

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК НА ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН СДВ ДИАПАЗОНА

*Ю.В. Поклад, В.А. Рыбаков, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак,
А.В. Крашенинников, И.А. Ряховский, С.П. Соловьев*

В работе приведены результаты исследования возмущений приземного электрического поля и изменения условий распространения волн СДВ диапазона во время рентгеновских вспышек на Солнце по данным аппаратуры, установленной в геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево».

Введение

Одним из факторов, влияющих на состояние верхних слоев земной атмосферы, являются рентгеновские вспышки на Солнце. При спокойном Солнце интенсивность рентгеновского излучения в области длин волн 1–10 А составляет 10^{-7} – 10^{-8} Вт/м². Хотя излучение в этой области спектра может ионизовать воздух ниже D-слоя, но по сравнению с солнечной постоянной ($\sim 10^3$ Вт/м²) эта величина пренебрежимо мала. Во время солнечной вспышки излучение в этой спектральной обла-

сти может возрастать на 3–5 порядков и достигать величин 10^4 – 10^3 Вт/см² (рентгеновские вспышки X-класса). Эта величина также мала по сравнению с общим потоком солнечного излучения, но может вызвать дополнительную ионизацию воздуха на высотах D-слоя ионосферы и ниже, где степень ионизации низка. Особенностью рентгеновских вспышек является быстрое нарастание потока излучения – на 1–2 порядка за минуты или даже десятки секунд. Связанный с этим рост ионизации может быть обнаружен при измерениях на поверхности Земли.

Возникшая область ионизации и изменение проводимости приводит к изменениям амплитуды и фазы при распространении СДВ сигналов и колебаниям напряженности электрического поля и атмосферного тока у земной поверхности

Ионосферные эффекты во время солнечных вспышек рассмотрены в монографии [Mitra, 1974]. На основании этих представлений разработаны расчетные модели «базовой» ионосферы и проведена их верификация [Ferguson, 1992; Ferguson, 1995]. Прохождение СДВ сигналов в ионосфере, возмущенной рентгеновскими вспышками, рассмотрено в работе [Sujay, Chakrabarti, 2010] и полученные ими коэффициенты должны быть введены в расчетную модель [Ferguson, 1998].

Целью настоящей работы является получение и анализ экспериментальных данных о влиянии рентгеновских вспышек на прохождение СДВ сигналов, колебаний электрического поля у поверхности Земли. На основе полученных экспериментальных данных проводится верификация моделей прохождения СДВ и, в более широком смысле, моделей состояния D-слоя ионосферы.

Постановка эксперимента

В геофизической обсерватории (ГФО) ИДГ РАН «Михнево» с 2011 года проводятся измерения напряженности электрического поля и вертикальных атмосферных токов, а также ведется мониторинг сигналов СДВ радиостанций. В качестве антенн для исследования распространения СДВ сигналов используются магнитометры MFS-07 фирмы «Metronix». Оси антенн расположены в направлениях магнитный Север-Юг (X-компонента) и магнитный Восток-Запад (Y-компонента). Частота оцифровки составляет 65536 Гц. Список СДВ радиостанций, сигналы которых устойчиво принимаются в ГФО «Михнево», приведен в табл. 1. На рис. 1 приведена карта трасс СДВ радиостанций, принимаемых в ГФО «Михнево».

Таблица 1

СДВ станция	Частота, Гц	Широта	Долгота	Азимут от «Михнево»	Примечание
VTX	16300, 17000	08,387	77,753	130,0	Юг Индии
JXN	16400	66,9743	13,8736		Север Норвегии
HWU	18300, 21750	46,713	1,245	265,4	Центр Франции
GBZ	19580	54,912	-3,278	286,9	Англия, южнее Эдинбурга
NWC	19800	-21,816	114,166	113,3	Северо-Запад Австралии
ICV	20270	40,923	9,731	244,5	Италия, Сардиния

