

УДК 551.510.535

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ КНЧ/ОНЧ И ВЧ/УВЧ ДИАПАЗОНАХ В ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ “МИХНЕВО”

© 2021 г. И. А. Ряховский¹, *, Б. Г. Гаврилов¹, Ю. В. Поклад¹, С. З. Беккер¹, В. М. Ермак¹

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

*E-mail: ryakhovskiy88@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.02.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Изучение пространственно-временной динамики возмущений атмосферы, верхней и нижней ионосферы требует проведения комплексных исследований взаимосвязанных процессов на различных высотах в различных гелиогеофизических условиях. Радиофизический комплекс обсерватории ИДГ РАН “Михнево”, включающий магнитометрическую, электрофизическую, радиоприемную и акустическую аппаратуру и средства ионосферного зондирования, позволяет получать данные об особенностях структуры и динамики ионосферной плазмы в среднеширотной зоне Европейской части страны. С использованием комплекса по данным КНЧ/ОНЧ приемников и приемников глобальных навигационных систем проводятся исследования синхронных вариаций нижней и верхней ионосферы, вызванных магнитными бурями, солнечными рентгеновскими вспышками, экспериментами по искусственной модификации ионосферы. Для обработки данных комплексных измерений вариаций физических полей созданы методики восстановления абсолютного значения полного электронного содержания ионосферы, восстановления профиля электронной концентрации нижней ионосферы. С использованием полученных экспериментальных данных проводится верификация разработанных в институте моделей нижней ионосферы.

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, распространение радиоволн, солнечная рентгеновская вспышка, полное электронное содержание.

DOI: 10.31857/S0002333721050173

ВВЕДЕНИЕ

Исследования пространственно-временной динамики возмущений среднеширотной ионосферы требуют проведения комплексных исследований взаимосвязанных процессов в различных областях ионосферы Земли в различных гелиогеофизических условиях. В геофизической обсерватории “Михнево” (54°56′35” с.ш. и 37°44′20” в.д.) создан уникальный радиофизический комплекс, позволяющий получать данные об особенностях структуры и динамики ионосферной плазмы в среднеширотной зоне Европейской части страны [Адушкин и др., 2005]. Широкий спектр измерительного оборудования, расположенного в ГФО Михнево, позволяет проводить синхронные радиофизические, магнитометрические и электрофизические исследования в режиме реального времени. В обсерватории проводятся непрерывные измерения вариаций электромагнитных полей в широком спектральном диапазоне, что позволяет решать многие на-

учно-прикладные задачи в режиме квазиреального времени. Для исследования состояния геомагнитного поля Земли используются магнитовариационные данные, полученные трехкомпонентным феррозондовым магнитометром LEM1-018 и высокочастотными индукционными магнитометрами MFS-06 и MFS-07. Исследование динамики нижней ионосферы проводится по данным измерения вариаций электромагнитного поля в КНЧ/ОНЧ диапазоне. Низкий уровень промышленных шумов в ГФО “Михнево”, высокая чувствительность и широкий динамический диапазон аппаратуры позволяют принимать сверхслабые сигналы амплитудой в единицах фТл.

Для наблюдения за процессами, происходящими в *E*- и *F*-областях ионосферы, в обсерватории непрерывно проводятся измерения в КВ диапазоне, ЛЧМ зондирование ионосферы, регистрация сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Регистрации параметров электромагнитных волн КВ диапазона ведется с ис-

Таблица 1. Перечень оборудования, входящего в состав радиофизического комплекса ГФО “Михнево”

Измеряемый параметр	Оборудование	Технические параметры
Вариации геомагнитного поля	Феррозондовый магнитометр Lemi 018	Чувствительность: 1 нТл Частотный диапазон: 0–10 Гц
Вариации электромагнитного поля в КНЧ/ОНЧ диапазоне	Измерительный комплекс Metronix	Чувствительность: до 0.1 пТл Частотный диапазон: 0.001–60 кГц
Профиль электронной концентрации ионосферы	ЛЧМ ионозонд	Частотный диапазон: 2–17 МГц
Вариации электромагнитного поля в КВ диапазоне	КВ приемник Rohde Schwarz ESCI	Чувствительность: 0.1–6 мкВ Частотный диапазон: 9 кГц–3 ГГц
Абсолютные значения ПЭС	ГНСС-приемник Javad Sigma	Мультисистемный трехчастотный приемник GPS, ГЛОНАСС

пользованием приемника Rohde&Schwarz ESCI (Германия) и ромбической антенны с размерами диагоналей 140×80 м и высотой подвеса около 30 м. Максимум диаграммы направленности антенны ориентирован в северном направлении, что позволило, в частности, принимать сигналы нагревных стенов EISCAT в Норвегии и HAARP на Аляске. Контроль состояния верхней ионосферы проводится с использованием ЛЧМ ионозонда на базе аппаратуры фирмы Icom (Япония): передатчика R-718 и приемников R-75. Сигналы спутников ГНСС регистрируются мультисистемным трехчастотным приемником Javad Sigma (США). Комплекс в целом позволяет принимать и анализировать параметры электромагнитных сигналов в диапазоне частот от 0 Гц до 17 МГц (табл. 1). Вся аппаратура работает в составе единого программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего синхронизацию данных измерений с точностью не хуже 30 нс, хранение и обработку измерительной информации.

Комплекс позволяет получать всеобъемлющую информацию о состоянии геофизической среды как в спокойных условиях, так и при возмущениях, вызванных природными и антропогенными процессами, такими как солнечные затмения [Адушкин и др., 2007], нагревные эксперименты [Gavrilov et al., 2015], магнитные бури [Gavrilov et al., 2017], солнечные вспышки [Gavrilov et al., 2019a]. В статье рассмотрены примеры применения аппаратуры комплекса для решения ряда актуальных геофизических задач.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИСКУССТВЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ

Способность электромагнитного КНЧ/ОНЧ излучения (3 Гц–30 кГц) распространяться с малым затуханием на значительные расстояния, в том числе под водой и под поверхностью Земли, обусловило широкое применение радиосигналов этого диапазона частот для дальней связи, навигации, зондирования подземных и подводных

объектов. Распространение низкочастотных радиосигналов в волноводе, образованном поверхностью Земли и нижней ионосферой, делает этот диапазон частот эффективным инструментом для исследования возмущений в *E*- и *D*-областях. Воздействие, которое оказывают параметры ионосферы на распространение КНЧ/ОНЧ волн в волноводе Земля–ионосфера, позволяет использовать вариации их параметров для оценки изменений в среде распространения.

Одним из перспективных методов генерации КНЧ/ОНЧ излучения является направленная модификация ионосферы мощным КВ радиоизлучением, модулированным низкой частотой. Возможности этого метода активно исследуются в экспериментах на специально созданных мощных КВ передатчиках, оборудованных мощными диагностическими комплексами (нагревные стенов СУРА (Российская Федерация), EISCAT Heating (Норвегия), HAARP (США), стенд в Арецибо (Пуэрто-Рико) [Blagoveshchenskaya et al., 2011; Getmantsev et al., 1974; Stubbe, Kopka, 1977; Barr et al., 1985]. Кроме решения практических задач, в нагревных экспериментах выполняется значительный объем научных исследований. Изменение проводимости ионосферы вследствие ее разогрева мощным электромагнитным излучением приводит к модуляции ионосферных токов с последующим излучением НЧ радиосигналов на частоте модуляции ВЧ радиосигнала. Особенно эффективен этот процесс в области протекания интенсивных ионосферных токов (авроральные электроджеты) на высоких широтах.

