УДК 550.388.2
DOI: 10.12737/szf-102202404

Поступила в редакцию 07.03.2024
Принята к публикации 16.04.2024

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОНИЗАЦИИ ИОНОСФЕРЫ НАД ЕВРАЗИЕЙ ПО ДАННЫМ ЦЕПИ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ИОНОЗОНДОВ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ 2015 Г.

VARIABILITY OF IONOSPHERIC IONIZATION OVER EURASIA ACCORDING TO DATA FROM A HIGH-LATITUDE IONOSONDE CHAIN DURING EXTREME MAGNETIC STORMS IN 2015

М.А. Черниговская
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, cher@iszf.irk.ru

А.Г. Сетов
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, setov@iszf.irk.ru

К.Г. Ратовский
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru

А.С. Калишин
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия, askalishin@aari.ru

А.Е. Степанов
Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН, Якутск, Россия, a_e_stepanov@ikfia.sbras.ru

M.A. Chernigovskaya
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, cher@iszf.irk.ru

A.G. Setov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, setov@iszf.irk.ru

K.G. Ratovsky
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru

A.S. Kalishin
Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia, askalishin@aari.ru

A.E. Stepanov
Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, a_e_stepanov@ikfia.sbras.ru

Аннотация. Проанализированы долготно-временные вариации параметров ионосферы над Евразийским континентом на основе анализа данных цепи высокоширотных ионозондов вдоль широтного круга ~70° N (геомагнитные широты 58°<*Glat*<65°) в долготном секторе 26°–171° E во время экстремальных магнитных бурь 24-го цикла солнечной активности в марте и июне 2015 г. Для анализа отклика ионизации ионосферы на геомагнитные возмущения использовались данные ионозондов о среднечасовых значениях критической частоты f_oF2 слоя F2 ионосферы. Отмечены большие различия в общих особенностях временных вариаций f_oF2 для анализируемых периодов магнитных бурь, которые, вероятно, связаны с характерными особенностями сезонного и суточного хода фоновой высокоширотной ионосферы данного географического региона. На главных и ранних восстановительных фазах магнитных бурь наблюдались периоды блэкаутов радиосигналов ионозондов. Отмечены различия в характере реакции ионосферы на геомагнитные возмущения, связанные, по всей видимости, с сезонными особенностями вероятности возникновения положительной или отрицательной фазы ионосферной бури в разные сезоны года. Тенденция повышения ионизации ионосферы над обширным регионом Восточной, Западной Сибири и Европы после завершения экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. по данным измерений цепи высокоширотных ионозондов может быть связана с образованием над этой территорией области повышенного отношения [O]/[N_2]. Подобный рост ионизации ионосферы с превышением значений f_oF2 относительно фона можно рассматривать

Abstract. We have examined longitudinal-temporal variations in ionospheric parameters over Eurasia by analyzing data from a chain of high-latitude ionosondes along a latitude circle ~70° N (geomagnetic latitudes 58°<*Glat*<65°) in the longitudinal sector 26–171° E during severe magnetic storms of solar cycle 24 in March and June 2015. To analyze the response of ionospheric ionization to geomagnetic disturbances, we have used ionosonde data on hourly average critical frequency f_oF2 of the ionospheric F2 layer. Strong differences were observed between common peculiarities of temporal variations in f_oF2 for the analyzed periods of magnetic storms, which are likely associated with the characteristic features of the seasonal and diurnal variations in the background high-latitude ionosphere of the given geographic region. During the main and early recovery phases of magnetic storms there were periods of blackouts of ionosonde radio signals. Differences in the character of the ionospheric response to geomagnetic disturbances have been noted. This is probably due to seasonal features of the probability of occurrence of the ionospheric storm positive or negative phase in different seasons of the year. The trends of increasing ionospheric ionization over the vast region of Eastern, Western Siberia and Europe after the end of the extreme magnetic storm in March 2015, according to measurements from the chain of high-latitude ionosondes, may be associated with the formation of an area of increased [O]/[N_2] ratio over this territory. Such an increase in ionospheric ionization exceeding the background level of f_oF2 values can be considered as a clear manifestation of the after-effect of magnetic storms.

как яркое проявление эффекта последействия магнитных бурь.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, цепь ионозондов, геомагнитная буря, вариации ионизации ионосферы.

Keywords: high-latitude ionosphere; ionosonde chain, geomagnetic storm, variations of ionospheric ionization.

ВВЕДЕНИЕ

Предметом настоящего исследования являются вариации параметров, характеризующих состояние высокоширотной ионосферы в условиях экстремальных магнитных бурь 24-го цикла солнечной активности в марте и июне 2015 г. В соответствии с классификацией Hunsucker, Hargreaves [2003], которая вводит разделение ионосферы на широтные зоны, имеющие существенно разные свойства в зависимости от геомагнитной широты, под высокоширотной ионосферой мы понимаем область, находящуюся выше 60° геомагнитной широты (*Glat*). Эта область включает примыкающую к ней со стороны средних широт субавроральную ионосферу (55°<*Glat*<65°) [Мамруков и др., 2000], авроральную ионосферу (65°<*Glat*<75°) и полярную шапку (*Glat*>75°).

Изучение нестационарной и неоднородной структуры высокоширотной ионосферы имеет особое фундаментальное значение для понимания физики ионосферных процессов в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях, а также для практических задач обеспечения стабильной радиосвязи и навигации в полярных регионах.

Высокоширотная ионосфера имеет сложную пространственную структуру, обусловленную тесной взаимосвязью с магнитосферой Земли и процессами, протекающими в ней. Высыпания высокоэнергетичных заряженных частиц из магнитосферы в ионосферу, интенсивные электрические поля и токи являются одними из основных механизмов формирования различных структурных образований и неоднородностей в крупномасштабной структуре высокоширотной ионосферы. По данным наземного и спутникового зондирования определены следующие структурные особенности высокоширотной ионосферы: ионосферные провалы ионизации (главный, узкий, кольцевой, высокоширотный и др.), полярный и авроральный пики ионизации, полярная полость, язык ионизации [Кринберг, Тащилин, 1984; Деминов, 2015; Степанов и др., 2017; Туманова и др., 2016; Деминов, Шубин, 2018; Karpachev et al., 2019; Karpachev, 2021]. Все эти структурные образования имеют характерные пространственно-временные особенности формирования, зависят от гелиогеомагнитной активности, времени года, времени суток и географического положения точки наблюдения. Они наиболее отчетливо проявляются в зимних условиях или ночью, даже в спокойных геомагнитных условиях. Летом, когда большая часть высокоширотной ионосферы освещена в условиях полярного дня, эти образования сглаживаются либо отсутствуют вовсе. Провалы ионизации, локализованные в спокойных условиях в узких широтных областях, в условиях повышенной геомагнитной активности расширяются и смещаются в направлении средних широт. В области высоких широт индуцируются нейтральные ветры, которые перераспределяют нейтральный состав атмосферы по большей части региона высоких широт и части региона средних широт, что в итоге приводит к изменениям ионизации ионосферной плазмы.

В физике ионосферы, как и в целом в физике околоземного космического пространства, инструментами получения знаний являются данные дистанционных измерений (наземных и спутниковых) наряду с привлечением результатов моделирования. К настоящему моменту не существует детального модельного описания вариаций пространственно-временного распределения параметров плазмы в высокоширотной ионосфере. В первую очередь, это связано с трудностью моделирования ионосферных неоднородностей. Другая причина связана с ограниченной базой экспериментальных ионосферных данных в высоких широтах, что не позволяет улучшать качество и точность эмпирических и полуэмпирических моделей высокоширотной ионосферы, а также корректно верифицировать теоретические модели.

Удачным примером постоянно совершенствующейся модели высокоширотной ионосферы, предназначенной для замены модели IRI в высоких широтах, является эмпирическая канадская модель ионосферы высоких широт Арктики E-CHAIM (Empirical Canadian High Artic Ionospheric Model) [Themens et al., 2017]. Она моделирует пиковые характеристики ионосферы для области геомагнитных широт выше 50° N: N_mF2 и h_mF2 для спокойных условий и N_mF2 для возмущенных условий. Для учета геомагнитной обстановки используются три реальных геомагнитных индекса: *Dst*, A_p, *AE*, интегрируемых из Киотского мирового центра данных (WDC) по геомагнетизму [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/] (*Dst* и *AE*), а также Национального центра геофизических данных (NOAA NGDC) [https://www.ngdc.noaa.gov/] (A_p), что обеспечивает улучшенную точность модели по сравнению с традиционными.

Количество наземных станций наблюдения в полярных регионах по понятным причинам (высокая стоимость, труднодоступность, суровость климата, огромные водные пространства и др.) крайне ограничено. В последние десятилетия для исследования пространственно-временных характеристик ионосферы широко используются методы спутникового дистанционного зондирования из космоса. В радиозатменных и томографических измерениях для изучения состояния ионосферы широко используются проходящие сквозь ионосферу радиосигналы спутников, составляющих группировки низко- и высокоорбитальных спутниковых систем [Jakowski, 2005;

Алпатов и др., 2013; Kunitsyn et al., 2016; Андреева и др., 2021]. Самым распространенным прикладным применением спутников Глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) (GPS, ГЛОНАСС, Beidou, Galileo и др.) стало использование их сигналов для расчета параметра, характеризующего полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы [Афраймович, Перевалова, 2006; Afraimovich et al., 2013; Cherniak et al, 2014]. Мониторинг с помощью высокоорбитальных навигационных спутников обеспечивает широкий охват территории и возможность наблюдения в удаленных и труднодоступных районах, в том числе высокоширотных [Perevalova et al., 2020], но и в случае спутников GNSS существуют проблемы и ограничения их использования в условиях высоких широт. В значительной мере они связаны с наклонением орбит навигационных спутников. Спутники GPS и Beidou имеют наклон орбит спутников около 55° к экватору; Galileo и ГЛОНАСС имеют более высокие наклоны орбит 56° и 64.8° соответственно. На широтах выше полярного круга (~66.5°) в любой момент времени видны несколько навигационных спутников ввиду их высокой орбиты (~20 тыс. км), но они никогда не проходят прямо над головой. Большую погрешность в точность работы навигационных систем вносит среда, в которой распространяется спутниковый радиосигнал. Неоднородности ионизации различного масштаба в высокоширотной ионосфере, связанные с проявлениями гелиогеомагнитной или метеорологической активности, приводят к флуктуациям амплитуды и фазы сигналов спутников GNSS, что в итоге снижает точность определения местоположения и времени [Афраймович, Перевалова, 2006]. Особенно это касается регионов Арктики и Антарктики, где космическая погода во многом определяет состояние полярной ионосферы, влияющей на распространение спутниковых радиосигналов.

