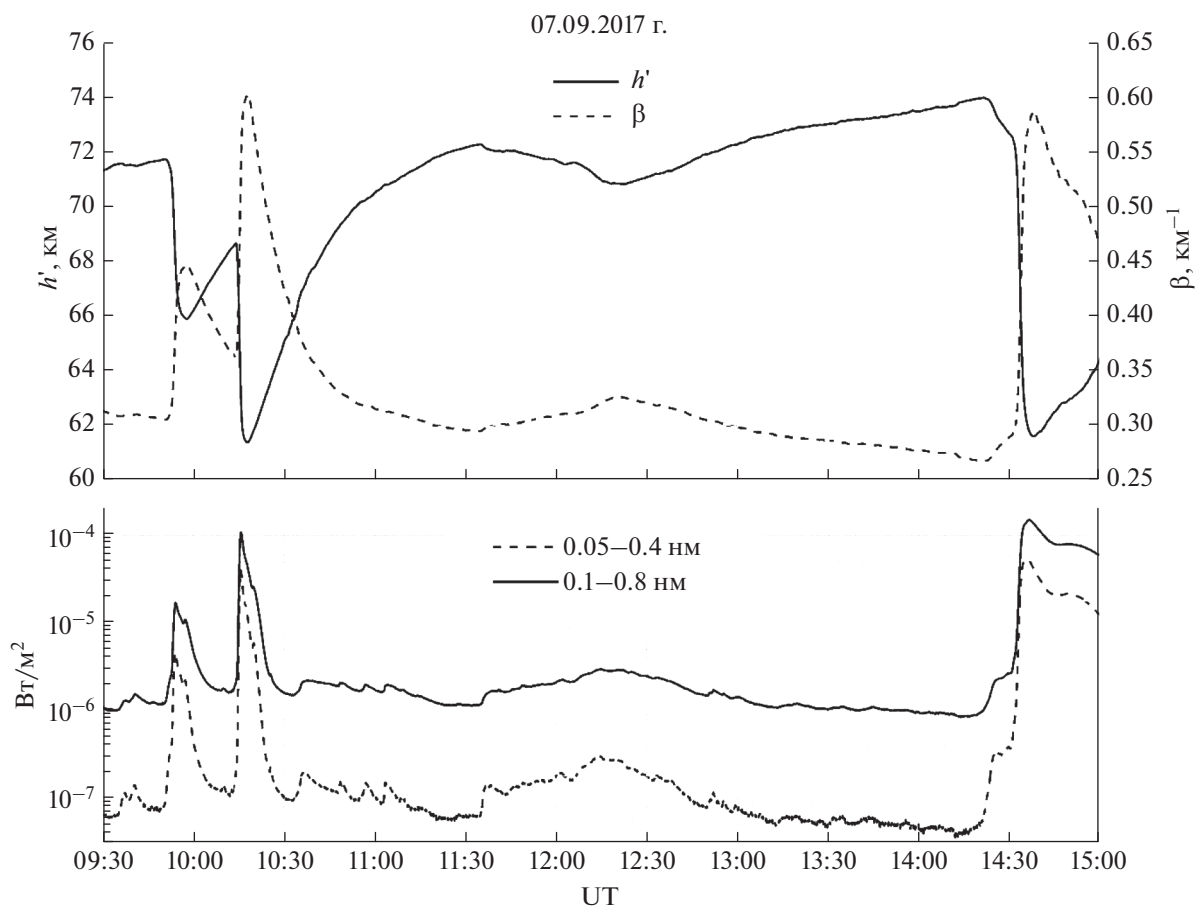


Рис. 3. Зависимость эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от времени для вспышек класса M1.3, M7.3 и X1.3, произошедших 07 сентября 2017 г.