ИДГ РАН принимал участие в ряде экспериментов, посвященных изучению генерации и распространения сигналов КНЧ/ОНЧ диапазона при искусственной модификации ионосферы и на нагревных стенов СУРА, HAARP, EISCAT [Gavrilov et al., 2015]. При проведении эксперимента на стенде EISCAT-Heating, проходившем в феврале 2012 г. [Blagoveshchenskaya et al., 2011], по предложению ИДГ РАН в программу исследований были введены задачи, связанные с изучением

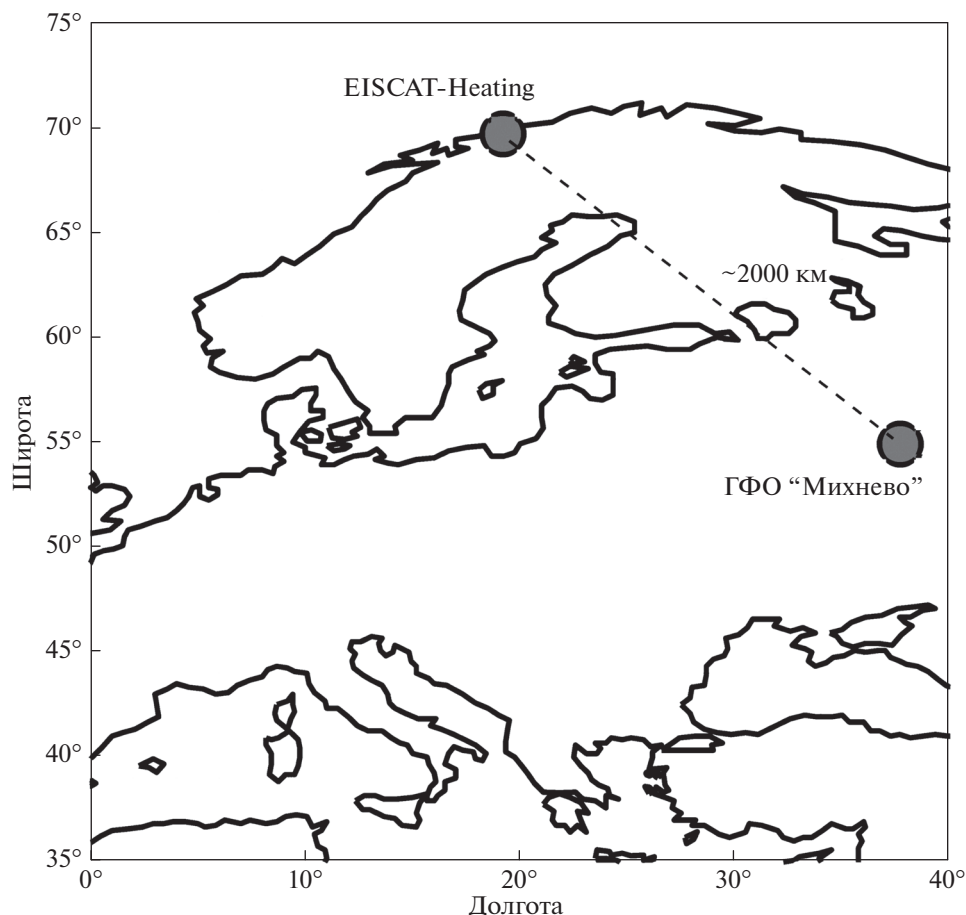


Рис. 1. Схема расположения стенда EISCAT-Heating и измерительного пункта ГФО «Михнево».

распространения на значительные расстояния сигналов на частотах: 517, 1017, 2017, 3017, 4017 и 6017 Гц.

Прием сигналов осуществлялся в ГФО «Михнево» с использованием разработанных в ИДГ РАН магнитометрических комплексов «Плутон» и «Вистлер», обладающих чувствительностью $0.4-0.5 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ в диапазоне частот от 0.5 до 30 кГц (рис. 1). В эксперименте были впервые зарегистрированы сигналы амплитудой в единицах фТл на расстоянии порядка 2000 км от ионосферного источника.

Контроль за режимами работы стенда проводился с помощью приемника Rohde&Schwarz ESCI, позволявшим обнаружить сигналы на несущей частоте КВ излучения (рис. 2).

На рис. 3 показаны результаты регистрации сигнала на частотах модуляции. Стенд EISCAT работал в режиме 5 мин нагрев, 5 мин пауза (на рисунке периоды нагрева показаны штрихами). Использование двухкомпонентных датчиков позволило определить изменения поляризации сигналов с частотой и экспериментально подтвердить мо-

дель волноводного распространения сигнала от ионосферного источника (рис. 4).

Эксперименты позволили детально исследовать условия распространения ОНЧ радиоизлучения на значительные расстояния. Анализ результатов измерений показал воздействие гелиогеофизических условий в районе нагрева и на трассе распространения сигнала на амплитудно-фазовые характеристики сигналов. Получено экспериментальное подтверждение связи интенсивности генерации КНЧ/ОНЧ излучения в нагревных экспериментах с интенсивностью электроджета.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОНЧ СИГНАЛОВ В ГФО «МИХНЕВО»

Исследование ионосферных возмущений, вызванных высокоэнергетическими геофизическими событиями, является одной из актуальных задач современной геофизики. Существующие теоре-

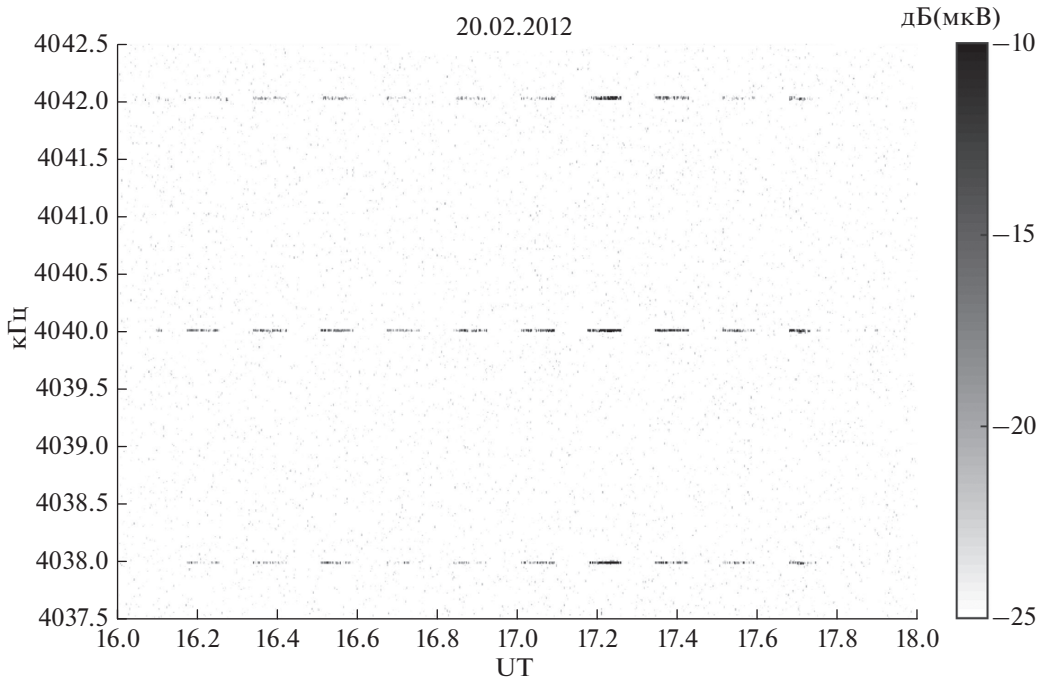


Рис. 2. Режим работы станда EISCAT на несущей частоте с модуляцией во время нагревного эксперимента 20.02.2012 г.

тические, эмпирические и полуэмпирические модели (см., например, [Friedrich et al., 2018; Ferguson, 1995]) в определенной степени описывают состояние D -области в различных гелиогеофизических условиях. В то же время, обоснование и верификация этих моделей требуют привлечения экспериментальных данных, что для D -области ионосферы представляет достаточно сложную задачу. Как указывалось выше, наиболее надежным источником экспериментальных данных по параметрам нижней ионосферы является анализ распространения в ионосфере электромагнитного излучения КНЧ/ОНЧ диапазона.

Такие мощные геофизические события, как 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, Whitney, 1965; Singh et al., 2012], разряды молний [Rodger, 1999] и землетрясения [Nayakawa et al., 1996], могут приводить к существенному изменению ионизации D -области ионосферы. Результаты многочисленных исследований [Thomson, 2010; Thomson et al., 2011] свидетельствуют о том, что солнечные вспышки приводят к изменению профиля электронной концентрации нижней ионосферы, что, в свою очередь, оказывает влияние на амплитуды и фазы сигналов сверхдлинноволновых (СДВ) станций (рис. 5). Анализ вариаций амплитудно-фазовых характеристик этих сигналов позволяет восстанавливать параметры ионосферы во время воз-

действия рентгеновского излучения вспышки с использованием определенных допущений об исходном состоянии среды.

