

КОМПЛЕКС РАДИОФИЗИЧЕСКИХ, ГЕОМАГНИТНЫХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ КАЛИНИНГРАДСКОГО ФИЛИАЛА ИЗМИРАН

© 2020 г. О. П. Борчевкина^{1,2*}, Н. А. Коренькова¹, В. С. Лещенко¹, М. В. Клименко¹,
И. В. Карпов^{1,2}, А. В. Радиевский¹, Ф. С. Бессараб^{1,2}, В. И. Власов¹,
Д. С. Котова¹, И. А. Носиков¹, М. И. Карпов^{1,2}, В. Л. Лисина¹,
И. И. Шагмуратов¹, И. И. Ефишов¹, Г. А. Якимова¹

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Калининград, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

*E-mail: olgaborchevkina@gmail.com

Поступила в редакцию 07.05.2020;

после доработки 07.05.2020;

принята в печать 20.05.2020

В Калининградском филиале ИЗМИРАН с 1964 года ведутся регулярные наблюдения за параметрами нижней атмосферы, ионосферы и вариациями магнитного поля Земли. Основу измерительного комплекса, расположенного в пос. Ульяновка Калининградской области (54° с.ш., 20° в.д.) составляют: ионозонд вертикального зондирования ионосферы; двухчастотные приемники систем GPS/ГЛОНАСС, которые используются для определения полного электронного содержания в ионосфере; магнитовариационные станции, предназначенные для непрерывной регистрации вариаций трех компонент вектора магнитного поля Земли и расчета локального K -индекса; метеостанция. Проведение одновременных наблюдений вариаций магнитного поля, ионосферных и метеорологических параметров в одной обсерватории предоставляет широкие возможности для исследования атмосферно-ионосферных связей. В статье дано краткое описание всех инструментов, приведен способ передачи и хранения временных рядов измеряемых параметров, а также представлены примеры использования этих данных для проведения различных геофизических исследований.

Ключевые слова: метеорологическое возмущение, ионосфера, полное электронное содержание, акустико-гравитационные волны, вертикальное зондирование, глобальные навигационные спутниковые системы, GPS, ГЛОНАСС.

DOI: 10.31857/S0207401X20100039

1. ВВЕДЕНИЕ

Важность изучения атмосферно-ионосферных связей определяется как фундаментальными проблемами физики атмосферы, связанными с пониманием процессов, определяющих взаимовлияние различных слоев атмосферы, так и широким кругом прикладных задач, связанных с обеспечением надежного функционирования систем радиосвязи, навигации, функционирования объектов космической инфраструктуры, а также с влиянием динамики атмосферы и ионосферы на экологические системы. К настоящему времени известны наиболее важные факторы, определяющие планетарную структуру и изменчивость ионосферы на временных масштабах не менее суток. В то же время современные требования к практическим работам предполагают необходимость знания особенностей

локальной динамики среды на меньших временных масштабах, а также проведение фундаментальных исследований с целью изучения физических процессов, определяющих изменчивость параметров в системе атмосфера–ионосфера.

Состояние и изменчивость ионосферы зависят главным образом от солнечной и геомагнитной активности, а также от динамических процессов, развивающихся в различных слоях атмосферы, в частности от метеорологических процессов. С целью разделения вкладов различных возмущающих факторов обычно оценивают ионосферную изменчивость во время спокойных и возмущенных геомагнитных периодов [1, 2]. Кроме того, при анализе вариаций ионосферных параметров следует учитывать сезонные [3] и многолетние

вариации геомагнитной и солнечной активности [4].

В настоящее время большинство авторов дают близкие оценки вкладов метеорологической и геомагнитной активности в вариативность F2-области дневной среднеширотной ионосферы (~13–15% для электронной концентрации) [1–5]. Тем не менее, полное понимание роли вкладов геомагнитной и атмосферной активности в итоговое ионосферное возмущение пока отсутствует. Так, в работе [6] подчеркивается доминирующая роль относительно небольших геомагнитных вариаций по сравнению с ролью внезапным стратосферным потеплением 2009 г., тогда как в работе [7] ионосферный отклик от этого же события сравним с эффектами экстремальной геомагнитной бури.