СДВ станция	Частота, Гц	Широта	Долгота	Азимут от «Михнево»	Примечание
FTA	20900	48,545	2,579	268,1	Франция, южнее Парижа
GQD	22100	54,732	-2,883	286,3	Англия, южнее Эдинбурга
DHO	23400	53,074	7,614	276,4	Германия, северо-запад
NAA	24000	44,645	-67,282	308,9	США, северо-восток
NPM	21400	21,420	-158,151	15,1	США, Перл-Харбор
TBB	26700	37,418	27,323	206,4	Турция, юго-запад

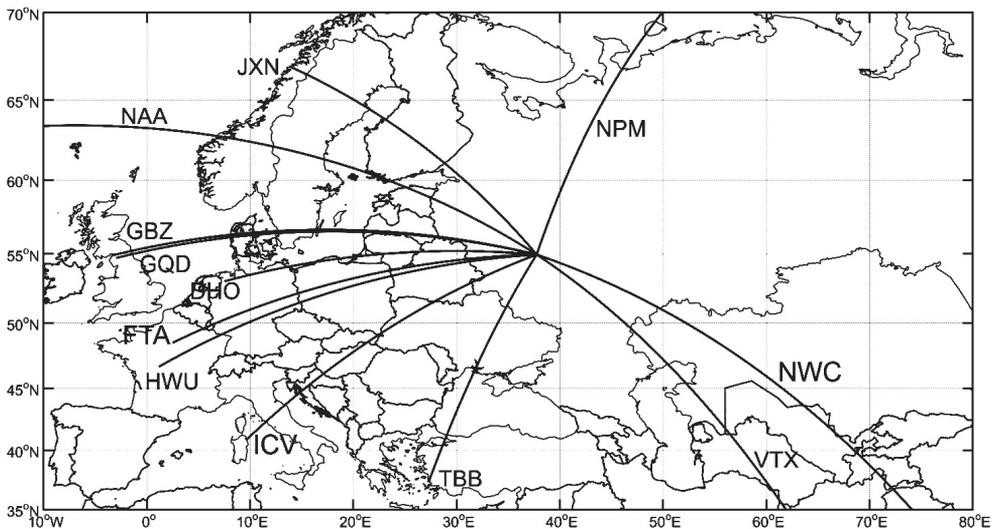


Рис. 1. Карта трасс СДВ радиостанций, принимаемых в ГФО «Михнево»

Для регистрации вертикальной компоненты приземного электрического поля используется электростатический флюксометр, который работает в частотном диапазоне от 0 до 20 Гц при и диапазоне амплитуд от 1 до 5000 В/м. Измерения атмосферного тока в диапазоне 0,1–80 пА/м² проводятся с использованием двухэлектродного датчика тока.

Результаты измерений

Типичная регистрограмма сигналов от выбранных станций СДВ диапазона, показана на рис. 2. На рис. 3 представлены результаты измерений фаз (верхняя панель) и амплитуд (средняя панель) СДВ сигналов с трех передатчиков: DHO, GQD и ICV (в таблице отмечены серым цветом), расположенных в Германии, Англии и Италии, соответственно. На нижней панели представлена интенсивность рентгеновского излучения во время вспышки М класса.