С 2014 г. в ГФО “Михнево” ведется непрерывная регистрация сигналов СДВ радиостанций, расположенных по всему миру [Gavrilov et al., 2017]. Схема расположения СДВ передатчиков и их основные параметры приведены на рис. 6 и в табл. 2.

Для восстановления параметров среднеширотной ионосферы во время солнечных вспышек по данным вариаций амплитудно-фазовых характеристик этих сигналов была разработана специальная методика [Gavrilov et al., 2017; Гаврилов и др., 2020]. Так же, как это делают другие исследователи, высотный профиль электронной концентрации в этой методике задается двухпараметрической эмпирической моделью Уайта–Фергюсона [Wait, Spies, 1964; Ferguson, 1995]:

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

где h' (км) – эффективная высота отражения радиосигнала и β (км^{-1}) – скорость увеличения электронной концентрации (см^{-3}) с высотой.

Для исключения влияния различий в поведении параметров радиосигналов на различных трассах и для устранения неопределенности в задании параметров спокойной (предвспышечной) ионосферы [Basak, Chakrabarti, 2013], в рамках этой методики для восстановления параметров

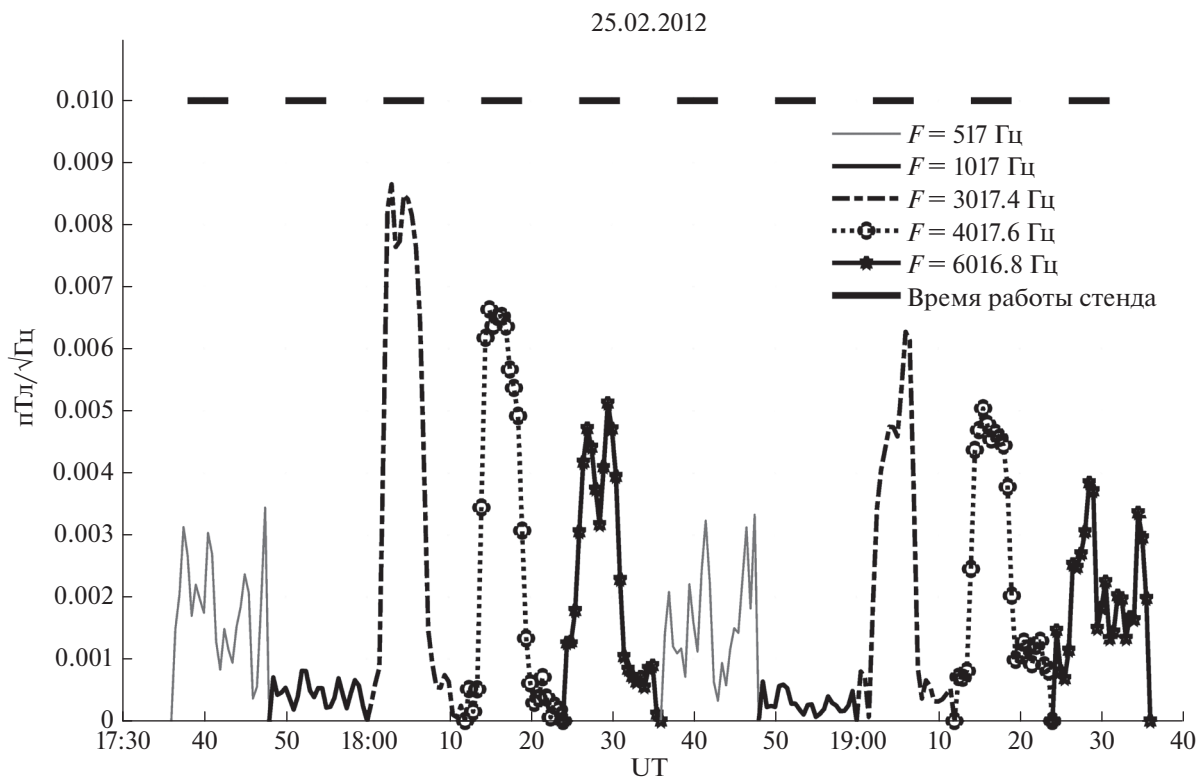


Рис. 3. Результаты регистрации модуляционных частот во время эксперимента по искусственной модификации ионосферы на стенде EISCAT 20.02.2012 г.

D-области ионосферы 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 на малом по сравнению с длиной трассы (~2500 км) расстоянии друг от друга (32 км). Поэтому можно считать, что их сигналы распространяются вдоль одной трассы.

На рис. 7 представлены зависимости параметра β (левая панель) и параметра h' (правая панель) от потока рентгена. Черной кривой показаны

результаты расчета параметров β и h' для солнечной вспышки 10 сентября 2017 г., выполненные с использованием модифицированной методики [Gavrilov et al., 2017; Гаврилов и др., 2020], серыми кружками показаны результаты, полученные в работах [Thomson et al., 2005; Basak, Chakrabarti, 2013] для ряда солнечных вспышек 2000–2011 гг.

Расхождение результатов может быть обусловлено тем, что в работах [Thomson et al., 2005; Basak, Chakrabarti, 2013] значения параметров спокойной (предвспышечной) ионосферы определя-

Таблица 2. Основные характеристики СДВ передатчиков, сигналы от которых непрерывно регистрируются в ГФО “Михнево”

СДВ станция	Частота, Гц	Битрейт, Гц	Широта, °	Долгота, °	Страна
JXN	16400	200	66.982	13.872	Норвегия
HWU	18300	200	46.713	1.245	Франция
GBZ	19580	200	54.912	-3.278	Англия
ICV	20270	200	40.923	9.731	Италия
FTA	20900	100	48.545	2.579	Франция
HWU	21750	200	46.713	1.245	Франция
GQD	22100	100	54.732	-2.883	Великобритания
DHO	23400	200	53.074	7.614	Германия
TBB	26700	100	37.418	27.323	Турция

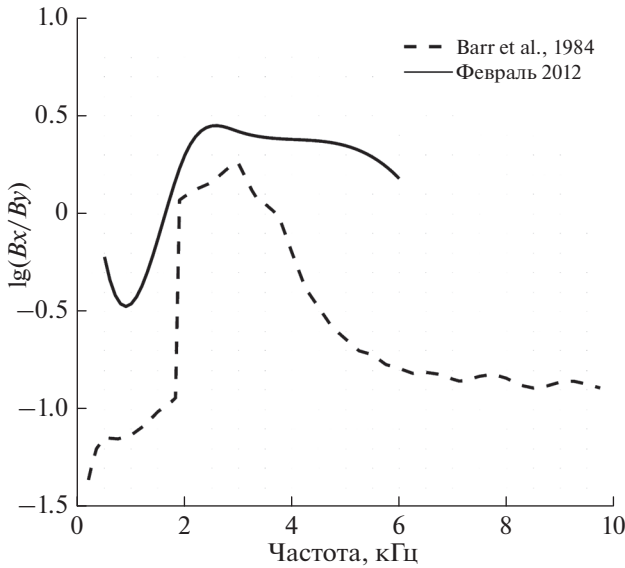


Рис. 4. Зависимость поляризации сигналов от частоты. Сплошная — эксперимент EISCAT-“Михнево”, февраль 2012 г. Штриховая — расчет по модели [Barr et al., 1985].

лись по данным статистических и эмпирических моделей. В модифицированной методике значения параметров спокойной дневной ионосферы были получены путем анализа изменений значений амплитуды и фазы СДВ сигналов на двухчастотной трассе, вызванных ростом ионизации во время рентгеновской вспышки.

Для построения эмпирических зависимостей параметров h' и β от энергии вспышек в рентгеновском диапазоне 0.05–0.4 нм [satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full/] были проанализированы семь вспышек M - и X -класса, произошедших в 2014–2017 гг. (табл. 3).