Во время масштабных метеорологических событий на средних широтах в спокойных гелиогеофизических условиях, когда воздействие на ионосферу сверху минимально, отмечается изменение параметров нейтральной атмосферы и ионосферы на 20% и более [8–10]. Ионосферные возмущения возникают достаточно быстро — спустя несколько часов после начала метеорологического возмущения, что указывает на волновую природу процессов, связывающих явления в различных слоях атмосферы. Наиболее вероятными переносчиками энергии из области возмущений в нижней атмосфере до высот ионосферы являются акустико-гравитационные волны (АГВ), которые могут изменять локальную электронную плотность посредством ион-нейтральных столкновений, приводя к возникновению ионосферных возмущений [11–13].

Однако в большинстве случаев ионосферные возмущения возникают в условиях изменений нескольких факторов, определяющих состояние среды, что существенно затрудняет оценку их относительных вкладов. В настоящее время существует довольно большое число геофизических обсерваторий по всему миру, изучающих процессы в нижней и верхней атмосфере. Наиболее известными обсерваториями, на основании работ которых накоплен огромный экспериментальный материал, являются: Jicamarca (Перу), Arecibo (Пуэрто-Рико), Millstone Hill (США) [14]. Исследование атмосферы и ионосферы различными оптическими и радиофизическими методами позволяет получать наиболее полную информацию о процессах в нижней и верхней атмосфере, представляющих как фундаментальный, так и прикладной интерес. В России наиболее широкими возможностями для изучения атмосферно-ионосферного взаимодействия с помощью собственных инструментов, осуществляющих постоянный мо-

нитинг нижних и верхних слоев атмосферы обладают следующие институты: ИЗМИРАН, ПГИ (Полярный геофизический институт), ААНИИ (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт) и ИСЗФ СО РАН (Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук). Следует отметить, что инструментальный комплекс, расположенный в обсерваториях ИСЗФ СО РАН, представляет собой ряд установок нового поколения, достигающих и опережающих мировой уровень, которые создают возможности получения уникальных данных по солнечной активности и ее проявлениям в околоземном космическом пространстве. Наряду с описанными выше обсерваториями, не столь масштабная обсерватория Калининградского филиала (КФ) ИЗМИРАН обладает достаточно широкими возможностями для изучения магнитосферно-ионосферных и атмосферно-ионосферных связей.

Проведение одновременных наблюдений за изменениями магнитного поля, ионосферными и метеорологическими параметрами в рамках одной обсерватории предоставляет широкие возможности для исследования атмосферно-ионосферных и магнитосферно-ионосферных связей. Географическое положение Калининградской области придает огромное прикладное значение задаче мониторинга и прогноза состояния ионосферы в регионе, в котором в настоящий момент активно разворачиваются радиотехнические средства различного назначения. В представленной статье приводится краткое описание различных инструментов, используемых в обсерватории КФ ИЗМИРАН для мониторинга состояния атмосферы и ионосферы, а также даны примеры использования этих инструментов для решения прикладных и фундаментальных задач.

2. ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА ИНСТРУМЕНТОВ КФ ИЗМИРАН

2.1. Радиофизические наблюдения (GPS и ионозонд)

Основным методом радиофизических исследований состояния ионосферы является радиочастотное зондирование. Скоординированное использование установок вертикального зондирования ионосферы началось в международный геофизический год более 60 лет назад, а в обсерватории КФ ИЗМИРАН — с 1964 г. Метод вертикального зондирования долгое время был единственным методом, позволяющим исследовать вертикальную структуру ионосферы. С начала применения этого метода накоплен основной массив информации о поведении электронной концентрации на высотах областей E ($h \sim 90$ –140 км) и F1 ($h \sim 140$ –200 км) вплоть до максимума слоя F2 ($h_m \sim 220$ –400 км). Регулярные измерения ионозонда в КФ ИЗМИРАН

осуществляются с временным интервалом в 15 мин [15]. В ходе систематической ручной обработки ионограмм определяются основные характеристики ионосферных слоев согласно руководству URSI (Union of Radio Science, International), рассчитываются суточные вариации критической частоты слоя F2 и других характеристик ионосферы. Архив обработанных ионограмм за период 1964–2020 гг. используется для анализа как регулярной изменчивости ионосферы, так и ее поведения во время возмущений различного характера. В разные годы в обсерватории КФ ИЗМИРАН использовались различные ионозонды: “Базис” (1964–1992 гг.), “АИС” (1992–2005 гг.), “Парус-А” (2007–2020 гг.).