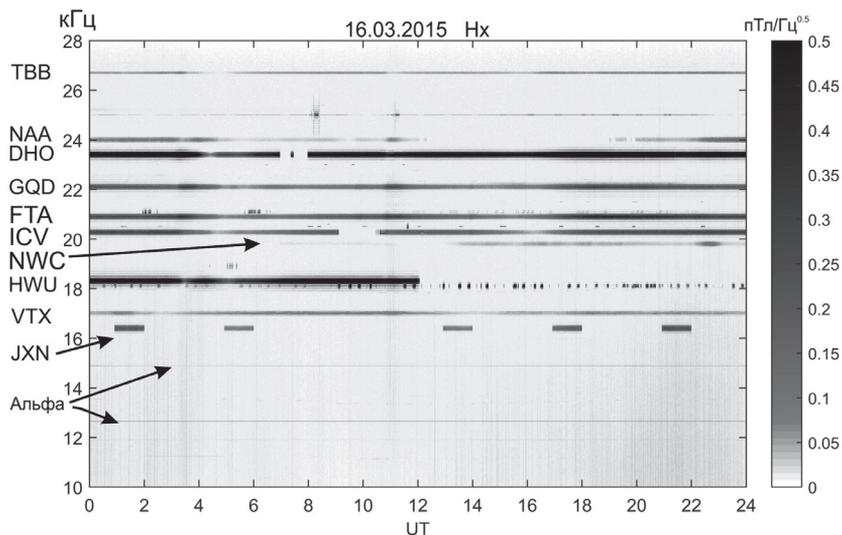


Рис. 2. Характерный спектр сигналов в СДВ диапазоне

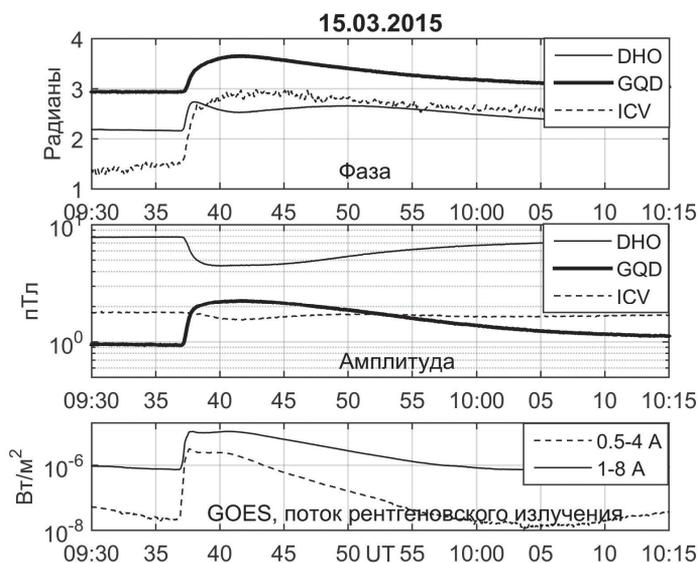


Рис. 3. Результаты изменения фаз (верхняя панель) и амплитуд (средняя панель) СДВ сигналов с трех передатчиков: DHO, GQD и ICV. Нижняя панель-интенсивность рентгеновского излучения

Вспышка имеет достаточно крутой фронт нарастания потока излучения – порядка 30 секунд. Реакция в амплитудах и фазах сигналов заметно отличается. Значение фазы сигналов всех трех передатчиков синхронно возрастает, изменение амплитуд сигналов по разным трассам заметно отличается. Трасса ICV дает малое изменение в амплитуде сигнала, но заметный скачок по фазе. Изменение амплитуд

сигналов на близких трассах DHO и GQD противоположно по знаку. Временной ход изменения амплитуд и фаз практически совпадают с ростом амплитуды рентгеновского излучения. Задержка составляет не более 8 секунд. Для сравнения с результатами эксперимента были проведены расчеты амплитуды сигнала и фазы для передатчиков DHO и GQD. Расчеты для «базовой» (то есть спокойной) ионосферы проводились по программе [Ferguson, 1992], для возмущенной – рентгеновской вспышки класса M2 (для области спектра 0,5–4 А) по программе [Ferguson, 1998] с учетом коэффициентов из работы [Suja, Chakrabarti, 2010].

В табл. 2 проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетными.

Таблица 2

Трасса	Отношение амплитуд в эксперименте	Отношение амплитуд в расчете	Изменение фазы в эксперименте, рад	Изменение фазы в расчете, рад
GQD–«Михнево»	2,2	1,6	0,7	0,17
DHO–«Михнево»	0,5	0,94	0,6	0,35

Амплитуда принимаемого сигнала для передатчика GQD увеличилась, для передатчика DHO уменьшилась, что соответствует экспериментальным результатам, но само изменение амплитуды заметно отличается, особенно для трассы DHO. Расчетные изменения фазы также отличаются от экспериментальных. В дальнейшем