Из рис. 8 хорошо видно, что при различных начальных условиях, начиная с энергии ~ 0.04 – 0.07 мДж/см², зависимость эффективной высоты отражения h' и градиента нарастания электронной концентрации β от энергии выходит на единый тренд. Если предположить, что зависимость h' и β от $\lg(E)$ в диапазоне энергии 0.07–15 мДж/см² является линейной, то уравнения этих прямых будут иметь вид:

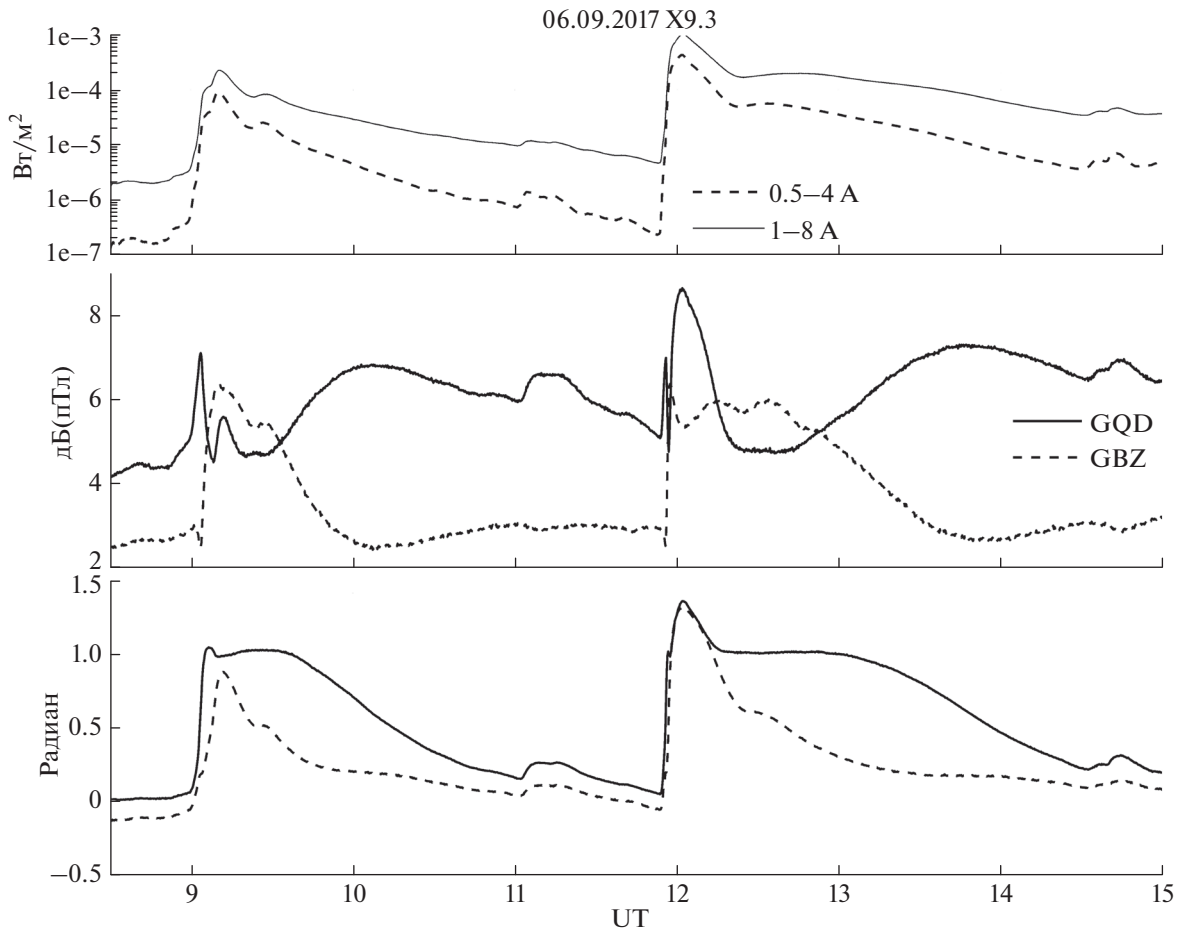


Рис. 5. Влияние солнечной рентгеновской вспышки 06.09.2017 г. на амплитудно-фазовые характеристики сигналов СДВ станций GQD и GBZ.

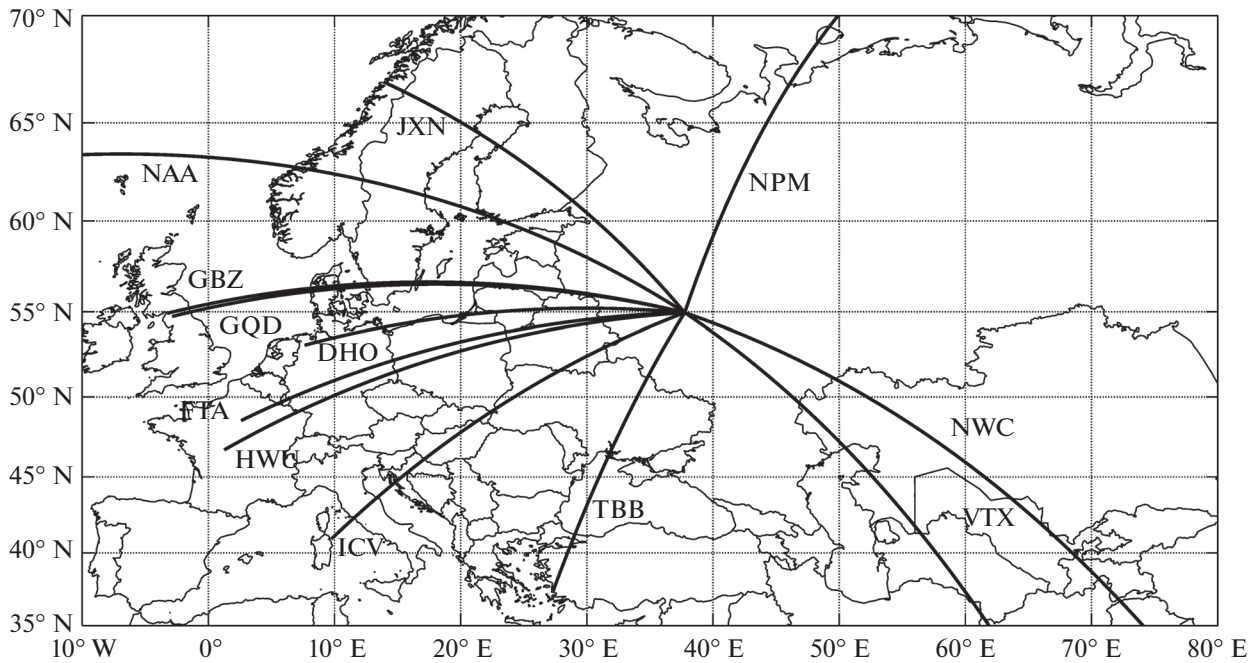


Рис. 6. Схема расположения СДВ передатчиков, сигналы от которых непрерывно регистрируются в ГФО “Михнево”.

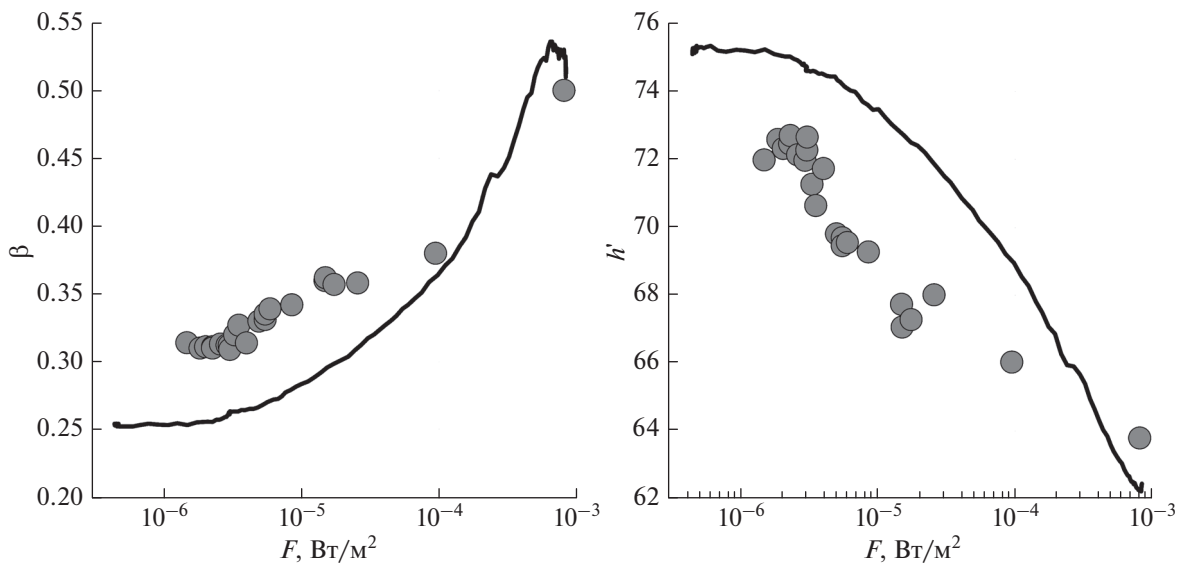


Рис. 7. Результаты восстановления параметров β (левая панель) и h' (правая панель) в зависимости от потока рентгена. Сплошными линиями показаны результаты, полученные в ИДГ РАН, серыми кружками – результаты, полученные в работах [Thomson et al., 2005; Basak, Chakrabarti, 2013].