В последние десятилетия технологии, основанные на приеме и анализе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС, находят все большее применение для исследования атмосферы Земли, включая тропосферу, ионосферу и плазмосферу [16]. Достоинства этих методов определяются высоким пространственным и временным разрешением. В наблюдениях определяется ионосферный параметр — полное электронное содержание (total electron content (TEC)), методики выделения которого и особенности применения для анализа приводятся в работах [17–19]. В обсерватории КФ ИЗМИРАН (код KL154 согласно URSI) на постоянной основе работают два двухчастотных приемника ГНСС-сигналов: Leica 1220 и Javad Maxtor, с помощью которых определяются значения наклонного TEC (трасса от спутника до станции приема сигналов). Разработанные в КФ ИЗМИРАН методики обработки сигналов ГНСС позволяют вычислять величины вертикального TEC над станцией [16].

Кроме того, в обсерватории КФ ИЗМИРАН разработаны методики использования данных нескольких тысяч наземных ГНСС-станций, размещенных во всех частях земной суши. Наличие мировой сети станций GPS/ГЛОНАСС обеспечивает мониторинг ионосферы в планетарном масштабе. В России существует несколько центров, осуществляющих обработку и анализ поведения TEC как в региональном, так и в глобальном масштабах, среди которых можно отметить ИСЗФ СО РАН [20] и КФ ИЗМИРАН [21].

2.2. Вариации магнитного поля

В магнитной обсерватории КФ ИЗМИРАН с 1964 г. проводятся регулярные, непрерывные наблюдения за изменениями геомагнитного поля Земли. В различные периоды использовались магнитометр Боброва (1964–2005 гг.) и протонный магнитометр ММП-Ф203 абсолютного измерения поля (2005–2017 гг.), а с 2012 года используется

цифровая трехкомпонентная магнитовариационная станция, разработанная в ИЗМИРАН. Результаты измерений в реальном времени передаются в центр геофизических данных ИЗМИРАН. Дополнительно осуществляется непрерывная фоторегистрация магнитометрических данных. Программа регулярных геомагнитных наблюдений, осуществляемых сотрудниками обсерватории, включает в себя также регулярные измерения абсолютных значений параметров геомагнитного поля.

2.3. Метеорологические наблюдения

В обсерватории КФ ИЗМИРАН проводятся обсервационные наблюдения за состоянием тропосферы. Метеорологическая станция М-49М предназначена для измерения скорости и направления ветра, атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Временное разрешение наблюдений — 1 мин. Такое временное разрешение данных позволяет проводить анализ волновой активности в периоды опасных метеорологических явлений в Калининградской области и влияния генерации и распространения атмосферных волн из области метеорологических возмущений в среднюю и верхнюю атмосферу. Специализированный программный комплекс метеостанции обеспечивает графическое отображение и сохранение измеренных метеорологических параметров. На рис. 1 представлены результаты атмосферных наблюдений 18–29 октября 2018 года, включающий прохождение метеорологического возмущения в Калининграде. Анализ влияния данного метеорологического возмущения на верхнюю атмосферу и ионосферу представлен в работе [22]. Архив метеорологических наблюдений с февраля 2017 г. доступен на сервере КФ ИЗМИРАН по запросу.

2.4. Лидарные наблюдения

В настоящее время широкое распространение в исследованиях динамики нижней атмосферы получили методы зондирования с применением лидаров [23]. Лидарные наблюдения позволяют существенно увеличить объем информации о характеристиках волновых процессов в тропосфере [24]. Метод позволяет с высоким временным разрешением (порядка 1 мин) определять частотные характеристики атмосферных возмущений во всей области лидарного зондирования.

В КФ ИЗМИРАН в сотрудничестве с Балтийским федеральным университетом проводятся скоординированные лидарные наблюдения нижней атмосферы с применением двухволнового атмосферного лидара ЛСА-2С производства ООО “Обнинская фотоника”. Основная цель этих на-