В последнее время перспективным направлением считается использование малых космических аппаратов, в том числе наноспутников массой от 1 до 10 кг, к примеру, стандарта CubeSat [Чернышов и др., 2016], для коммерческих, исследовательских и учебных целей. Успех CubeSat обеспечили их унификация и стандартизация. Поскольку стоимость запуска космического спутника, в первую очередь, зависит от веса, легкие малогабартные наноспутники имеют огромное преимущество по сравнению со средними и большими спутниками. Из таких маленьких аппаратов можно составлять большую группировку спутниковых систем, работа которой будет скоординирована, но отдельные аппараты будут выполнять индивидуальные задачи.

Недостаточность базы экспериментальных ионосферных данных в высоких широтах, а также моделей, адекватно воспроизводящих вариации параметров высокоширотной ионосферы, ведут к трудностям в составлении прогноза распространения радиоволн. Именно в этом, в первую очередь, заключается практическая значимость исследований высокоширотной ионосферы — необходимость обеспечения надежности радиосвязи и навигации в полярных районах. Условия радиосвязи определяются тремя основными факторами: высотой слоев ионосферы, высотным распределением концентрации свободных электронов и степенью поглощения радиоволн. Все эти параметры могут быть определены при вертикальном зондировании (ВЗ) ионосферы ионозондами. В результате сканирования зондирующими радиоимпульсами на различных частотах получаются высотно-частотные характеристики ионосферы (ионограммы), из которых впоследствии можно получить высотное распределение концентрации электронов до высоты максимума ионизации F2-слоя.

На предыдущих этапах исследований на основе данных цепи евразийских среднеширотных ионозондов, а также средне- и высокоширотных цепей приемников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров сети INTERMAGNET был проведен анализ долготных особенностей отклика ионосферы на экстремальные магнитные бури в марте и июне 2015 г. [Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021], а также на серию магнитных бурь в марте 2012 г. [Черниговская и др., 2022, 2023].

Для комплексного исследования пространственно-временных особенностей ионосферных неоднородностей на основе данных радиофизических измерений мы добавляем в анализ данные измерений цепи высокоширотных ионозондов, расположенных на севере Евразийского континента на широте северного полярного круга и на более высоких широтах. Совместный анализ данных измерений средне- и высокоширотной цепей ионозондов позволит исследовать глобальный характер пространственно-временных вариаций параметров ионосферы над регионом Евразии, проанализировать сходства и отличия реакции средне- и высокоширотной ионосферы на изменения внешних (гелиогеомагнитная активность) и внутренних (вариации главного геомагнитного поля) факторов, влияющих на состояние ионосферной плазмы. Изучение временных вариаций долготно-широтных распределений параметров ионизации над анализируемым регионом Евразии предоставит возможность исследования перемещения из высоких широт в средние ионосферных провалов ионизации в периоды магнитных бурь. Таким образом, настоящая работа является логическим и очень актуальным продолжением наших предыдущих исследований пространственно-временных вариаций ионосферы над Евразией.

АНАЛИЗ ГЕЛИОГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

Подробный анализ особенностей самых мощных по интенсивности магнитных бурь 24-го цикла солнечной активности в марте и июне 2015 г. приведен в работах [Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021]. Обе магнитные бури были очень сильными, экстремальными (severe) (*Dst*-индекс ниже –200 нТл) по классификации бурь по планетарному индексу *Dst* [Loewe, Prölss, 1997]. По классификации NASA бури также относились к классу G4 [https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation].

Поскольку в данной работе анализируются гелиогеомагнитные эффекты высокоширотной ионосферы,

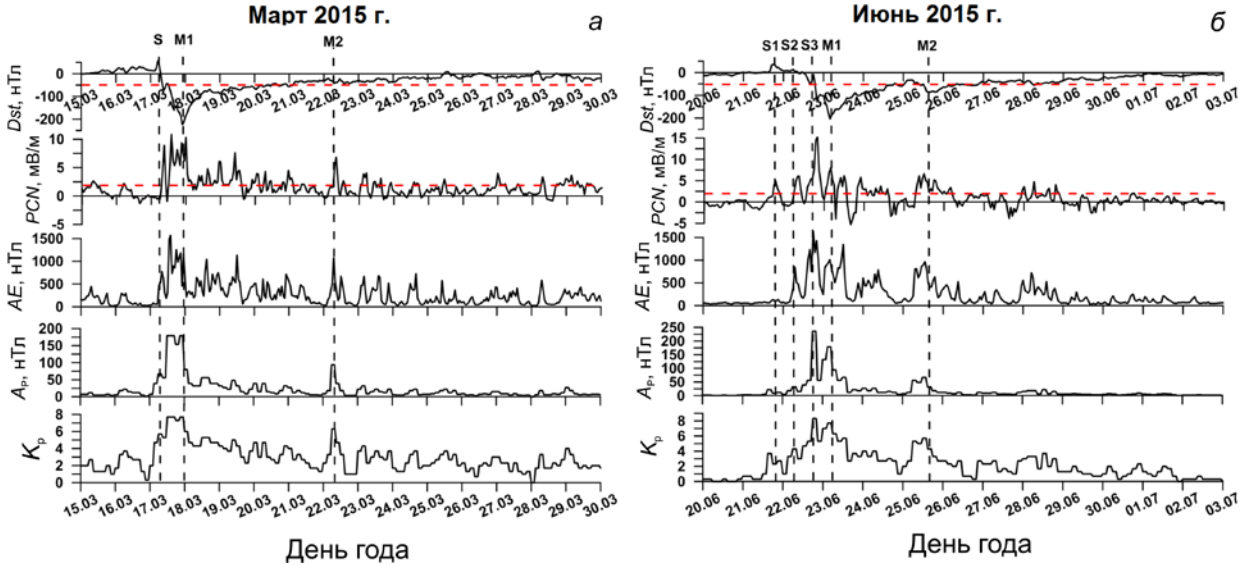

Рис. 1. Вариации индексов геомагнитной активности в периоды бурь в марте (*а*) и июне (*б*) 2015 г. Вертикальными штриховыми линиями показаны моменты начала бури (с буквой S) и максимумов интенсивности (с буквой M). Пороговые буревые уровни значений индексов *Dst* и *PCN* показаны красными горизонтальными штриховыми линиями

дополнительно к геомагнитным индексам *Dst*, K_p, A_p мы используем индексы геомагнитной активности *AE* и *PCN*, характеризующие магнитную активность в полярных шапках (рис. 1). *AE* характеризует магнитную возмущенность, обусловленную усилением протекающих вдоль границы авроральных овала токов в ионосфере (восточного и западного полярных электроджетов).

PC как характеристика магнитной активности в полярных шапках окончательно сформировался лишь в 2006 г., когда была разработана унифицированная процедура его расчета в online режиме по данным станций Туле в Гренландии (*PCN*) и Восток в Антарктике (*PCS*) [Troshichev, Sormakov, 2018]. Унифицированный *PC*-индекс характеризует величину геоэффективного межпланетного электрического поля E_m, воздействующего на магнитосферу, а также динамическое давление солнечного ветра. Геомагнитные возмущения начинаются, когда величина *PC* превышает буревое значение ~2 мВ/м, и прекращаются, когда *PC* падает ниже этого порога. Пороговые буревые уровни значений *Dst* и *PCN* показаны красными горизонтальными штриховыми линиями на рис. 1. Вертикальными штриховыми показаны моменты начала бури (с буквой S) и моменты максимумов интенсивности магнитных бурь (с буквой M).

В марте 2015 г. магнитная буря началась 17 марта (по дню начала буря названа именем св. Патрика). По информации, размещенной на сайте [www.solen.info/solar/old_reports/] и основанной на данных спутника SOHO, буря развивалась в результате взаимодействия магнитосферы Земли с высокоскоростными потоками солнечного ветра из четырех корональных дыр (coronal hole high speed streams, CH HSS) и выбросом корональной массы (coronal mass ejection, CME), сопровождавшим относительно слабую рентгеновскую вспышку класса C9.1, зарегистрированную 15 марта 2015 г. Главная фаза бури продолжалась ~16.5 ч — с внезапного начала бури (SSC) в 06:23 UT (линия S на рис. 1, *а*) до 22:47 UT. В максимуме бури *Dst* понизился до –223 нТл (линия M1, панель *а*); K_p возрастал от 5_+ до 8_-; A_p достиг 179 по данным сайта World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html].

Обращает на себя внимание значительный рост *AE* [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html] и *PCN* [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_PC_ind.ru.html] во время главной и ранней фазы восстановления бури. Он указывает на усиление солнечно-ветровых драйверов бури [Troshichev, Sormakov, 2018; Калишин и др., 2020]. Хорошая корреляция между усилением *PCN* и *AE* свидетельствует о том, что межпланетное электрическое поле и динамическое давление солнечного ветра очень геоэффективно воздействовали на магнитосферу и ионосферу Земли в полярном регионе. Это привело к существенному усилению протекающих вдоль границы авроральных овала токов в ионосфере — восточного полярного электроджета ($AE > 0$).

Изолированный всплеск магнитной возмущенности наблюдался 22 марта 2015 г. с 06:00–09:00 до ~18 UT. Рост активности был вызван воздействием CH HSS на магнитосферу Земли. Геомагнитные эффекты, связанные с событиями CH HSS, обычно незначительно влияют на вариации *Dst*, но хорошо видны в вариациях других геомагнитных индексов, особенно в *PCN*, *AE*, A_p и K_p (K_p возрос до 6_-; A_p достиг 94 (линия M2 на панели *а*).