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

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

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.

Многолетние измерения амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ диапазона, полу-

Таблица 3. Основные параметры вспышек

Дата	Класс	Время начала, УТ	Время максимума потока 0.1–0.8 нм, УТ
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
10.09.2017 г.	X8.3	15:35:00	16:06:00

ченные в ГФО “Михнево”, являются уникальным источником данных для верификации плазмохимических моделей нижней ионосферы. Это связано с тем, что радиофизические параметры крайне чувствительны к пространственно-временной динамике высотного профиля концентрации электронов N_e . Более того, такой подход к верификации плазмохимических моделей позволяет не только отойти от сравнения результатов с данными единичных геофизических экспериментов, на которых сама модель зачастую строится, но и использовать при анализе данные непрерывного мониторинга, объем которых на много порядков превышает количество экспериментальных измерений N_e , полученных методом ракетного зондирования ионосферы. Отметим, что амплитуды и фазы электромагнитных волн этого диапазона частот могут быть использованы не только для верификации результатов, но и для коррекции моделей в части оценки плохо известных па-

раметров нижней ионосферы. Кроме того, подобная проверка результатов модели позволяет напрямую оценить ее прогностические способности в решении задач распространения радиоволн СДВ диапазона, и, как следствие, путем коррекции модельных параметров можно существенно повысить точность решения прикладных задач. Экспериментальные данные по вариациям амплитуды СДВ сигналов были успешно использованы для верификации плазмохимических моделей D -области ионосферы во время рентгеновских вспышек различной мощности [Bekker et al., 2021].

На рис. 9 представлены результаты верификации 5-компонентной модели ионизационно-рекомбинационного цикла нижней ионосферы [Kozlov et al., 2014] на двух европейских СДВ-трассах: GQD–Михнево, ICV–Михнево. На левых панелях изображены теоретический и экспериментальный ход амплитуды радиоволны, принятой

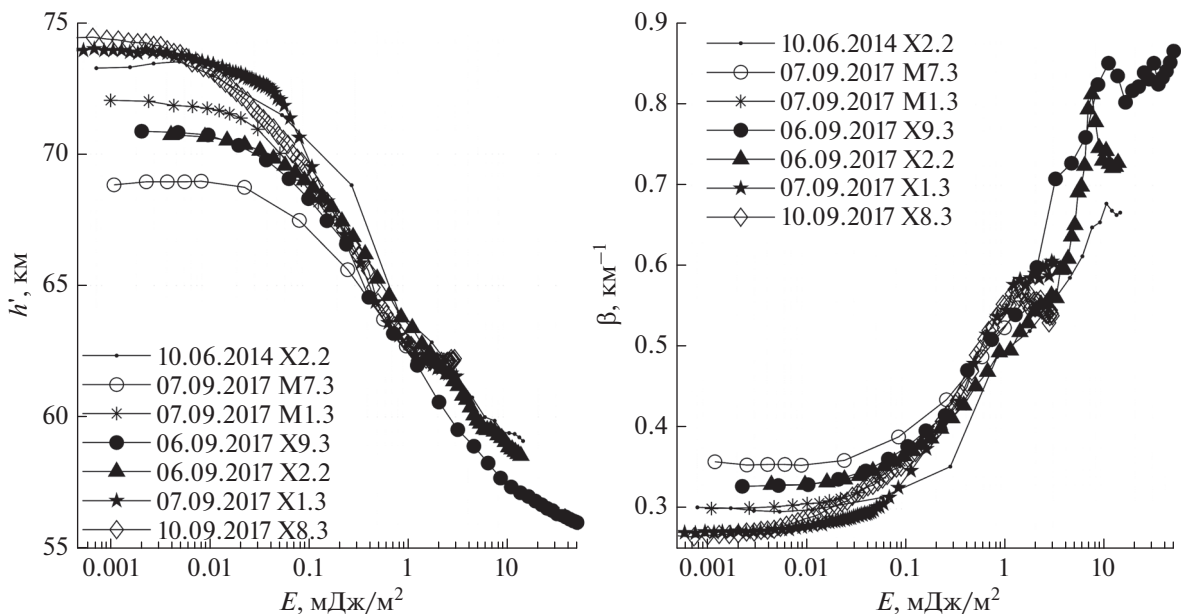


Рис. 8. Зависимость эффективной высоты отражения h' (левая панель) и градиента нарастания электронной концентрации β (правая панель) от энергии рентгеновского излучения в диапазоне 0.05–0.4 нм.

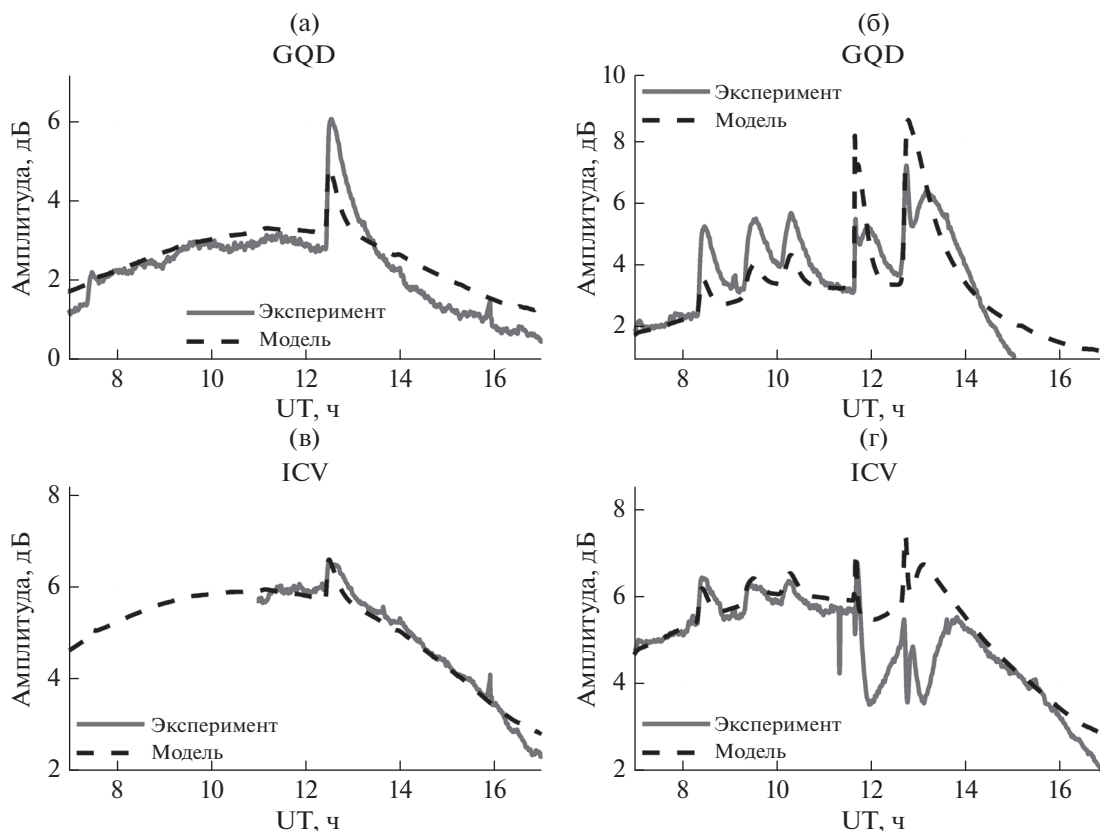


Рис. 9. Временной ход амплитуды радиоволны от передатчика GQD во время рентгеновских вспышек C- и X-класса, произошедших 09.06.2014 г. (а) и 10.06.2014 г. (б), и от передатчика ICV для 9.06.2014 г. (в) и 10.06.2014 г. (г) соответственно.