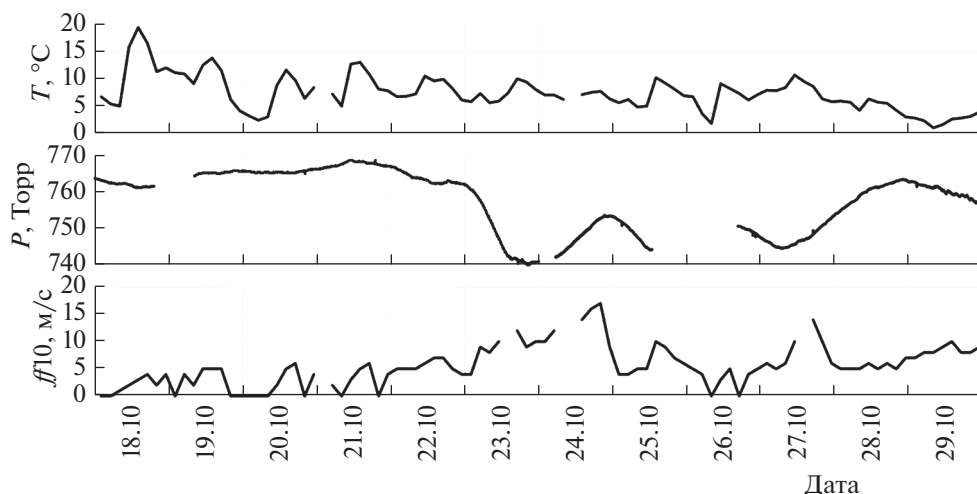


Рис. 1. Наблюдения атмосферных параметров (температура воздуха, скорость порывов ветра на высоте 10 м (параметр $ff10$) и атмосферного давления) на ст. Калининград метеорологической станции с 1-минутным разрешением 18–29 октября 2018 г.

блюдений состоит в изучении динамического режима в нижней атмосфере. В исследованиях динамики ионосферы выявлены возмущения, возникающие в периоды прохождения метеорологических штормов, тайфунов, усиления сейсмической активности. Ионосферные возмущения, вызванные такими событиями, весьма разнообразны и проявляются в виде перемещающихся ионосферных возмущений и оптических эмиссий.

Физические процессы, связывающие явления в нижней атмосфере и ионосфере, до настоящего времени недостаточно изучены. Во многом это связано с недостатком экспериментальных данных о возмущениях параметров тропосферы в условиях развития мощных динамических процессов. Климатической особенностью Калининградского региона является достаточно частое возникновение штормовых метеорологических условий в осенне-зимний период, что позволяет, используя аппаратуру КФ ИЗМИРАН, проводить наблюдения атмосферных и ионосферных параметров в различных высотных областях.

Результаты лидарных наблюдений характеристик аэрозоля в такие периоды позволяют определить компоненты ветра в тропосферном слое, частотный и пространственный спектр динамических процессов. В комплексе с другими приборами обсерватории исследуются частотные характеристики атмосферных вариаций на различных высотах — от тропосферы до ионосферы. Такие исследования важны для изучения спектральных характеристик возмущений параметров среды в различных высотных атмосферных слоях.

3. АТМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПЕРИОДЫ ЛОКАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

В исследованиях влияния динамических процессов в нижней атмосфере на состояние и изменчивость верхней атмосферы и ионосферы большое внимание уделяется изучению характеристик волн, возникающих в условиях сильных метеорологических возмущений. Для исследования метеорологических возмущений анализируются приземное давление и скорость порывов ветра (рис. 2), а также результаты лидарных наблюдений. На рис. 3 представлены результаты вейвлет-анализа вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на высоте 10 км в наблюдениях, выполненных 1 апреля 2016 года в период прохождения метеорологического шторма. После 15.30 местного времени наблюдается усиление интенсивности вариаций лидарного сигнала с периодами менее 6 мин. Волны такого спектрального диапазона называют акустико-гравитационными. Эти волны, распространяясь из нижних слоев, достигают высот ионосферы и влияют на динамику ионосферы и верхней атмосферы. Сильные метеорологические возмущения являются важным источником генерации АГВ в нижней атмосфере [25, 26].

С целью выделения высокочастотных составляющих вариаций ионосферы, по наблюдениям ТЕС определялся спектр вариаций дифференциального ТЕС, определяемого как отношение разности значений ТЕС на трассе «спутник — станция приема сигналов», полученных в двух последовательных наблюдениях, к шагу по времени. Для исследования

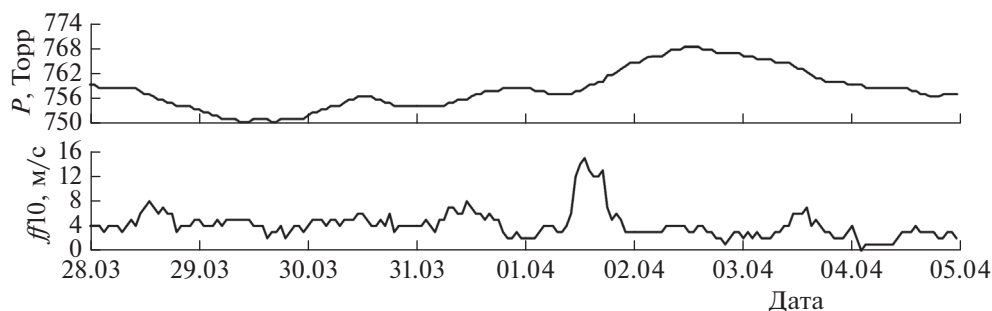


Рис. 2. Измерения атмосферного давления P и максимальных порывов ветра (параметр $ff10$) 28 марта – 4 апреля 2016 года в Калининграде.