Вторая по интенсивности магнитная буря 24-го цикла стала результатом воздействия на магнитосферу Земли высокоскоростного солнечного ветра, CMEs и серии солнечных вспышек. Вспышка M6/2b произошла 22 июня 2015 г. в 18:23 UT [www.solen.info/solar/old_reports/]. Этому событию предшествовали эффекты вспышки M2/1n 21 июня в сочетании с многочисленными CMEs 18, 19 и

21 июня. С 21 по 22 июня 2015 г. на Землю пришли фронты трех межпланетных ударных волн разной интенсивности (линии S1, S2, S3 на панели *б*). Фронт третьей, самой сильной ударной волны достиг магнитосферы Земли в 18:30 UT 22 июня (линия S3), после чего началась экстремальная по интенсивности [Loewe, Prölss, 1997] геомагнитная буря класса G4, которая продолжалась много часов. В максимуме бури *Dst* снизился до –204 нТл (линия M1 на панели *б*), K_p увеличился до 8_+, A_p достиг 236 по данным [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html].

Приходы на Землю 21–22.06.2015 г. фронтов трех межпланетных ударных волн разной интенсивности, вызванные CMEs, очень явно отразились максимумами в вариациях *PCN* (линии S1-S3 на панели *а*), а также *AE*. *PCN* возрос в момент SSC (линия S3) почти до 15 мВ/м. Для сравнения, в период самой интенсивной магнитной бури в марте 2015 г. *PCN* достиг 10 мВ/м. Это свидетельствует об очень высокой геоэффективности магнитной бури в июне 2015 г.

Позже, 24 июня 2015 г. наблюдался эффект CME, связанного с солнечной вспышкой M6/2b 22 июня. К 25 июня интенсивность вновь выросла до уровня слабой геомагнитной бури — *Dst* составил –86 нТл (линия M2 на панели *б*), K_p увеличился до 6_-, A_p достиг 67. Наблюдался также всплеск *AE*, что говорит об усилении в этот период восточного аврорального электроджета. Таким образом, период экстремальной магнитной бури в июне 2015 г. был очень сложным и продолжительным.

ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для анализа пространственно-временных вариаций ионосферных параметров в период экстремальных геомагнитных возмущений в марте и июне 2015 г. используются данные о среднечасовых значениях максимальной электронной плотности и высоты максимума ионизации слоя F2 ионосферы по измерениям цепи из семи высокоширотных ионозондов, расположенных в диапазоне широт 67°–71° N (геомагнитные широты 58°<Glat<65°) в долготном секторе 26–171° E Евразийского континента (рис. 2, красные метки и подписи; таблица). Цепь составляют ионозонды российских научных организаций: ИСЗФ СО РАН, ИКФИА СО РАН (DPS-4 в пунктах Норильск и Жиганск) и ААНИИ Росгидромета (Canadian Advanced Digital Ionosonde, CADI [MacDougall et al., 1995; Выставной и др., 2013; Калишин и др., 2020] в пунктах Ловозеро, Амдерма, Салехард, Певек). Используются также данные ионозонда SO166 (Alpha Wolf) [Kozlovsky et al., 2013; Enell et al., 2016] в Геофизической обсерватории Соданкюля (Финляндия) [https://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/iono_ menu.html].

Для создания на территории России такой долготно-распределенной сети высокоширотных станций исторически потребовались большие организационные усилия и привлечение серьезных материальных ресурсов. Первые исследования высокоширотной ионосферы проводились с 1939 г. на станции в бухте Тихой (арх. Земля Франца-Иосифа) [Выставной и др., 2013]. Все эти задачи были успешно решены специалистами ААНИИ Росгидромета. В настоящее время создана сеть цифровых ионосферных станций ВЗ в высоких широтах с передачей в онлайн-режиме основных параметров ионосферы в единый Центр данных для последующей обработки и прогноза фонового состояния авроральной ионосферы. Сформированная сеть ВЗ ионосферы позволяет непрерывно контролировать быстротекущие процессы в высокоширотной ионосфере [Калишин и др., 2020].

По взаимному согласию участников исследования все ионограммы на анализируемые даты проходили процесс ручной обработки с целью минимизации возможных ошибок при автоматизированной обработке ионограмм. Как и в предыдущих исследованиях по данным измерений среднеширотной цепи ионозондов [Черниговская и др., 2019, 2022; Chernigovskaya et al., 2021], для анализа ионосферных эффектов магнитных бурь используются критическая частота f_oF2 слоя F2, которая пропорциональна максимальной электронной концентрации F-области N_mF2 [Поляков и др., 1968], и высота максимума ионизации слоя h_mF2, которая определяется из минимальных действующих высот h'F и h'F2, полученных из ионограмм ВЗ (рис. 3).

На рис. 3 показан пример работы ионозонда ВЗ — ионограммы с характерными следами отражений высокочастотных импульсных радиосигналов, генерируемых ионозондами (с сайта [http://icenter.izmiran.ru/f-h_db.php/], там же дано подробное описание ионосферных характеристик, определяемых по ионограммам ВЗ). Ионограмма в виде высотно-частотной характеристики представляет собой зависимость действующей высоты отражения (или времени, за которое радиосигнал достигает точки отражения и возвращается обратно) от рабочей частоты ионозонда. Характерные минимальные действующие высоты h'E, h'F, h'F2, а также критические частоты f_oE, f_oF1, f_oF2 для каждого слоя определяются из ионограмм вручную или автоматически с помощью специальных компьютерных программ. Основными целевыми параметрами являются N_mF2 и h_mF2. Они рассчитываются с помощью программ, разрабатываемых индивидуально для ионозондов разных типов с учетов их технических особенностей и методических рекомендаций по пересчету стандартных параметров ионосферы из ионограмм ВЗ.

В настоящем исследовании при анализе вариаций параметров ионосферы по данным цепи высокоширотных ионозондов CADI в Певеке, Салехарде, Амдерме и Ловозеро (см. рис. 2 и таблицу) отсутствуют данные по h_mF2, поскольку нет программы стандартной обработки параметров ионограмм для ионозондов CADI. Поэтому было проведено дополнительное исследование на основе данных измерений DPS-4 в Иркутске и Норильске для выяснения особенностей вариаций следующих параметров (см. пример на рис. 3): (1) h'F2 (или h'F, если отсутствует слой F1) — стандартного параметра, получаемого из ионограмм ВЗ и (2) h_mF2 — параметра, рассчитываемого из ионограмм с помощью программного комплекса интерактивной обработки ионограмм на основе метода [Huang, Reinisch, 1996]. Сравнительный анализ временных вариаций h_mF2 (черные кривые на рис. 4)

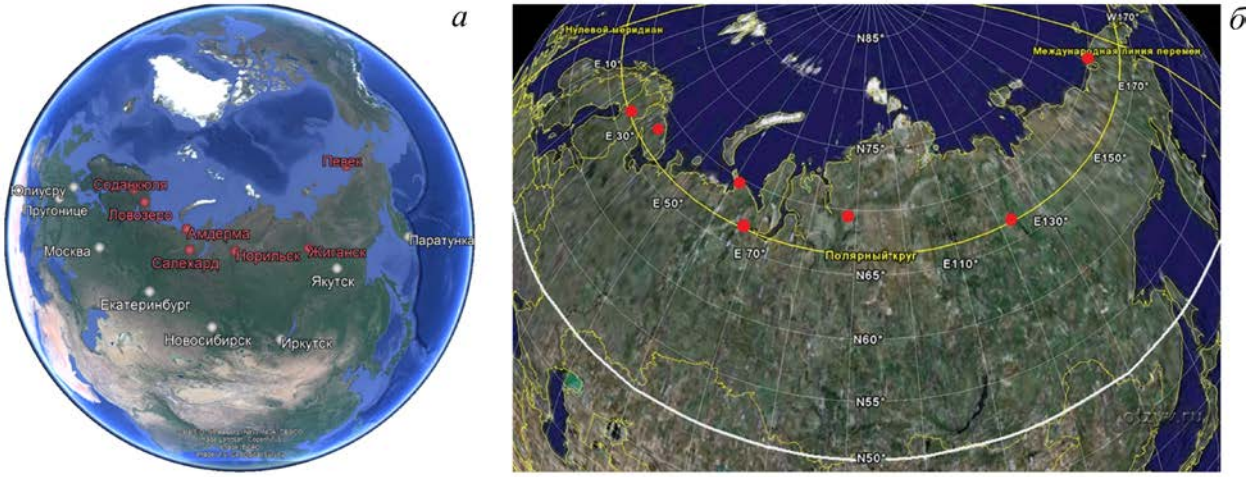

Рис. 2. Карты расположения цепей высоко- и среднеширотных евразийских ионозондов (*а*) и ионозондов высокоширотной цепи относительно северного полярного круга (*б*)

Ионозонды высокоширотной цепи

Ионозонд	Тип ионозонда	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
		Широта	Долгота	Широта	Долгота
Соданкюля	SO166	67° N	26° E	64° N	118° E
Ловозеро	CADI	68° N	35° E	64° N	126° E
Амдерма	CADI	70° N	61° E	63° N	147° E
Салехард	CADI	67° N	67° E	59° N	150° E
Норильск	DPS-4	69° N	88° E	60° N	166° E
Жиганск	DPS-4	67° N	123° E	58° N	169° W
Певек	CADI	71° N	171° E	65° N	135° W

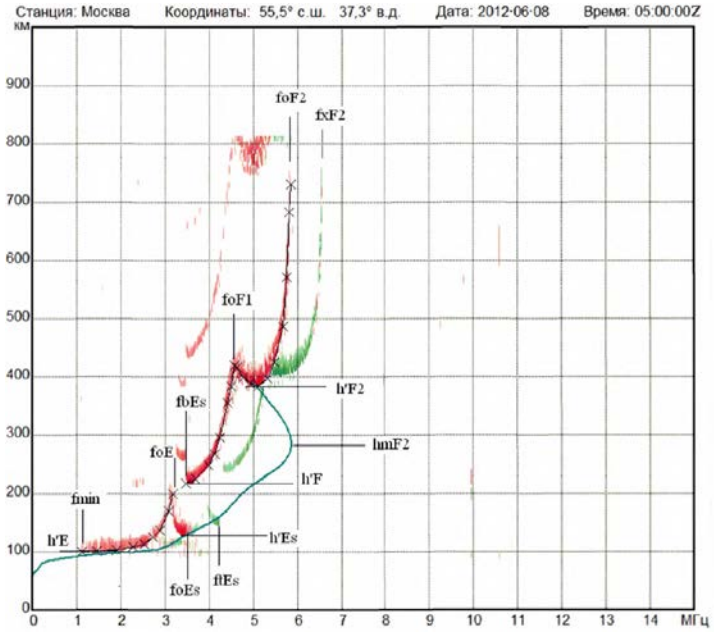

Рис. 3. Пример ионограммы вертикального зондирования [http://icenter.izmiran.ru/f-h_db.php]

и h'F2 (серые кривые на рис. 4) для рассматриваемых в статье периодов магнитных бурь в марте и июне 2015 г. (см. рис. 1) показал следующее.