от передатчиков GQD и ICV в течение нескольких часов 09.06.2014 г., когда произошла вспышка C9.0 (12:29 UT). Правые панели построены по данным от 10.06.2014 г., во время которого последовательно произошли три вспышки C-класса (C3.9 08:25 UT; C5.1 09:31 UT; C5.0 10:17 UT) и две вспышки X-класса (X2.2 11:42 UT; X1.5 12:52 UT). Во время перечисленных рентгеновских вспышек рассматриваемые европейские трассы были полностью освещены.

В результате количественного сопоставления теоретических и экспериментальных значений амплитуды было получено, что рассматриваемая модель [Kozlov et al., 2014] достаточно хорошо описывает возмущения малой мощности. Отметим, что ошибки в моделировании вспышек X-класса могут быть связаны с тем, что при проведении расчетов не учитывалась сверхжесткая компонента рентгеновского излучения, которая по данным обсерватории RHESSI присутствует в анализируемых вспышках [<http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/>].

Опыт использования накопленного в ГФО “Михнево” массива экспериментальных данных по распространению СДВ сигналов на разнонаправленных трассах различной протяженности

позволяет проводить подобную верификацию теоретических моделей в широком диапазоне широт в спокойных условиях и во время естественных возмущений различной природы. В настоящее время помимо количественной оценки работоспособности моделей данные наземных радиофизических измерений используются для коррекции недостаточно хорошо изученных плазмохимических параметров среды.

ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ПРИЕМНИКОВ ГНСС

Для изучения процессов, происходящих в верхней ионосфере, активно используются данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS, BeiDou, Galileo. Использование фазовых и кодовых измерений сигналов навигационных спутников двухчастотными приемниками ГНСС позволяет получать данные о величине полного электронного содержания (ПЭС) на луче приемник–спутник [Lanyi, Roth, 1988]. Эта величина является основным интегральным параметром, дающим информацию о различных процессах, происходящих в ионосфере.

Существует несколько подходов к решению задачи восстановления абсолютного значения

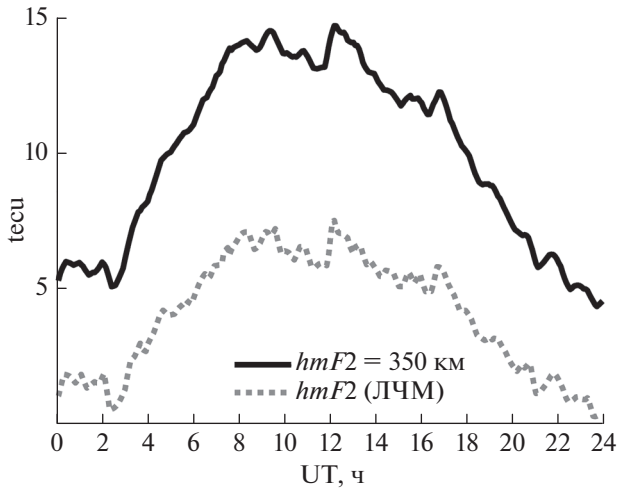


Рис. 10. Результаты восстановления абсолютного значения ПЭС 06.09.2017 г. для фиксированной высоты максимума $F2$ слоя (сплошная кривая), значения максимума $F2$ были получены из данных ЛЧМ (пунктирная кривая).

ПЭС. Методом компьютерной томографии эта задача успешно решается с использованием данных, получаемых из сетей приемников ГНСС с соблюдением определенных требований к их расположению. Однако для регионов с малым числом приемников имеет смысл использовать оценки вертикального ПЭС над станцией. Для решения этой задачи необходима коррекция экспериментальных данных путем включения ряда факторов, основным из которых является определение и учет дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ, DCB – Differential code bias), связанных с разли-

чем времени распространения сигналов разных частот в радиочастотных трактах приемо-передающего оборудования.

В ГФО “Михнево” ведется непрерывный мониторинг сигналов ГНСС, по данным которого проводятся расчеты параметров ROT (rate of TEC) и ROTI (rate of TEC index), а также осуществляется восстановление абсолютного значения ПЭС [Mylnikova et al., 2015]. Значение вертикального ПЭС может быть получено из уравнения:

$$I_M = SI_V + I_{BIAS}, \quad (4)$$

где: I_V – искомое вертикальное значение ПЭС; I_{BIAS} – поправка к абсолютному значению ПЭС, связанная с ДКЗ; S – функция преобразования наклонного значения ПЭС в вертикальное, имеющая вид:

$$S = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_m F2} \sin [\alpha(90 - \theta)] \right) \right\} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где: θ – угол возвышения спутника; R_E – радиус Земли; $h_m F2$ – высота максимума $F2$ -слоя; α – коэффициент, зависящий от высоты ионосферной точки, вводящийся для корректного учета высоты ионосферного слоя.

В большинстве современных работ, посвященных восстановлению абсолютного значения ПЭС, используется фиксированная высота максимума F -слоя ионосферы. Проведенные исследования показали, что использование реальной высоты максимума $F2$ -слоя приводит к существенному изменению величины абсолютного значения ПЭС (рис. 10).

Важной задачей при исследовании возмущений среднеширотной ионосферы является оцен-

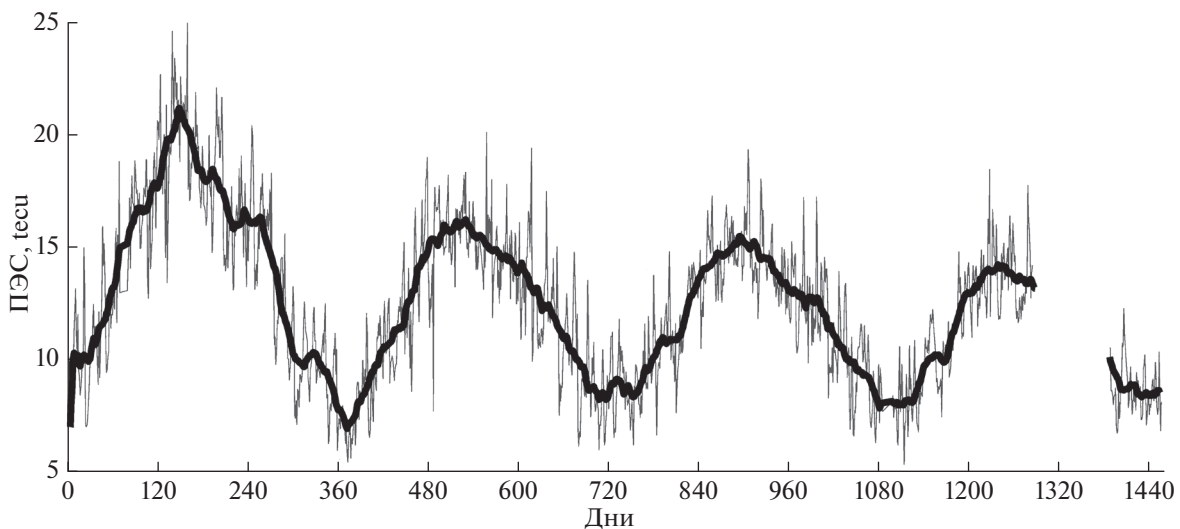


Рис. 11. Результаты расчета суточного медианного значения вертикального ПЭС по экспериментальным данным, полученным в ГФО “Михнево” за период с 2016 по 2019 гг.