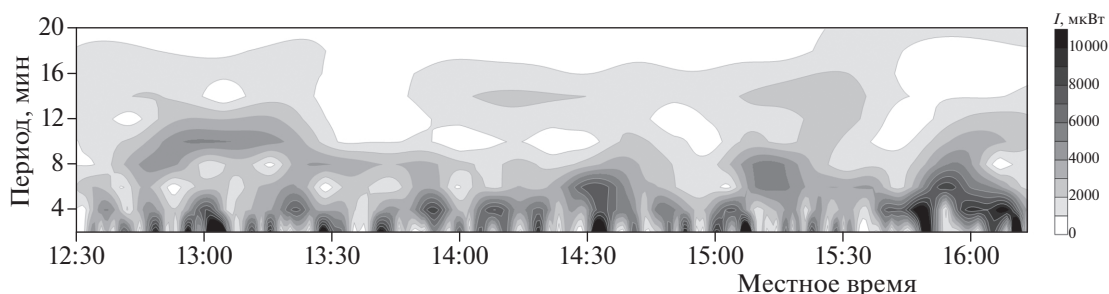


Рис. 3. Вейвлет-анализ вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на высоте 10 км 1 апреля 2016 года на длине волны 1064 нм.

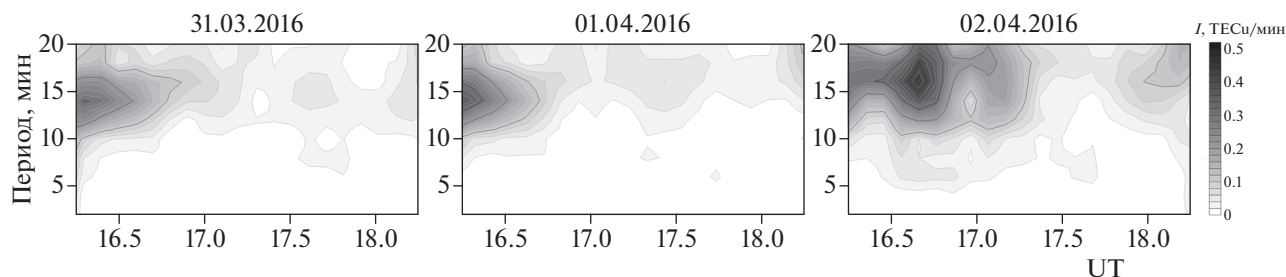


Рис. 4. Вейвлет-анализ вариаций ТЕС на станции Калининград 31 марта – 2 апреля 2016 г.

спектров вариаций ТЕС в период наблюдений применялось вейвлет-преобразование.

Алгоритм сбора и обработки данных наблюдений для определения частотных характеристик вариаций ТЕС включал следующие ключевые пункты: 1) отбор спутников, период наблюдения сигналов которых приходится на время метеорологического шторма; 2) сбор данных о вариациях ТЕС, времени пролета спутника и траектории его движения; 3) вычисление дифференциального ТЕС; 4) расчет изменений спектра вариаций дифференциального ТЕС в период наблюдения спутника.

Для исследования частотных характеристик вариаций ТЕС в период метеорологического возмущения рассмотрены наблюдения на ст. Калининград (54° N , 20° E) 1 апреля 2016 года. На рис. 4 показаны изменяющиеся спектры вариаций ТЕС с периодами 2–20 мин 31 марта – 2 апреля 2016 г., определенные по наблюдениям спутников GPS во время метеорологического возмущения 1 апреля. Как видно из этого рисунка, во все рассмотренные дни отмечаются вариации с периодами 10–20 мин. Второго апреля в спектре вариаций ТЕС отмечается повышение амплитуд гармоник с периодами 12–16 мин (внутренние гравитацион-