1. В спокойных условиях 15–16.03.2015 г. (рис. 4, *а*, *б*) и 20–21.06.2015 (*в*, *г*) обе высоты в целом имеют схожий суточный ход с минимумом вблизи полудня (12 LT) и максимумом вблизи либо после полуночи (00–04 LT). Как правило, h_mF2 > h'F2. Для условий равноденствия среднее превышение составляет ~32 км (*а*, *б*), среднедневное (10–14 LT) ~27 км и средненоч-

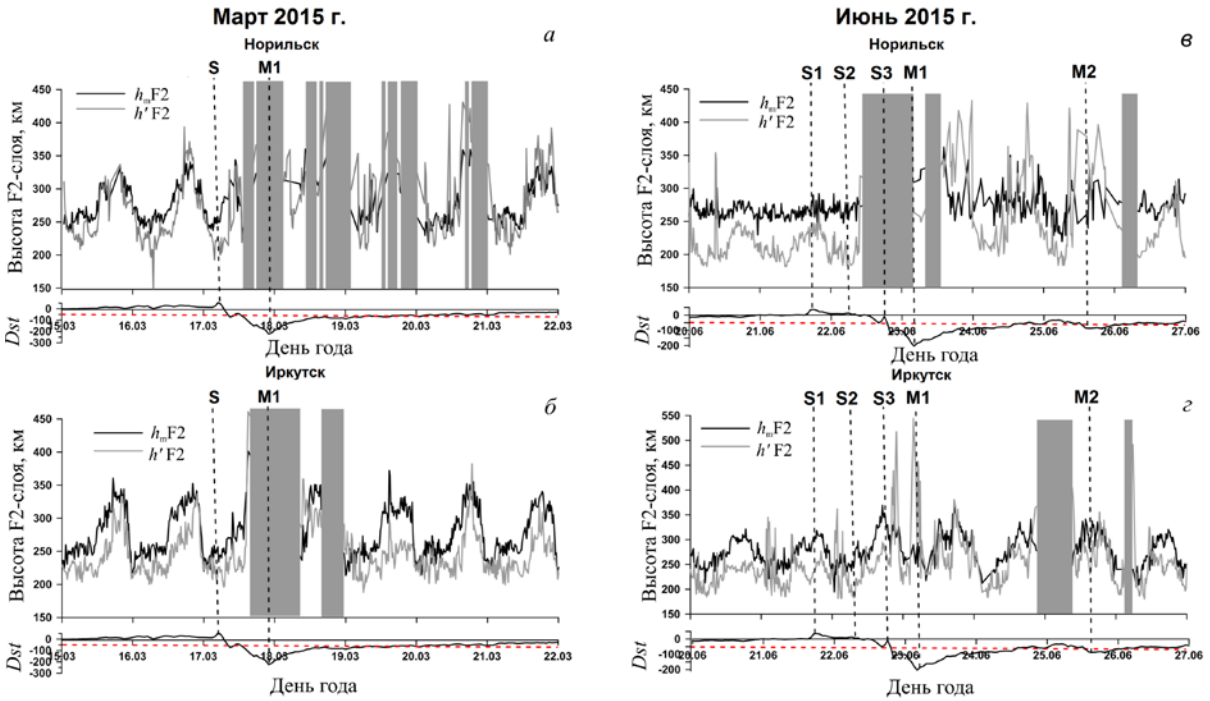

Рис. 4. Временные вариации h_mF2 (черные кривые), h'F2 (серые кривые) по данным дигизондов DPS-4 в марте 2015 г. (*а* — Норильск, *б* — Иркутск) и июне 2015 г. (*в* — Норильск, *г* — Иркутск) и *Dst*. Время UT. Серые прямоугольники — периоды блэкаутов радиосигналов. Вертикальные штриховые линии — моменты начала бури (с буквой S) и максимумов интенсивности (с буквой M)

ное (00–04 LT) ~33 км. Для условий летнего солнцестояния среднее превышение составляет ~50 км (*в, г*), среднедневное (10–14 LT) ~60 км и средненочное (00–04 LT) ~40 км. В спокойных условиях также отмечаются выбросы h'F2 в Норильске 16.03.2015 (*а*) и 20.06.2015 (*в*) и в Иркутске 21.06.2015 (*г*), превышающие h_mF2 в тот же момент местного времени.

2. Во время магнитных бурь закономерности спокойных условий существенно нарушаются. В высокоширотной ионосфере над Норильском временной интервал нерегулярных вариаций, когда очевидно наблюдается сильная ионосферная буря, гораздо более продолжителен (рис. 4, *а*, *в*), чем в среднеширотной ионосфере над Иркутском (*б, г*). По данным ионозонда в Норильске ионосферная буря длилась с 17 по 21 марта (*а*), а по данным ионозонда в Иркутске — с 17 по 18 марта (*б*). Для магнитной бури в июне 2015 г. по данным ионозонда в Норильске ионосферная буря длилась с 22 по 26 июня 2015 г. (*в*), а по данным ионозонда в Иркутске — с 22 по 23 июня 2015 г. (*г*). Во время главных и ранних восстановительных фаз магнитных бурь отмечались периоды полного отсутствия данных ВЗ ввиду блэкаутов радиосигналов (серые прямоугольники).

Таким образом, рис. 4 показывает, что в периоды сильных магнитных бурь h'F2 меняется хаотично и часто существенно (до 100 км) превышает h_mF2. Это превышение объясняется явлением, называемым G-conditions, когда f_oF1≥ f_oF2, в этом случае h_mF2, будучи высотой максимума, по сути, представляет собой h_mF1.

Даже такой простой сравнительный анализ дает основание сделать заключение, что одновременное использование параметров h_mF2 и h'F2 в условиях повышенной геомагнитной активности невозможно. Они ведут себя некоррелированно, между ними нет линейной зависимости, их вариации нерегулярны. В этом случае невозможно модельно ввести некий поправочный коэффициент, который позволил бы свести выборку этих разных величин к однородной, пригодной для одновременного анализа пространственно-временных вариаций параметра, характеризующего вариации высоты максимума ионизации ионосферы. Поэтому в дальнейшем при сравнительном анализе полученных на основе данных измерений цепей средне- и высокоширотных ионозондов (см. рис. 2) вариаций параметров ионосферы в периоды магнитных бурь мы будем использовать только параметр f_oF2.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБ ИОНИЗАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НАД ЕВРАЗИЕЙ

В периоды магнитных бурь развивается целый комплекс процессов в ионосферной плазме в ответ на геомагнитное воздействие (ионосферные бури). В результате бурь существенно изменяются параметры ионосферы. К примеру, в возмущенные периоды f_oF2 может уменьшаться или увеличиваться по сравнению со значениями в спокойных условиях (соответственно отрицательные или положительные ионосферные бури) [Matsushita, 1959; Buonsanto, 1999; Mikhailov, 2000].

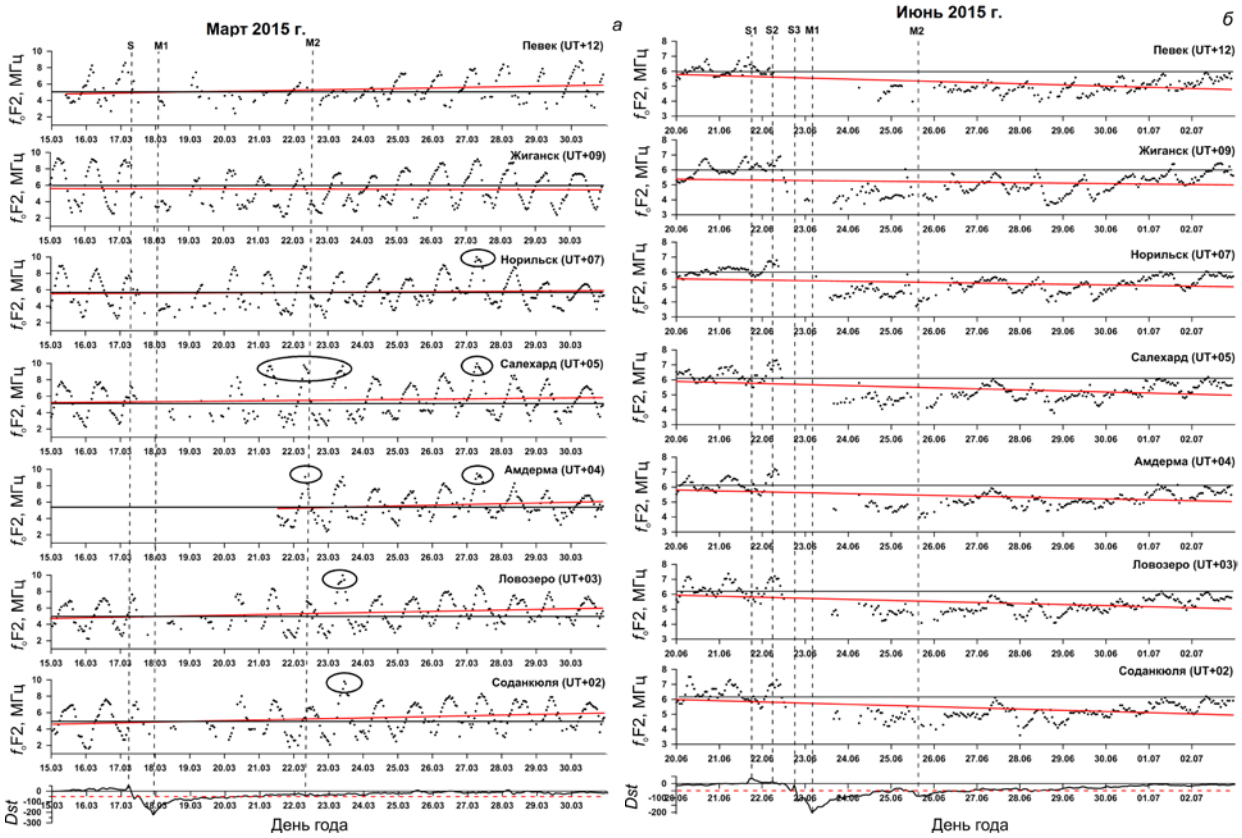

Рис. 5. Временные вариации f_oF2 (черные точки) по данным измерений ионозондов высокоширотной цепи и вариации индекса *Dst* для магнитных бурь в марте (*а*) и июне (*б*) 2015 г. Время в UT. Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты начала бури (S) и моменты максимумов интенсивности магнитных бурь (M). Черные сплошные горизонтальные линии — среднесуточные уровни f_oF2, рассчитанные по 14 спокойным дням до момента начала бурь. Красные сплошные горизонтальные линии — линейные тренды временных вариаций f_oF2