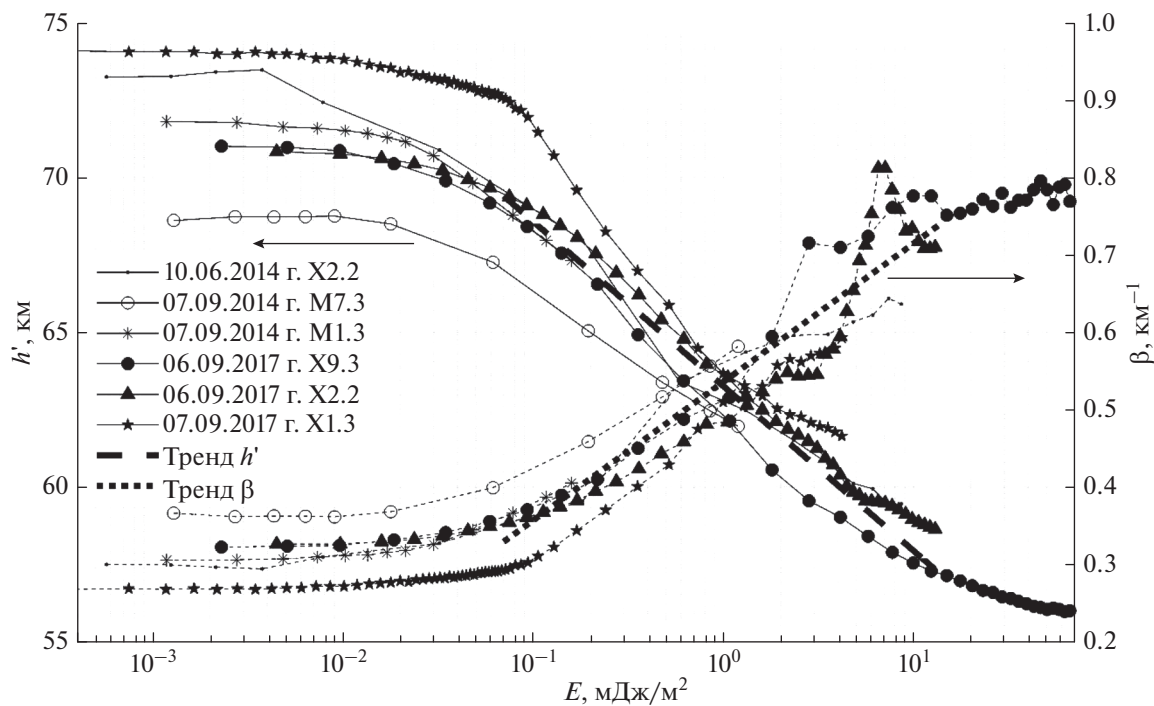


Рис. 4. Зависимость эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от энергии рентгеновского излучения в диапазоне 0.05–0.4 нм.

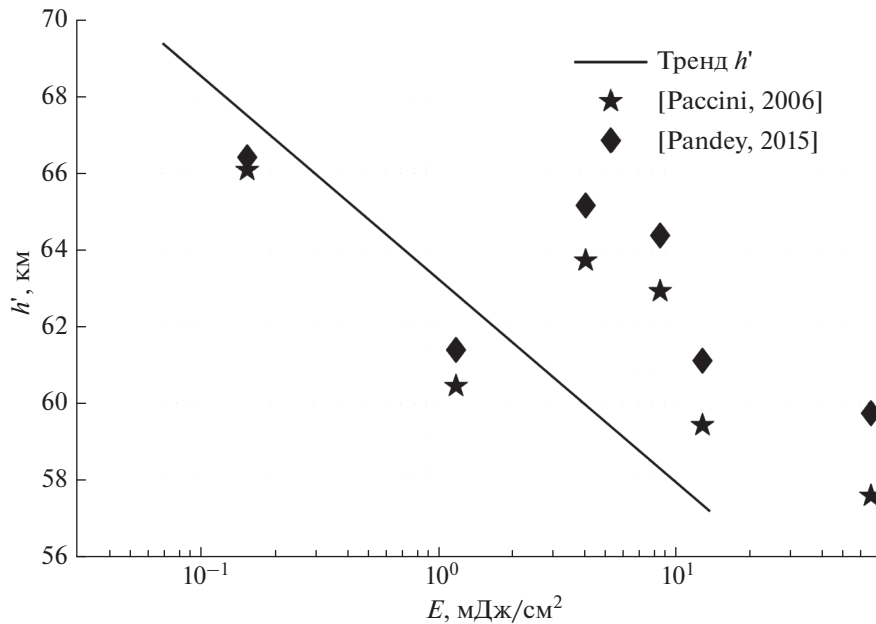


Рис. 5. Сравнение линейного тренда зависимости эффективной высоты отражения h' с результатами Pascini et al. [2006], Pandey et al. [2015].