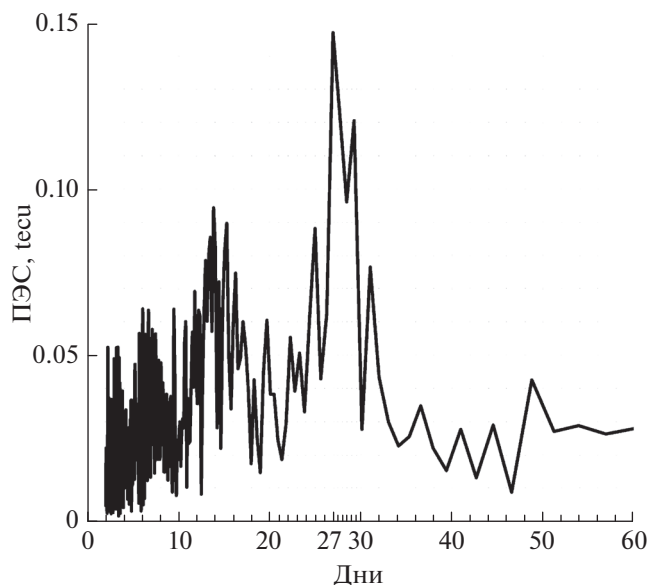


Рис. 12. Спектр вертикального ПЭС, построенный по данным приемника Javad Sigma, полученным за 4 года (с 2016 по 2019 гг.).

ка факторов, влияющих на динамику ПЭС. На рис. 11 приведены результаты расчета вертикального значения ПЭС по данным приемника Javad Sigma за период с 2016 по 2019 гг. Наблюдаются ярко выраженные годовые вариации абсолютно-

го значения ПЭС, а также линейный убывающий тренд, связанный с 11-летним циклом солнечной активности. При спектральном анализе удалось выявить 27-дневные вариации вертикального ПЭС (рис. 12). Частота наблюдаемых колебаний может быть объяснена изменением потока солнечного излучения, связанного с периодом вращения Солнца вокруг своей оси.

СИНХРОННЫЕ ВАРИАЦИИ НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ КНЧ/ОНЧ

Согласованный анализ сигналов глобальных навигационных систем и амплитудно-фазовых характеристик СДВ сигналов дает возможность исследовать взаимосвязь и динамику возмущений верхней и нижней ионосферы [Gavrilov et al., 2019b]. На рис. 13 показаны результаты измерения фаз сигналов от передатчиков GQD и DHO во время магнитной бури 17.03.2015 г. и вариации ПЭС на станциях vis0 и sass, которые расположены на трассах распространения СДВ сигналов. Приблизительно в 16:30 наблюдалось резкое изменение фазы СДВ сигналов и существенные вариации ПЭС. На остальных трассах такого эффекта в этот момент времени не наблюдалось, что может свидетельствовать о локализации возмущения верхней и нижней ионосферы в области, выделенной на рис. 13.

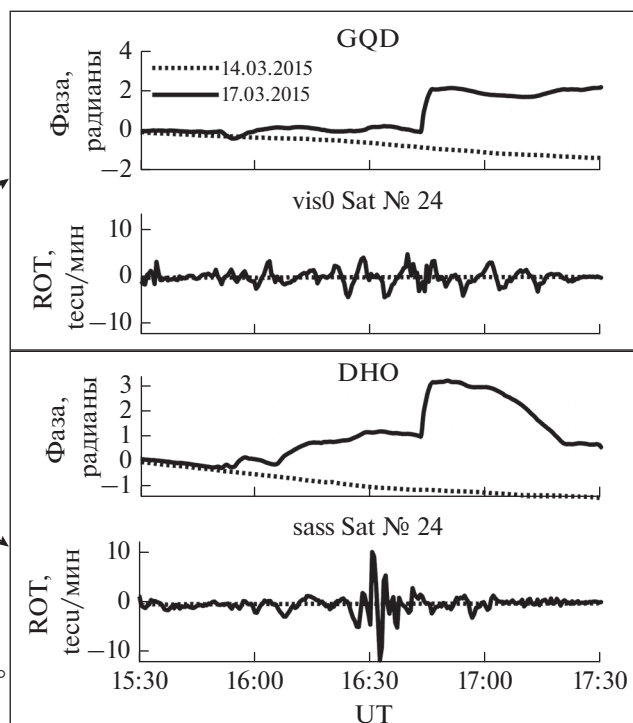
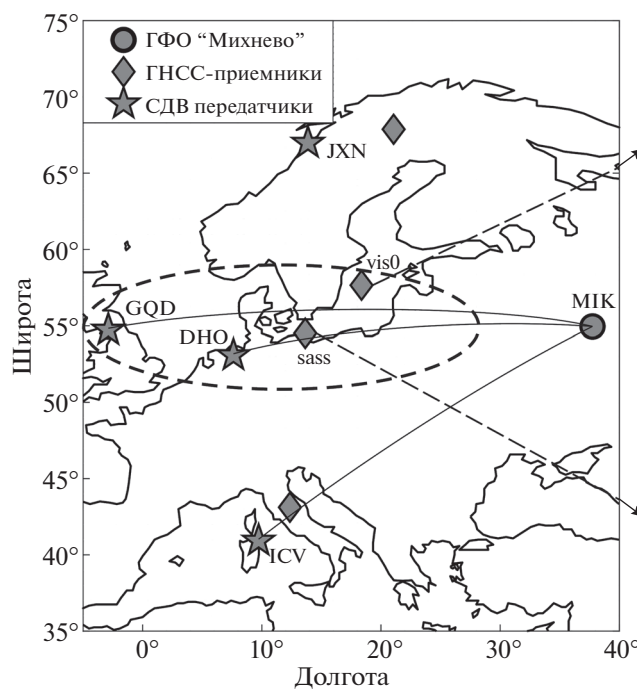


Рис. 13. Вариации амплитуды СДВ сигналов и величины ПЭС во время магнитной бури 17.03.2015 г.

Полученные в работе результаты демонстрируют не только временную и пространственную связь возмущений в ионосфере, представляющей собой единую систему плазмохимических, конвективных, электродинамических процессов, но и позволяют оценить вклад различных высот в ионосферную динамику.

При анализе и использовании данных по ПЭС необходимо принимать во внимание особенности распределения электронной концентрации по высоте в зависимости от вида гелиогеофизического события, действующих механизмов и агентов возмущений геофизической среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования пространственно-временной динамики возмущений среднеширотной ионосферы требуют проведения комплексных измерений взаимосвязанных процессов в различных областях ионосферы в различных гелиогеофизических условиях. Уникальный радиофизический комплекс геофизической обсерватории «Михнево» позволяет получать данные об особенностях структуры и динамики ионосферной плазмы в среднеширотной зоне Европейской части страны. Широкий спектр измерительного оборудования используется для проведения синхронных радиофизических, магнитометрических и электрофизических исследований в режиме реального времени.

Для наблюдения за процессами, происходящими в *E*- и *F*-областях ионосферы, в обсерватории проводятся измерения в КВ диапазоне, ЛЧМ зондирование, регистрация сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Использование фазовых и кодовых измерений сигналов навигационных спутников двухчастотными приемниками ГНСС позволяет получать данные о величине полного электронного содержания на луче приемник–спутник – основного интегрального параметра, дающего информацию о процессах в верхней ионосфере.

При анализе и использовании данных по ПЭС необходимо принимать во внимание особенности распределения электронной концентрации по высоте в зависимости от вида гелиогеофизического события, действующих механизмов и агентов возмущений геофизической среды. Синхронные измерения вариаций параметров верхней и нижней ионосферы обнаружили их связь и влияние неоднородностей нижней ионосферы на величину ПЭС.

Согласованный анализ сигналов глобальных навигационных систем и амплитудно-фазовых характеристик СДВ сигналов дает возможность исследовать взаимосвязь и динамику возмущений верхней и нижней ионосферы. Полученные в

работе результаты демонстрируют не только временную и пространственную связь возмущений в ионосфере, но и позволяют оценить вклад различных высот в ионосферную динамику.

К существенному изменению ионизации *D*-области ионосферы приводят те же геофизические процессы, что вызывают возмущения верхней ионосферы: солнечные вспышки, геомагнитные бури, протонные высыпания, гамма-вспышки, солнечные затмения, разряды молний и землетрясения. Анализ вариаций амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ передатчиков позволяет восстанавливать параметры ионосферы во время воздействия рентгеновского излучения вспышки и, с использованием определенных допущений, исходное состояние ионосферы. Была разработана специальная методика, в рамках которой для восстановления параметров *D*-области ионосферы использовались данные регистрации сигналов от двух СДВ передатчиков, расположенных на малом по сравнению с длиной трассы расстоянии друг от друга, что позволило считать, что их сигналы распространяются вдоль одной трассы. Анализ вариаций амплитудно-фазовых характеристик СДВ передатчиков при солнечных вспышках позволил получить количественные данные о зависимости восстановленных параметров нижней ионосферы от энергии, длительности, скорости нарастания, спектра вызвавшего его рентгеновского излучения.