На рис. 5 показаны временные вариации f_oF2 по данным измерений высокоширотной цепи евразийских ионозондов для периодов 15–30.03.2015 (*а*) и 20.06–02.07.2015 (*б*). На нижних панелях рис. 5, *а*, *б* показаны вариации индекса *Dst* в периоды магнитных бурь. Красные пунктирные линии обозначают уровень *Dst*=–50 нТл, когда по классификации [Loewe, Prölss, 1997] условия геомагнитной возмущенности относят к буревым (слабая магнитная буря). Вертикальные черные пунктирные линии соответствуют обозначениям на графиках рис. 1. Они обозначают моменты внезапного начала бури (S) и моменты максимальной интенсивности магнитной бури (M). К сожалению, в период бури в марте 2015 г. ионозонд в Амдерме не работал по техническим причинам. Его ввели в эксплуатацию 21.03.2015 в 13:55 UT (см. рис. 5, *а*). Черными сплошными горизонтальными линиями показаны среднесуточные уровни f_oF2, рассчитанные по 14 спокойным дням до момента начала бурь. Красными сплошными горизонтальными линиями показаны линейные тренды временных вариаций f_oF2.

Графики рис. 6 повторяют вариации f_oF2, но более подробно в увеличенном масштабе для периодов 16–19.03.2015 (рис. 6, *а*) и 20.06–26.06.2015 (рис. 6, *б*). На них дополнительно серыми прямоугольниками показаны периоды блэкаутов радиосигналов ионозондов, аналогично графикам на рис. 4.

Обращают на себя внимание сильные различия в характере временных вариаций f_oF2 для анализируемых периодов магнитных бурь. Очевидно, эти различия связаны с тем, что бури происходили в разные сезоны года — март (период весеннего равноденствия) и июнь (период летнего солнцестояния). Поэтому фоновые характеристики ионосферы, свойственные для спокойных геомагнитных условий, проявляли свои сезонные и суточные особенности [Ratovsky et al., 2013].

1) Существенно отличается суточный размах вариаций f_oF2 (разница между максимальными и минимальными значениями в суточном ходе) в спокойные дни до начала магнитных бурь и в последующие возмущенные дни для условий равноденствия (см. рис. 5, *а*) и солнцестояния (рис. 5, *б*). Различные сезоны года характеризуются разными особенностями регулярных вариаций ионосферы, например, суточными. В период летнего солнцестояния регионы расположения ионозондов высокоширотной цепи находятся в условиях полярного дня, когда Солнце не закатывается за горизонт практически все сутки. Весной суточные колебания f_oF2 существенно выше, чем летом. Размах вариаций f_oF2 в марте 2015 г. составлял 5–6 МГц (рис. 5, *а*, 6, *а*), в июне 2015 г. — 2–3 МГц (рис. 5, *б*, 6, *б*).

2) После начала магнитных бурь (линии S на рис. 5, *а*, *б* и 6, *а*, *б*) на протяжении главных фаз бурь (до ли-

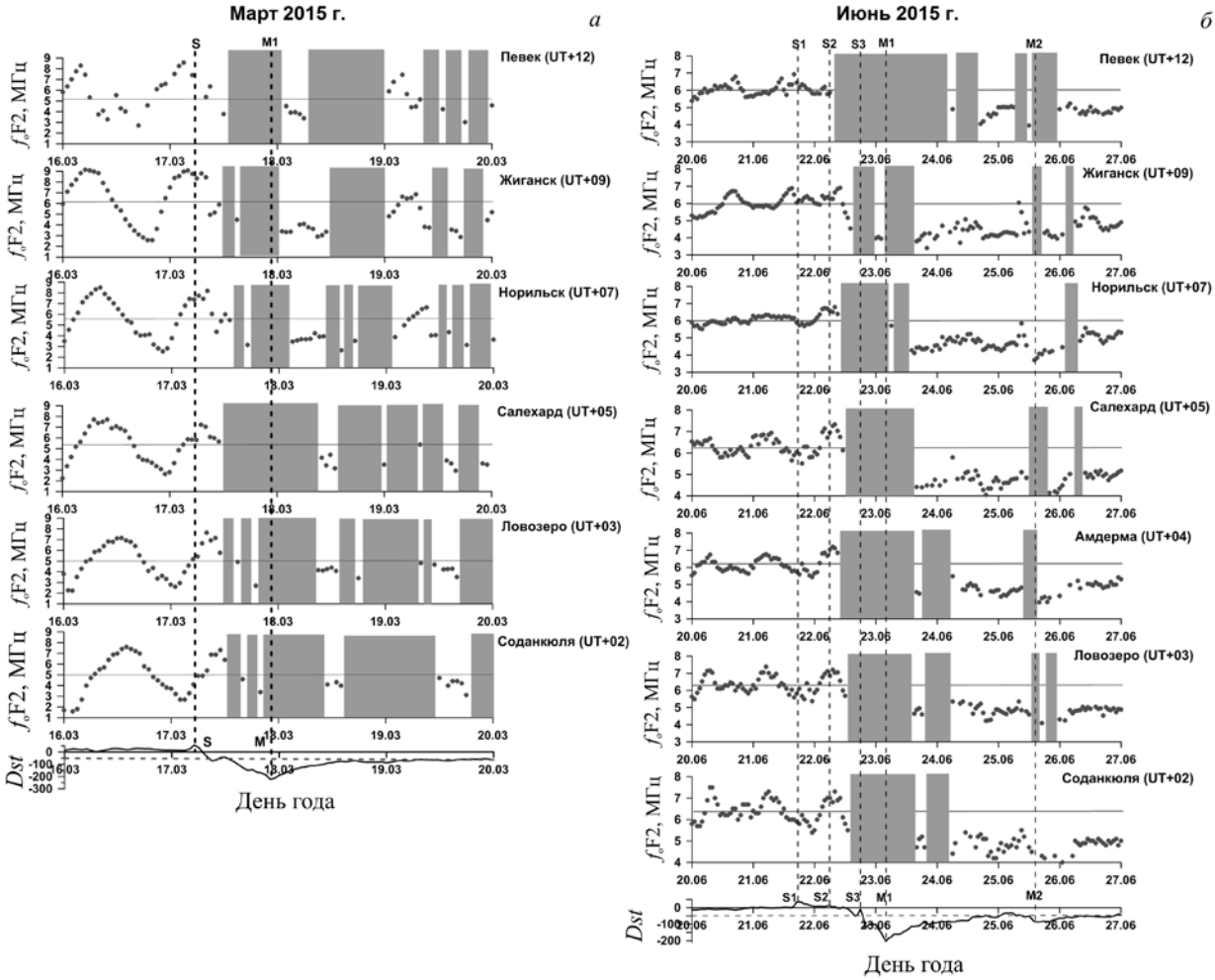

Рис. 6. Временные вариации f_oF2 (черные точки) по данным измерений ионозондов высокоширотной цепи и *Dst* для магнитных бурь в марте (*а*) и июне (*б*) 2015 г. Время UT. Черные сплошные горизонтальные линии — среднесуточные уровни f_oF2, рассчитанные по 14 спокойным дням до момента начала бурь. Серые прямоугольники — периоды блэкаутов радиосигналов. Вертикальные штриховые линии — моменты начала бури (S) и максимумов интенсивности (M)

ний M1 на рис. 5, *а*, *б* и 6, *а*, *б*) отмечаются продолжительные периоды отсутствия данных.

Полное отсутствие на ионограммах следов отражений радиосигналов, генерируемых ионозондами, является результатом совместного действия механизмов падения ионизации на высотах верхней ионосферы (отрицательные ионосферные бури являются доминирующей характеристикой в ионосферном отклике на усиление геомагнитной активности) и аномального увеличения поглощения радиоволн на высотах нижней ионосферы. Связано это с тем, что во время геомагнитных возмущений ионизация нижней ионосферы (области D) часто бывает очень высока в результате вторжения в ионосферу высоких широт энергичных частиц из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля. Вследствие этого радиоволны средних и высоких частот, используемые при ВЗ, полностью поглощаются в нижних слоях ионосферы. Это явление носит название блэкаута и серьезно препятствует ионосферным наблюдениям традиционными методами, в частности, с помощью ВЗ и НЗ.

Для более детального анализа эффектов магнитных бурь в ионосферной ионизации необходимо дополнительно рассматривать вариации параметра f_{min}, характеризующего поглощение радиоволн на высотах нижней ионосферы в области D [Черниговская и др., 2024], а также параметр f_oE_s, характеризующий образование на высотах области E ионосферы спорадических экранирующих радиосигналы слоев E_s, что является задачей дальнейшего углубленного исследования.

В марте 2015 г. по данным ионозондов в Норильске, Ловозеро и Соданкюля с короткими промежутками блэкаутов все же можно проследить суточный ход f_oF2 на главной фазе бури 17 марта 2015 г. (рис. 6, *а*). По данным ионозондов в Певеке, Жиганске, Салехарде со второй половины суток 17 марта 2015 г. отмечались полные блэкауты радиосигналов (*а*).