изменения эффективной высоты отражения h' от энергии излучения в диапазоне 0.05–0.4 нм. В работе [Pascini and Raulin, 2006] рассматривались экваториальные и южноамериканские трассы, а в работе [Pandey et al., 2015] – среднеширотные и экваториальные трассы. На рисунке 5 сплошной линией показан полученный нами линейный тренд зависимости высоты h' от энергии. Звездочками и ромбами показаны значения h' , пересчитанные для рассмотренных нами вспышек согласно зависимостям, приведенным в публикациях [Pascini and Raulin, 2006; Pandey et al., 2015].

Мы интерпретируем наличие единого тренда превышением характерного времени рекомбинации в D -слое ионосферы (56–68 км) во время рентгеновских вспышек М- и Х-классов характерной длительности переднего фронта рассматриваемых вспышек. Для таких вспышек величина электронной концентрации в D -слое ионосферы будет определяться энергией излучения (жесткость спектра), а не полным интегральным потоком.

Таким образом, использование разработанной методики восстановления профилей электронной концентрации в нижней ионосфере при рентгеновских вспышках разных классов на паре совпадающих среднеширотных радиотрасс СДВ-передатчиков GQD и GBZ позволило получить количественные данные о зависимости восстановленных параметров h' и β от параметров возмущений. Полученные результаты должны учитываться при разработке теоретических вычислительных моделей нижней ионосферы и отборе

экспериментальных данных для их верификации. По-видимому, целесообразно отдельно рассматривать эффекты вспышек, отличающихся по крутизне переднего фронта потока излучения. Если длительность переднего фронта меньше характерного времени рекомбинации в D -слое, профиль электронной концентрации будет зависеть от жесткости спектра излучения, и в этом случае в задачах моделирования необходимо использовать либо исходные измерения спектров излучения, либо адаптивные современные модели ионизации [Korsunskaja, 2019]. Важно отметить, что для вспышек такого класса профиль электронной концентрации будет зависеть от энергии жесткого излучения, а не его потока. Для остальных вспышек достаточно использовать данные интегральных измерений спутников GOES. Длительные вспышки целесообразно использовать для отработки химических блоков ионизационно-рекомбинационных циклов, включающих кинетику малых нейтральных компонент, а короткие вспышки с СЖР-компонентой – для отработки и верификации моделей расчета источника ионизации и кинетических самосогласованных моделей зависимости скоростей химических реакций от мощности источника ионизации.

При анализе экспериментальных данных надо вероятно учитывать и особенности спектров вспышек по данным солнечной спутниковой обсерватории RHESSI (<http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/>). Так, вспышки X1.3 и M7.3 07 сентября 2017 г., для которых наблюдается наибольшее отклонение от общего тренда (рис. 4),

существенно отличаются по энергетическому спектру: первый имеет монотонный характер и наблюдается только в каналах 6–12 и 12–25 кэВ, а второй содержит значительную компоненту в каналах 50–100 кэВ и 100–300 кэВ в СЖР-диапазоне. Влияние энергетического спектра солнечного излучения на эффекты в D-области ионосферы требуют дальнейшего теоретического и экспериментального изучения.