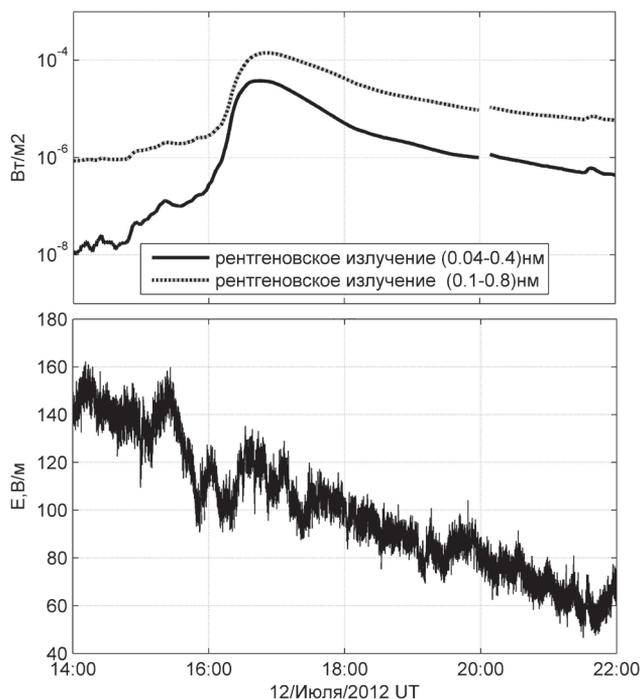


Рис. 4. Интенсивность рентгеновского излучения по данным спутников GOES (верхняя панель) и напряженность электрического поля (нижняя панель)

предполагается проведение расчетов по более совершенной программе, разработанной в ИДГ РАН, и подробное сравнение с экспериментом.

Во время сильных солнечных вспышек наблюдались изменения напряженности электрического поля у поверхности Земли. На рис. 4 приведены записи солнечного излучения в рентгеновском диапазоне и напряженности электрического поля за 12 июля 2012 г.

В этот день произошла мощная вспышка X-класса. Началась она, примерно, в 16 UT (заход солнца на поверхности Земли около 18 UT), а на высотах десятки км примерно на 1 час позже). На записи электрического поля с началом рентгеновской вспышки возникают вариации, которые по времени близки к длительности вспышки. Рис. 4 наглядно демонстрирует влияние ионизации воздуха при мощной рентгеновской вспышке на ход электрического поля у земной поверхности. Подобный эффект наблюдается во время сильных рентгеновских вспышек в условиях «хорошей погоды». Типичные колебания составляют 10–20% от амплитуды напряженности электрического поля. При постоянной разности потенциала между Землей и ионосферой (в результате быстрого возрастания потока жесткого излучения и, следовательно, изменений в ионосфере) можно предположить, что колебания напряженности электрического поля связаны с изменением высоты нижнего слоя ионосферы. Этот эффект может быть «замаскирован» колебаниями электрического поля за счет изменения местных условий – облачность и т.д.

Выводы

Сравнение результатов эксперимента и расчета распространения СДВ сигналов показало, что между ними имеются заметные расхождения. Используемые в описанных экспериментах методы требуют развития и совершенствования. Анализ накопленного экспериментального материала (как по прохождению СДВ, так и отклика напряженности электрического поля и атмосферных токов у поверхности Земли) с использованием более совершенных программ расчета распространения СДВ (в том числе разработанных в ИДГ РАН) позволит как провести верификацию программ расчета, так и получить новые данные о структуре D-слоя ионосферы.

Авторы выражают благодарность А.Н. Ляхову за интерес к работе и помощь.

Литература

Ferguson J.A. «A Review of the Ionospheric Model for the Long Wave Prediction Capability. Technical document 2393 Nov. 1992. Naval command // Control and ocean surveillance center. San Diego, CA 92152-5001.

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 Communication, Version 2.0» Technical document 3030, 1998 // Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA 92152-50001).

Mitra A.P. «Ionospheric Effects of Solar Flares», *Astrophysics and space science library*, V 46, 296 p. 1974.

Sujay Pal and S.K. Chakrabarti. ‘Theoretical models for Computing VLF wave amplitude and phase and their applications», Propagation Effects of Very Low Frequency Radio Waves: Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations. AIP Conference Proceedings, Volume 1286. AIP Conference Proceedings, Volume 1286, Issue 1, p. 42–60. 2010.