В июне 2015 г., когда начало магнитной бури было трехступенчатым (линии S1–S3 на рис. 5, *б*; 6, *б*), уже после прихода к Земле второй ударной волны (линия S2) на ионозондах в Певеке, Норильске, Амдерме начались блэкауты (рис. 6, *б*). На протяжении

главной фазы магнитной бури в июне 2015 г. данные отсутствовали на всех ионозондах, за исключением Жиганска (см. рис. 6, *б*) данные которого явно демонстрировали эффект развития отрицательной ионосферной бури, т. е. падения f_oF2.

После достижения максимальной интенсивности магнитных бурь (линии M1 на рис. 5, *а*, *б* и 6, *а*, *б*) на ранних фазах восстановления отмечается резкое уменьшение значений f_oF2 для обеих бурь. Это хорошо видно по расположению точек на графиках вариаций относительно среднесуточного уровня f_oF2 в спокойных условиях. Для бури 18–19.03.2015 регистрируемые значения f_oF2 были ниже среднесуточного уровня f_oF2 в спокойных условиях более чем на 2 МГц для ионозондов в Жиганске, Норильске. Для ионозондов в Салехарде, Ловозеро, Соданкюля 18–19.03.2015 отмечались большие промежутки отсутствующих данных (см. рис. 5, *а*; 6, *а*), поэтому невозможно установить, насколько изменились значения f_oF2. Периоды полного блэкаута радиосигнала приходились на ночное время, когда высока вероятность формирования провалов ионизации. Для самого высокоширотного ионозонда в Певеке период пониженных значений f_oF2, а значит и электронной концентрации на высоте максимума F2-слоя, продолжался практически до 25.03.2015 с небольшим всплеском ионизации 19.03.2015.

Для июньской бури 2015 г. блэкаут данных ВЗ отмечался по всем ионозондам высокоширотной цепи бóльшую половину суток 23.06.2015. На ионозондах в Певеке, Амдерме, Ловозеро, Соданкюля измерения отсутствовали еще практически часть суток 24.06.2015. На ионозондах в Жиганске, Норильске, Салехарде данные появились с ночи 24 июня по местному времени.

С 20 марта 2015 г. начинается медленное восстановление параметров ионосферы до значений в спокойные дни до начала бури, кроме самого высокоширотного ионозонда в Певеке. Изолированный всплеск магнитной возмущенности 22 марта 2015 г., связанный с воздействием на магнитосферу Земли CH HSS (линия M2 на рис. 5, *а*) не вызвал существенной реакции в измерениях ионозондов.

Обращают на себя внимание периоды существенного роста дневной ионизации по данным ионозондов: 27 марта в Норильске; 21–23, 27 марта в Салехарде; 23, 27 марта в Амдерме; 23 марта в Ловозеро; 23 марта в Соданкюля. В эти дни наблюдались максимальные дневные значения f_oF2 до 9–10 МГц (показаны овалами на рис. 5, *а*), что превышает на 2–3 МГц уровень околополуденных значений f_oF2 в спокойные дни 15–16 марта 2015 г. до начала бури. Причем следует отметить общую тенденцию увеличения среднесуточных f_oF2. По данным этих же ионозондов (в Норильске, Салехарде, Амдерме, Ловозеро, Соданкюля) после 25 марта 2015 г. наблюдался рост ночной ионизации (минимальные f_oF2 возросли с 2–3 МГц до ~4 МГц).

В период июньской бури 2015 г. восстановление ионизации ионосферы началось со второй половины суток 24 июня. Всплеск интенсивности геомагнитной бури 25 июня вновь до уровня слабой бури, связанный с CME после солнечной вспышки M6/2b 22 июня, вновь привел к короткому периоду блэкаутов на ионозондах в Певеке, Жиганске, Салехарде, Амдерме, Ловозеро. До 3 июля 2015 г. общий уровень ионизации в регионе расположения цепи высокоширотных ионозондов не восстановился до спокойного уровня, предшествовавшего моменту начала бури. Отчетливо виден отрицательный тренд временных вариаций f_oF2 (красная линия на рис. 5, *б*) относительно среднесуточного уровня f_oF2 в спокойных условиях (черная линия на рис. 5, *б*).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Важная роль в физике атмосферы и ионосферы исследуемого высокоширотного региона Евразии принадлежит его географическому положению на поверхности Земли и ориентации относительно Солнца. На рис. 2, *б* показано расположение ионозондов относительно широты северного полярного круга 66°33′ N. Видно, что ионозонды в Жиганске, Салехарде и Соданкюля располагаются примерно на этой широте, остальные ионозонды в Певеке, Норильске, Амдерме, Ловозеро расположены на более высоких широтах. Это особенно важно для анализа событий, происходящих вблизи периодов летнего и зимнего солнцестояния, так как они происходят в условиях полярного дня или ночи.

Данные измерений всех ионозондов евразийской высокоширотной цепи (рис. 5, 6) в спокойных условиях (до начала магнитных бурь), а также в возмущенных геомагнитных условиях убедительно подтверждают характерные особенности ионизации высокоширотной ионосферы, полученные в рамках локальной эмпирической модели электронной концентрации по данным дигизонда DPS-4 в Норильске [Ratovsky et al., 2013], описывающей суточные и сезонные вариации, а также и вариации в цикле солнечной активности. Максимальные дневные значения f_oF2 в марте в спокойных условиях до начала бури (рис. 5, *а*; 6, *а*) существенно выше, чем в июне (рис. 5, *б*; 6, *б*). А минимальные ночные значения f_oF2 в июне (рис. 5, *б*; 6, *б*) превосходят минимальные значения f_oF2 в марте (рис. 5, *а*; 6, *а*). В суточных вариациях f_oF2 в условиях летнего солнцестояния присутствует только один околополуденный максимум (рис. 5, *б*; 6, *б*), как в условиях равноденствия (рис. 5, *а*; 6, *а*).

Возрастания ионосферной ионизации над высокоширотными регионами Восточной, Западной Сибири и Европы (овалы на рис. 5, *а*) и связанная с этим тенденция повышения среднесуточных f_oF2 (за исключением ионозонда в Жиганске) в анализируемый период 17–30 марта 2015 г. (красные линии на рис. 5, *а*) могли быть вызваны крупномасштабными возмущениями термосферного молекулярного газа. Акцентируем внимание на том, что с 21 марта 2015 г. уровень геомагнитной возмущенности по индексам *Dst* и *PCN* был уже небуревым

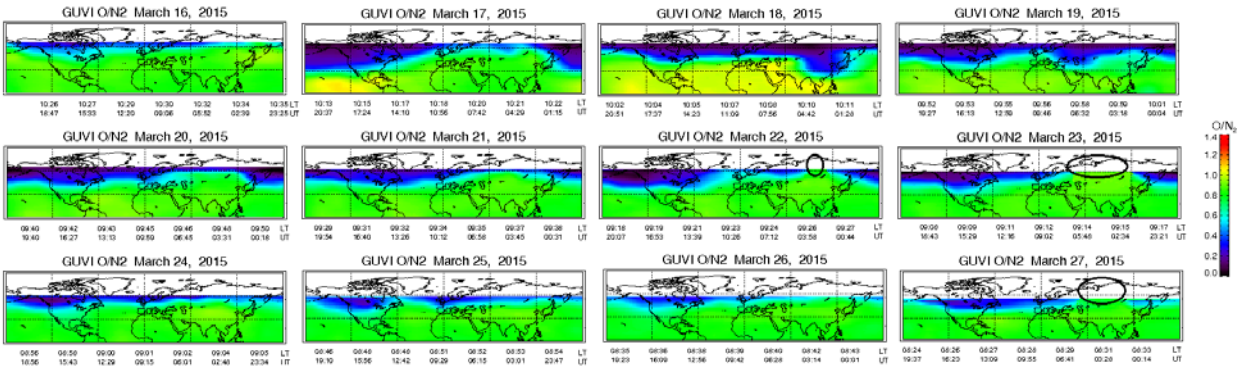

Рис. 7. Карты глобальных пространственных распределений [O]/[N_2] на высотах термосферы выше ~100 км по спутниковым измерениям GUVI TIMED для каждого дня 16–27 марта 2015 г. в Северном полушарии

(*Dst*>–50 нТл, *PCN*<2 мВ/м) (рис. 1, *а*). После изолированного всплеска магнитной возмущенности 22 марта 2015 г. (с 06:00–09:00 примерно до 18 UT), связанного с воздействием на магнитосферу Земли CH HSS, с 23 марта 2015 г. геомагнитная обстановка была уже спокойной до конца анализируемого периода 30 марта.

На рис. 7 показана последовательность карт глобальных пространственных распределений отношения плотностей [O]/[N_2] в термосфере выше ~100 км по спутниковым измерениям GUVI TIMED для каждого дня 16–27 марта 2015 г. в Северном полушарии [http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-galleryl3on2]. К сожалению, спутниковые данные для анализируемого периода ограничены широтами примерно 65° N. Эволюция ото дня ко дню этих глобальных карт позволяет визуально проанализировать образование и динамику крупномасштабных областей пониженного [O]/[N_2] в области высоких и средних широт Северного полушария. Образовавшись в полярных областях термосферы, это волнообразное возмущение затем распространяется в область средних широт и трансформируется в пространстве и во времени в течение нескольких суток в период восстановительной фазы бури. За счет высокой частоты столкновений молекулярных ионов и нейтралов такая волна приобретает большие масштаб и импульс и перемещается на значительные расстояния даже при «выключении» магнитосферного источника в авроральных широтах, как в нашем случае. Физический параметр [O]/[N_2] является одним из ключевых, определяющих состояние системы ионосфера—термосфера во время ионосферных бурь. Следствием понижения [O]/[N_2] в термосферном газе является уменьшение электронной концентрации в данной области и соответственно развитие эффекта отрицательной ионосферной бури.

Анализ, проведенный ранее в [Черниговская и др., 2019; Chernigovskaya et al., 2021], показал образование над территорией Дальнего Востока обширной области пониженного [O]/[N_2] в нижней термосфере (см. рис. 7) во время главной фазы магнитной бури 17 марта 2015 г. Это волнообразное возмущение, охватившее всю территорию высоких широт Евразии и обширные области средних широт (до 30° N), перемещалось к западу над территорией Восточной и Западной Сибири по направлению к Европе в течение примерно четырех дней (до 20 марта 2015 г.) на восстановительной фазе магнитной бури. Как следствие, в среднеширотной ионосфере над территорией Евразии на высотах F2-области наблюдался продолжительный эффект отрицательной ионосферный бури до 20 марта 2015 г. (рис. 5, *а*; 6, *а*).