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. Пространственно-временные распределения электронной плотности в ионосфере по данным регистрации полного электронного содержания и фазы ОНЧ-радиосигналов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 4. С. 500–509. 2017.
- Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Поклад Ю.В., Ряховский И.А. Оценка изменений параметров среднеширотной нижней ионосферы, вызванных солнечной вспышкой 10 сентября 2017 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 5. С. 628–634. 2019.
- Данилов А.Д. Химия ионосферы. Л.: Гидрометеиздат. 295 с. 1967.
- Егосин А.А., Ермак В.М., Зецер Ю.И., Козлов С.И., Кудрявцев В.П., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Якименко Е.Н. Влияние метеорологических и волновых процессов на нижнюю ионосферу в условиях минимума солнечной активности по экспериментальным данным о распространении СДВ-ДВ в средних широтах // Физика Земли. № 3. С. 101–111. 2012.
- Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ляхов А.Н., Рыбаков В.А., Ряховский И.А. Восстановление параметров D-слоя ионосферы по данным амплитудно-фазовых измерений на двухчастотной СДВ трассе / Распространение радиоволн. Тр. XXVI Всероссийской открытой науч. конф. Т. 1. С. 502–505. 2019.
- Акмаев Р.А. Whole atmosphere modeling: Connecting terrestrial and space weather // Rev. Geophys. N49. 2011.
- Andersson M.E., Verronen P.T., Rodger C.J., Clilverd M.A., Sepp A. Missing driver in the Sun–Earth connection from energetic electron precipitation impacts mesospheric ozone // Nat. Commun. № 5. P. 5197–6201. 2014.
- Brassier G.P., Solomon S. Aeronomy of middle atmosphere. Dordrecht: Springer. 651 p. 2005.
- Ferguson J.A. Ionospheric model validation at VLF and LF // Radio Sci. V. 30. № 3. P. 775–782. 1995. <https://doi.org/10.1029/94RS03190>
- Funke B., Baumgaertner A., Calisto M. et al. Composition changes after the Halloween solar proton event: The High-Energy Particle Precipitation in the atmosphere (HEPPA) model versus MIPAS data inter comparison study // Atmos. Chem. Phys. № 11. P. 9089–9139. 2011.
- 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. Geophysicae. V. 26. P. 1731–1740. 2008.
- Kaufmann P., Piazza L.R., Fernandez J.H. Solar flares not producing sudden phase advances // J. Geophys. Res. V. 107. № A8. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA000292>
- Kelly C.W., Chipperfield M.P., Plane J.M. C., Feng W., Sheese P.E., Walker K.A., Boone C.D. An explanation for the nitrous oxide layer observed in the mesopause region // Geophys. Res. Lett. V. 45. P. 7818–7827. 2018.
- Kolarski A., Grubor D. Sensing the Earth’s low ionosphere during solar flares using VLF signals and GOES solar X-ray data // Adv. Space Res. V. 53. P. 1595–1602. 2014.
- Korsunskaja J.A. Heuristic model of solar x-ray spectrum according to satellite data for geophysical applications // Solar-Terrestrial Physics. V. 5. № 3. P. 75–86. 2019. <https://doi.org/10.12737/stp-53201909>
- Krivolutsky A.A., Cherepanova L.A., Vyushkova T.Y., Repnev A.I. The three-dimensional global numerical model CHARM-I: The incorporation of processes in the ionospheric D-region // Geomagn. Aeron. V. 55. № @. P. 467–486. 2015.
- Kulyamin D.V., Dymnikov V.P. Modeling of the lower ionosphere climate // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. V. 51(3). P. 272–291. 2015.
- Lyakhov A.N., Kozlov S.I., Losseva T.V., Bekker S.Z., Korsunskaya J.A., Gavrilov B.G., Kudryavtsev V.P., Goncharov E.S. The comparison of standard and swarm D-layer ionosphere models on the simulation of the X-ray solar flare response // 25th Internat. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics / Ed. G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii. Proc. SPIE. V. 11208. P. 112088Z. 2019. <https://doi.org/10.1117/12.2540423>
- McRae W.M., Thomson N.R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 66. P. 77–87. 2004.
- Mitra A.P. Ionospheric effects of solar flares. Norwell, Mass.: D. Reidel Publishing Company. 307 p. 1974.
- Pacini A.A., Raulin J.P. Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relationship: A solar cycle phase dependence // J. Geophys. Res. V. 111. № A09301. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006JA011613>
- Pandey U., Singh B., Singh O.P., Saraswat V.K. Solar flare induced ionospheric D-region perturbation as observed at a low latitude station Agra, India // Astrophys. Space Sci. 357:35. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10509-015-2279-6>
- Schmitter E.D. Modelling solar flare induced lower ionosphere changes using VLF-LF transmitters amplitude and phase observations at a midlatitude site // Ann. Geophysicae. V. 31. P. 765–773. 2013. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-765-2013>
- 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.
- Verronen P.T., Andersson M.E., Marsh D.R., Kovacs T., Plane J.M.C. WACCM-D – Whole Atmosphere Community Climate Model with D-region ion chemistry // J. Adv. Model. Earth Syst. (8). P. 954–975. 2016.
- Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves NBS Tech. Note. 300 p. 1964.