Одним из перспективных методов генерации КНЧ/ОНЧ излучения является направленная модификация ионосферы мощным КВ радиоизлучением, модулированным низкой частотой. Возможности этого метода активно исследуются в экспериментах на специально созданных мощных КВ передатчиках, оборудованных многофункциональными диагностическими комплексами. По существу, нагревные эксперименты кроме своего прикладного значения важны как метод прямых исследований взаимосвязи возмущений в верхней и нижней ионосфере. Изменение проводимости ионосферы вследствие ее разогрева мощным электромагнитным излучением приводит к модуляции ионосферных токов с последующим излучением НЧ радиосигналов на частоте модуляции ВЧ радиосигнала.

ИДГ РАН принимал участие в ряде нагревных экспериментов. Во время проведения эксперимента на стенде EISCAT-Heating в феврале 2012 г. были впервые зарегистрированы и исследованы на частотах модуляции в килогерцовом диапазоне частот сигналы амплитудой в единицах фТл на расстоянии ~2000 км от ионосферного источника. Эксперименты позволили детально исследовать условия генерации и распространения ОНЧ радиоизлучения на значительные расстояния, их зависимость от гелиогеофизических условий в

районе нагрева и на трассе распространения сигнала.

Важнейшим аспектом применения результатов экспериментальных исследований, проводимых в обсерватории “Михнево”, является их использование в качестве уникального источника данных для верификации теоретических моделей нижней ионосферы. Ее результаты позволили увеличить прогностические возможности моделей в решении задач распространения радиоволн СДВ диапазона и существенно повысить точность решения фундаментальных и прикладных задач в этой области научных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема АААА-А17-117112350014-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Санина И.А., Спивак А.А. Комплекс измерений геофизических полей и процессов взаимодействия геосфер обсерватории “Михнево”. Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. 2005. М.: ИДГ РАН. С. 13–18.
- Адушкин В.В., Гаврилов Б.Г., Горелый К.И., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Геофизические эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Докл. РАН. 2007. Т. 417. № 4. С. 535–540.
- Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Рыбаков В.А., Ряховский И.А. Восстановление параметров среднеширотной нижней ионосферы при солнечных вспышках M- и X-классов // Геомагнетизм и аэрномия. 2020. Т. 60. С. 762–768.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44096071>
<https://doi.org/10.31857/S0016794020060048>
- Barr R., Rietveld M.T., Kopka H., Stubbe P., Nielsen E. Extra-low-frequency radiation from the Polar Electrojet Antenna // Nature. 1985. V. 317. P. 155–157.
- 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. V. 348. P. 315–326.
<https://doi.org/10.1007/s10509-013-1597-9>
- Bekker S.Z., Ryakhovskiy I.A., Korsunskaya J.A. Modeling of the lower ionosphere during solar X-ray flares of different classes // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2021. V. 126. e2020JA028767.
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Rietveld M.T., Ivanova I.M., Baddeley L.J. Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38.
<https://doi.org/10.1029/2011GL046724>
- 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. 2006. V. 41. RS2001.
<https://doi.org/10.1029/2005RS003290>
- Ferguson J.A. Ionospheric model validation at VLF and LF // Radio Sci. 1995. V. 30. № 3. P. 775–782.
- Friedrich M., Pock C., Torkar K. FIRI-2018, an updated empirical model of the lower ionosphere // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. P. 6737–6751.
- Gavrilov B.G., Ermak V.M., Poklad Y.V., Ryakhovskii I.A. Estimate of variations in the parameters of the midlatitude lower ionosphere caused by the solar flare of September 10, 2017 // Geomagn. Aeron. 2019a. V. 59.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39249159>
<https://doi.org/10.1134/S0016793219050049>
- Gavrilov B.G., Zetser Y.I., Lyakhov A.N., Poklad Y.V., Ryakhovskii I.A. Correlated disturbances of the upper and lower ionosphere from synchronous measurements of parameters of GNSS signals and VLF radio signals // Cosmic Res. 2019b. V. 57.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36748404>
<https://doi.org/10.1134/S0010952519010039>
- Gavrilov B.G., Zetser Y.I., Lyakhov A.N., Poklad Y.V., Ryakhovskii I.A. Spatiotemporal distributions of the electron density in the ionosphere by records of the total electron content and phase of VLF radio signals // Geomagn. Aeron. 2017. V. 57.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29757585>
<https://doi.org/10.1134/S0016793217040065>
- Gavrilov B.G., Zetser Y.I., Ryakhovskii I.A., Poklad Y.V., Ermak V.M. Remote sensing of ELF/VLF radiation induced in experiments on artificial modification of the ionosphere // Geomagn. Aeron. 2015. V. 55.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0016794015040045>
<https://doi.org/10.1134/S0016793215040040>
- Getmantsev G.G., Zuikov N.A., Kotik D.S., Mironenko L.F., Mityakov N.A., Rapoport V.O., Sazonov Yu.A., Trakhtengerts V.Yu., Eidman V.Ya. Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma // JETP Letters. 1974. V. 20. P. 101–102.
- 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. 1996. V. 43. P. 169–180.
- Klobuchar J.A., Whitney H. E. Ionospheric electron content measurements during a solar eclipse // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 1254–1257.
- Kozlov S.I., Lyakhov A.N., Bekker S.Z. Key Principles of constructing probabilistic statistical ionosphere models for the radiowave propagation problems // Geomagn. Aeron. 2014. V. 54. № 6. P. 767–779.
- Lanyi G.E., Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations // Radio Sci. 1988. № 23. P. 483–492.
- Mitra A.P. Ionospheric effects of solar flares. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co. 1974. 307 p.
- Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V., Kunitsyn V.E., Padokhin A.M. Variability of GPS/GLONASS differential code biases // Results Phys. 2015. V. 5. P. 9–10.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002>

- Peter W.B., Chevalier M.W., Inan U.S.* Perturbations of mid-latitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A03301. <https://doi.org/10.1029/2005JA011346>
- Rodger C.J.* Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. P. 317–336.
- 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 2009 deduced from ELF/VLF analysis // *Adv. Space Res.* 2012. V. 50. P. 1352–1361. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.07.005>
- Stubbe P., Kopka H.* Modulation of the polar electrojet by powerful HF waves // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. <https://doi.org/10.1029/JA082i016p02319>
- 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.* 2010. V. 721. P. 24–27.
- 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>
- Thomson N.R., Rodger C.J., Clilverd M.A.* Daytime *D* region parameters from long-path VLF phase and amplitude // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A11305. <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.* 2004. V. 31. L06803. <https://doi.org/10.1029/2003GL019345>
- Thomson N.R.* Daytime tropical *D* region parameters from short path VLF phase and amplitude // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A09313. <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. 1964. P. 300.

Studying the State and Dynamics of the Ionosphere Based on Synchronous Records of SLF/ULF/VLF and HF/UHF Radio Signals at Geophysical Observatory “Mikhnevo”

I. A. Ryakhovskiy^{a,*}, B. G. Gavrilov^a, Yu. V. Poklad^a, S. Z. Bekker^a, and V. M. Ermak^a

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^{*}*e-mail: ryakhovskiy88@yandex.ru*

Studying the spatiotemporal dynamics of the disturbances in the atmosphere, upper, and lower ionosphere requires integrated investigation of the interrelated processes at different heights in the different solar-geophysical conditions. The radiophysical equipment at the Geophysical observatory “Mikhnevo” of the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences (IDG RAS) including magnetic, electro-physical, radio-receiving, and acoustic instruments and ionospheric sounders provides data on the structure and dynamics of the ionospheric plasma in the midlatitudinal European part of Russia. The measurements by the SLF/ULF/VLF receivers and the data from GNSS receivers are used to study synchronous variations in the lower and upper ionosphere caused by the magnetic storms, solar X-ray flares, and experiments on artificial modification of the ionosphere. For processing the data of integrated measurements of the variations in the physical fields, the methods for reconstructing absolute ionospheric total electron content and electron density profile in the lower ionosphere are developed. The obtained experimental data are used for the verification of the models of lower ionosphere developed in IDG RAS.

Keywords: atmosphere, ionosphere, radio wave propagation, solar X-ray flare, total electron content