С 21 марта интенсивность области пониженного [O]/[N_2] на высотах термосферы спадала. Уменьшался охват среднеширотных территорий (см. рис. 7). Регион, охваченный пониженным [O]/[N_2], мало изменялся в пространстве ото дня ко дню. Геомагнитная обстановка к этому времени была уже спокойной (см. рис. 1, *а*). Всплеск магнитной возмущенности 22 марта 2015 г. привел к небольшой интенсификации области пониженного [O]/[N_2] 22–23 марта в основном над регионами высоких и средних широт западного полушария: Северной Америки, акватории Тихого океана, а также Дальнего Востока, поскольку эти регионы находились в ночном и вечернем секторах. Территория высоких широт Восточной и Западной Сибири (ионозонды в Норильске, Салехарде, Амдерме) 22 марта 2015 г. находилась в области повышенного [O]/[N_2] (овалы на рис. 7). Область повышенного [O]/[N_2] 23 марта 2015 г. расширилась к западу до европейского региона (ионозонды в Ловозеро, Соданкюля). В эти дни 22–23 марта 2015 г. данные измерений ионозондов в Салехарде, Амдерме, Ловозеро и Соданкюля показывали повышенные f_oF2 (овалы на рис. 5, *а* и 7). Такая же ситуация наблюдалась 27 марта для ионозондов в Норильске, Салехарде, Амдерме (рис. 5, *а* и 7). Существенные пространственно-временные вариации нейтрального состава термосферы привели к вариациям электронной концентрации ионосферы, зарегистрированным цепью высокоширотных ионозондов. Вследствие этого на этих долготах Евразии отрицательная фаза ионосферной бури в период главной и восстановительной фаз магнитной бури в марте 2015 г. сменилась положительным возмущением ионосферной электронной концентрации после завершения геомагнитного возмущения.

Карты на рис. 7 показывают существенные долготные различия в глобальном пространственном распределении [O]/[N_2] на высотах термосферы между восточным и западным полушариями в период маг-

нитной бури в марте 2015 г. Над западным полушарием практически все время располагалась область пониженного [O]/[N_2] с небольшими пространственно-временными вариациями. Над восточным полушарием наблюдались вариации [O]/[N_2] от очень низкого в период главной и восстановительной фаз магнитной бури до повышенного после завершения магнитного возмущения.

В работах [Черниговская и др., 2020; Chernigovskaya et al., 2021] были проанализированы долготные вариации данных ПЭС по измерениям на средне- и высокоширотной цепях двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС в периоды экстремальных бурь в марте и июне 2015 г. По географическому расположению цепи приемников GPS/ГЛОНАСС хорошо совпадают с цепями ионозондов в Евразии. Но цепи приемников GPS/ГЛОНАСС охватывают не только материковую часть Евразии и Северной Америки, но и часть островов в океанах, что позволяет рассматривать глобальную пространственно-временную картину развития ионосферных возмущений вдоль широтных кругов в средних и высоких широтах.

По результатам [Черниговская и др., 2020; Chernigovskaya et al., 2021] в североамериканском секторе эффект отрицательной ионосферной бури в марте 2015 г. наблюдался гораздо дольше, чем над Евразией. Области низкой ионизации сохранялись в западном полушарии на средних и высоких широтах в течение 7–8 дней после начала бури. Над регионом Восточной, Западной Сибири и Европы в восточном полушарии по данным ПЭС уже через 3–4 сут ионизация ионосферы восстановилась после отрицательного возмущения и образовалась область повышенной ионизации на высотах F2-области ионосферы как в средних, так и в высоких широтах. Эти результаты отлично подтверждаются данными измерений высокоширотных ионозондов, которые обсуждались выше в настоящей работе (рис. 5, *а*; 6, *а*).

Рост ионизации ионосферы (параметр f_oF2) над обширным регионом Сибири и Европы 22–23 марта и 27 марта 2015 г. с превышением уровня f_oF2 для спокойных дней перед началом магнитного возмущения можно рассматривать как яркое проявление эффекта последействия магнитных бурь [Klimenko et al., 2018].

Численные расчеты с помощью модели ГСМ ТИП (Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы) [Namgaladze et al., 1988; Klimenko et al., 2018], а также статистический анализ данных среднеширотных ионозондов в Иркутске и Калининграде показали, что причиной положительных возмущений электронной концентрации в дневное время через несколько дней после начала восстановительной фазы магнитной бури может быть увеличение концентрации атомарного кислорода за счет его переноса от экваториальных широт к средним на поздней восстановительной фазе [Klimenko et al., 2018]. В свою очередь, этот перенос обусловлен дополнительным градиентом давления нейтрального газа от низких широт к высоким, возникающим в результате появления избыточной плотности нейтрального газа на низких широтах в главную фазу геомагнитной бури за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора. Значения ионизации при этом могут превышать уровень спокойных дней до начала магнитного возмущения. Авторы сравнивают возмущение [O]/[N_2], равно как и возмущение электронной концентрации, с колебаниями маятника, который переходит из отрицательной фазы в положительную в течение нескольких дней после начала фазы восстановления бури.

Июньская экстремальная магнитная буря вызвала в ионосфере высоких широт эффект сильной отрицательной ионосферной бури. Даже через десять дней после начала магнитной бури 3 июля 2015 г. уровень ионизации ионосферы был ниже среднесуточного уровня f_oF2 в спокойные дни до начала бури (черная линия на рис. 5, *б*). Эти результаты, полученные по данным измерений ионозондов высокоширотной цепи, прекрасно подтверждаются результатами анализа ПЭС по данным высокоширотной цепи двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС [Черниговская и др., 2020; Chernigovskaya et al., 2021].

Различная реакция ионосферы на геомагнитные бури, которая отмечается в настоящем исследовании, также может быть связана с разной вероятностью возникновения положительной или отрицательной фаз ионосферной бури в разные сезоны года [Burešová et al., 2007]. В летнее время года появление только отрицательного эффекта в течение всей главной и восстановительной фаз магнитной бури может быть более вероятным. Как подтверждение этого мы видим яркое проявление отрицательной ионосферной бури для события июня 2015 г. (см. рис. 5, *б*). Переход от одного типа эффектов бурь к другому более характерен для зимы, чем для лета. Причем вероятность такого поведения возрастает с уменьшением широты. Для бурь в условиях равноденствия эта связь четко не определена. В условиях равноденствия в марте 2015 г. мы наблюдаем первоначальный эффект положительной ионосферной бури в дневное время после SSC с резким переходом в отрицательную ионосферную бурю в период главной и восстановительной фаз магнитной бури (см. рис. 5, *а*) как реакцию ионосферной ионизации на интенсивное геомагнитной возмущение. Впоследствии с 22–23 марта 2015 г. электронная концентрация приобретает тенденцию к возрастанию. Отмечаются дневные максимумы f_oF2, превышающие максимальные суточные значения в спокойных условиях до начала бури, а также рост ночной ионизации (минимальные f_oF2 возрастали на 1–2 МГц).

В рамках этого исследования снова встает вопрос о продолжительности анализируемого периода ионосферной бури как отклика ионосферы на сильную магнитную бурю. Следует внести коррективы в традиционный подход к временному интервалу анализа сильных геомагнитных возмущений, когда анализ заканчивается при $Dst \geq 0$ [Chernigovskaya et al., 2021]. Результаты настоящего исследования вновь

подтверждают вывод о том, что ионосферные эффекты сильных магнитных бурь следует рассматривать во временном масштабе в течение нескольких дней после окончания магнитной бури, поскольку возмущенные активные области термосферного газа продолжают по инерции движение на запад и вызывают вариации концентрации электронов вдоль траектории распространения. В случае бури в марте 2015 г. эффекты в ионосфере, наблюдаемые с началом магнитной бури 17 марта 2015 г., все еще развивались до конца анализируемого временного периода 30 марта 2015 г., хотя *Dst* с 21 марта 2015 г. был уже выше буревого уровня ($Dst > -50$ нТл), а после 25 марта 2015 г. $Dst \geq 0$ (см. рис. 1, *а*).

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование является логическим и очень актуальным продолжением наших предыдущих исследований пространственно-временных вариаций параметров ионосферы над Евразией в регионе средних широт в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. Для комплексного исследования пространственно-временных особенностей ионосферных неоднородностей на основе данных радиофизических измерений мы добавили в анализ данные измерений цепи высокоширотных ионозондов, расположенных на севере Евразийского континента на широте северного полярного круга и более высоких широтах. По данным евразийских высокоширотных ионозондов выполнен анализ особенностей долготно-временных вариаций ионизации высокоширотной ионосферы в периоды экстремальных магнитных бурь 24-го цикла солнечной активности в марте и июне 2015 г., который позволил сформулировать следующие результаты.

1. Проведенное специальное исследование позволило заключить, что одновременное использование для анализа параметров h_mF2 и h'F2 области F2 ионосферы в условиях повышенной геомагнитной активности невозможно. Поэтому при сравнительном анализе электронной концентрации в F2-области по данным ионозондов высокоширотной цепи ионозондов мы использовали (и будем использовать в дальнейшем) только параметр f_oF2.

2. Обращают на себя внимание существенные различия в характере временных вариаций f_oF2 для анализируемых периодов магнитных бурь. Эти различия (к примеру, суточный размах вариаций f_oF2), вероятно, связаны с характерными особенностями сезонного и суточного хода фоновой высокоширотной ионосферы данного географического региона.

3. На главных и восстановительных фазах магнитных бурь наблюдались периоды блэкаутов радиосигналов ионозондов, связанных с совместным действием механизмов падения ионизации на высотах верхней ионосферы (отрицательные ионосферные бури) и аномального увеличения поглощения радиоволн на высотах нижней ионосферы в результате вторжения в ионосферу высоких широт энергичных частиц из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля в периоды магнитных возмущений.

4. В периоды экстремальных магнитных бурь в марте и июне 2015 г. в регионе высоких широт Евразии отмечены долготные различия в характере реакции ионосферы на геомагнитные возмущения. Это связано, по всей видимости, с сезонными особенностями вероятности возникновения положительной или отрицательной фазы ионосферной бури в разные сезоны года. В летнее время года мы видим яркое проявление отрицательной ионосферной бури для события июня 2015 г. В условиях равноденствия по данным измерений ионозондов в Норильске, Салехарде, Амдерме, Ловозеро, Соданкюля мы наблюдаем смену первоначального эффекта положительной ионосферной бури на сильную и продолжительную отрицательную на главной и восстановительной фазах магнитной бури как реакцию ионосферной ионизации на интенсивное геомагнитной возмущение в марте 2015 г.

5. Долготные особенности вариаций ионизации в ионосфере высоких широт над Евразией, выявленные в настоящей работе в целом подтверждают выводы о пространственно-временных вариациях ионизации в регионе средних широт в возмущенных геомагнитных условиях в марте и июне 2015 г. по данным цепи среднеширотных ионозондов и приемников GPS/ГЛОНАСС [Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021]. Подробный сравнительный анализ пространственно-временных особенностей вариаций параметров ионосферы над регионами средних и высоких широт Евразии на основе данных цепей средне- и высокоширотных ионозондов и приемников GPS/ГЛОНАСС в период экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. представлен в работе [Черниговская и др., 2024].

6. Тенденция повышения ионизации ионосферы над обширным регионом Восточной, Западной Сибири и Европы после завершения экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. по данным измерений цепи высокоширотных ионозондов может быть связана с образованием над этой территорией области повышенного [O]/[N_2]. Подобный рост ионизации ионосферы с превышением уровня значений f_oF2 для спокойных дней перед началом магнитного возмущения можно рассматривать как яркое проявление эффекта последействия магнитных бурь.

7. Результаты настоящего исследования вновь подтверждают вывод о том, что ионосферные эффекты сильных магнитных бурь следует рассматривать во временном масштабе в течение нескольких дней после окончания магнитной бури, поскольку возмущенные активные области термосферного газа продолжают по инерции движение на запад и вызывают вариации концентрации электронов вдоль траектории распространения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта РНФ № 23-27-00322.

Данные ионозонда в Соданкюля, Финляндия были получены из Центра данных по солнечно-земной физике, Великобритания (UK Solar System Data Centre [https://www.ukssdc.ac.uk]). Данные GUVI TIMED, использованные в данной работе, предоставлены при поддержке программы NASA MO&DA. Инструмент GUVI разработан и собран корпорацией Aerospace Corporation и Университетом Джонса Хопкинса

(The Aerospace Corporation and The Johns Hopkins University). Научный руководитель — Л.Дж. Пакстон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алпатов В.В., Беляев А.Н., Куницын В.Е. Методы томографии в исследованиях и мониторинге верхней атмосферы и ионосферы. *Мир измерений*. 2013, № 2. С. 31–37.

Андреева Е.С., Падохин А.М., Назаренко М.О., Туманова Ю.С., Калашникова С.А. Томографические методы исследования атмосферы и околоземного космического пространства: Современное состояние и перспективы развития. *Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн»*. Калининград. 2021. С. 86–98.

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН. 2006. С. 90–94.

Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широчков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда CADI. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 4. С. 1–10.

Деминов М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы. В сб.: *Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75*. Москва, 2015. С. 295–346.

Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. Т. 58, № 3. С. 366–373. DOI: 10.7868/S0016794018030070.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Трошичев О.А., Франк-Каменецкий А.В. ФГБУ «ААНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах. *Вестник РФФИ. Антарктида и Арктика: Полярные исследования*. 2020. № 3-4 (107-108). С. 60–78. DOI: 10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78.

Кринберг И.А., Тащилин А.В. *Ионосфера и плазмосфера*. М.: Наука, 1984. 188 с.

Мамруков А.П., Халипов В.Л., Филиппов Л.Д. и др. Геофизическая информация по наклонным радиоотражениям в высоких широтах и их классификация. *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. Вып. 111. С. 14–27.

Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. *Ионосферные процессы*. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. *Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы*. Якутск: Издат. дом СВФУ. 2017. 176 с.

Туманова Ю.С., Андреева Е.С., Нестеров И.А. Наблюдения ионосферного провала над Европой при разных уровнях геомагнитной возмущенности по данным радиотомографии. *Ученые записки физ. фак-та Московского ун-та*. 2016. № 3. 163906.

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С. и др. Долготные вариации ионосферных и геомагнитных параметров в северном полушарии во время сильных магнитных бурь 2015 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 5. С. 336–347. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347.

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Ясюкевич А.С., Хабитуев Д.С. Ионосферная долготная изменчивость в северном полушарии во время магнитных бурь по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 4. С. 269–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-269-281.

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С. и др. Исследование отклика среднеширотной ионосферы северного полушария на магнитные бури в марте 2012 года. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 4. С. 46–56. DOI: 10.12737/szf-84202204.

Черниговская М.А., Ясюкевич А.С., Хабитуев Д.С. Долготная изменчивость ионосферы северного полушария во время магнитных бурь в марте 2012 года по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 108–112. DOI: 10.12737/szf-94202313.

Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Сетов А.Г. и др. Отклик ионосферы над регионами высоких и средних широт Евразии по данным ионозондов во время экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10 (в печати).

Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М. и др. Изучение неоднородной структуры ионосферы при помощи одновременных измерений наноспутниками стандарта CubeSat. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 6. С. 443–449. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-443-449.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. *J. Space Weather Space Clim.* 2013. Vol. 3, no. A27. DOI: 10.1051/swsc/2013049.

Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 563–601.

Burešová D., Laštovička J., De Franceschi G. *Manifestation of Strong Geomagnetic Storms in the Ionosphere above Europe. Space Weather*. J. Lilensten (ed.), Springer. 2007. P. 185–202.

Cherniak I., Krankowski A., Zakharenkova I. Observation of the ionospheric irregularities over the Northern Hemisphere: Methodology and service. *Radio Sci*. 2014. Vol. 49, no. 8. P. 653–662. DOI: 10.1002/2014RS005433.

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., et al. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations. *Adv. Space Res.* 2021. Vol. 67, no. 2. P. 762–776. DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.028.

Enell C.-F., Kozlovsky A., Turunen T., et al. Comparison between manual scaling and Autoscala automatic scaling applied to Sodankylä Geophysical Observatory ionograms. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. 2016. No. 5. P. 53–64. DOI: 10.5194/gi-5-53-2016.

Huang X., Reinisch B.W. Vertical electron density profiles from digisonde ionograms. The average representative profile. *Ann. Geofis*. 1996. Vol. XXXIX, no. 4. P. 751–756.

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. *The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation*. Cambridge University Press, New York, 2003. 617 p.

Jakowski N. Radio occultation techniques for probing the ionosphere. *Radio Sci. Bull.* 2005. No 314. P. 4–15.

Karpachev A.T. Dynamics of main and ring ionospheric troughs at the recovery phase of storms/substorms. *J. Geophys. Res*. 2021. Vol. 126, iss. 1. e2020JA028079. DOI: 10.1029/2020JA028079.

Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position. *Adv. Space Res.* 2019. Vol. 63, iss. 2. P. 950–966. DOI: 10.1016/j.asr.2018.09.038.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., et al. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015. *J. Atmos. Sollar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 180. P. 78–92. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.017.

Kozlovsky A., Turunen T., Ulich T. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auroral ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 5265–5276.

Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., et al. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites. *GPS Solutions*. 2016. Vol. 20. P. 877–884. DOI: 10.1007/s10291-015-0500-2.

Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res*. 1997. Vol. 102, no. A7. P. 14,209–14,213.

MacDougall J.W., Grant I.F., Shen X. The Canadian advanced digital ionosonde: design and results. *WDC A for Solar-Terrestrial Physics*, Report UAG-104, Boulder, Colorado, USA, 1995. P. 21–27.

Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 1959. Vol. 64, no. 3. P. 305–321. DOI: 10.1029/JZ064i003p00305.

Mikhailov A.V. Ionospheric F2-layer storms. *Física de la Tierra*. 2000. Vol. 12. P. 223–262.

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Pure and Applied Geophysics*. 1988. Vol. 127, no. 2-3. P. 219–254.

Perevalova N.P., Romanova E.B., Tashchilin A.V. Detection of high-latitude ionospheric structures using GNSS. *J. Atmos. Solar-Terr Phys*. 2020. Vol. 207. 105335. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105335.

Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Regular features of the polar ionosphere characteristics from digisonde measurements over Norilsk. *Adv. Space Res*. 2013. Vol. 51, iss. 4. P. 545–553. DOI: 10.1016/j.asr.2011.09.026.

Themens D.R., Jayachandran P.T., Galkin I., Hall C. The Empirical Canadian High Arctic Ionospheric Model (E-CHAIM): N_mF2 and h_mF2. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, iss. 8. P. 9015–9031. DOI: 10.1002/2017JA024398.

Troshichev O.A., Sormakov D.A. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere: 3. Development of magnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr Phys*. 2018. Vol. 180. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.012.

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp (дата обращения 20 декабря 2023 г.).

URL: https://www.ngdc.noaa.gov (дата обращения 15 января 2024 г.).

URL: https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation (дата обращения 15 января 2024 г.).

URL: www.solen.info/solar/old_reports (дата обращения 20 декабря 2023 г.).

URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html (дата обращения 20 декабря 2023 г.).

URL: http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_PC_ind.ru.html (дата обращения 20 декабря 2023 г.).

URL: https://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/iono_menu.html (дата обращения 20 декабря 2023 г.).

URL: http://icenter.izmiran.ru/f-h_db.php (дата обращения 20 декабря 2023 г.).

URL: http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-galleryl3on2 (дата обращения 5 февраля 2024 г.).

URL: https://www.ukssdc.ac.uk (дата обращения 20 декабря 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Черниговская М.А., Сетов А.Г., Ратовский К.Г., Калишин А.С., Степанов А.Е. Изменчивость ионизации ионосферы над Евразией по данным цепи высокоширотных ионозондов во время экстремальных магнитных бурь 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 38–52. DOI: 10.12737/szf-102202404.