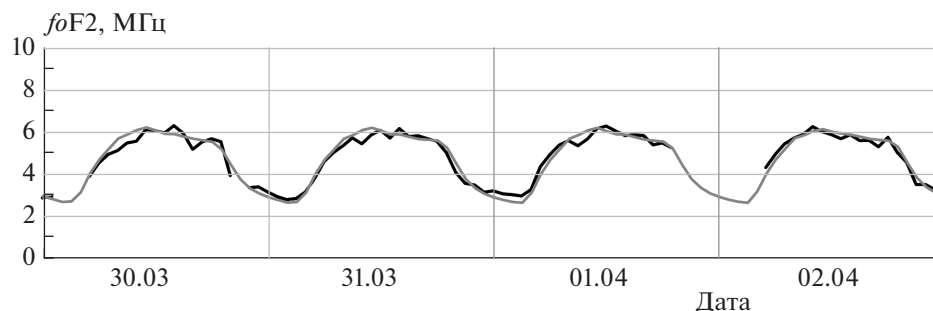


Рис. 5. Вариации критической частоты F2-слоя 31 марта — 2 апреля на 2016 г. ст. Калининград. Серой линией показаны медийные значения f_oF2 .

ные волны (ВГВ)), а также появление вариаций с периодами ~ 6 мин (АГВ).

На основе теоретических исследований и данных наблюдений можно предположить, что наблюдаемые изменения значений ТЕС в периоды метеорологических штормов обусловлены процессами формирования локальных областей нагрева термосферы вследствие диссипации АГВ, проникающих в верхнюю атмосферу из тропосферы во время метеорологического возмущения [26]. Изменчивость нижней атмосферы, в частности, под действием метеорологических процессов, может приводить к наблюдаемой нерегулярной структуре вариаций ионосферы и всплескам волновой активности в диапазоне от 2 до 20 мин. Таким образом, наблюдения изменения параметров тропосферы и ионосферы выявляют характеристики вариаций параметров АГВ и ВГВ в периоды метеорологической активности в Калининграде.

Для анализа отклика ионосферы на метеорологические возмущения использовались почасовые измерения критической частоты F2-слоя ионосферы (f_oF2 , МГц), характеризующей максимум в вертикальном профиле электронной концентрации, по данным ионозонда “Парус-А” в КФ ИЗМИРАН [15, 27]. На рис. 5 представлены вариации f_oF2 и ее отклонения относительно скользящей медианы, центрированной на день рассматриваемого дня, с окном в 13 сут до и после рассматриваемого периода 30 марта—2 апреля 2016 года (серая линия на рис. 5). В рассматриваемый период не наблюдается существенных изменений в вариациях f_oF2 , однако 1 апреля после 16.00 отмечается возникновение таких явлений, как F-рассеяние и поглощение в D-области, что существенно влияет на определение частотных характеристик вариаций параметров F-области ионосферы [28].

Существующий инструментальный комплекс КФ ИЗМИРАН позволяет эффективно исследовать динамику атмосферы и ионосферы в периоды как магнитосферных, так и тропосферных штормов.

Создание и использование базы данных метеорологических возмущений совместно с анализом измерений ТЕС позволяют исследовать особенности динамики ионосферы в периоды метеорологических возмущений.

Разработанный в КФ ИЗМИРАН программный комплекс осуществляет сбор и обработку данных, а также построение ТЕС не только над Калининградом, но и над Европой и другими регионами [29, 30]. В качестве входных данных комплекс использует двухчастотные наблюдения GPS/ГЛОНАСС в формате RINEX.

Благодаря таким наблюдениям в последние годы удалось освоить технологию создания планетарных карт ТЕС и существенно расширить физические представления о структуре и динамике ионосферы. При формировании карт ТЕС используются данные одновременных фазовых наблюдений более чем двух сотен GPS-станций. Карты ТЕС имеют временное разрешение 5 мин. Пространственное разрешение карт составляет 1° по широте и 1° по долготе, что позволяет детально исследовать структуру и динамику ионосферы во время различных геофизических событий. На рис. 6 представлены почасовые карты ТЕС над Европейским регионом во время метеорологического возмущения 29—30 марта 2015 года. Во время метеорологического возмущения явно наблюдается уменьшение ТЕС в дневные часы во время прохождения шторма над исследуемой областью. Карты ТЕС доступны на сервере <http://data.wdizmiran.ru:8080>.

Надо отметить, что периоды обращения навигационных спутников практически кратны суткам. Это означает, что один и тот же спутник будет наблюдаться на станции приема в одни и те же моменты местного времени. Длительность наблюдений сигналов отдельных спутников, как правило, составляет более одного часа, что дает возможность выделить вариации ионосферы с периодами АГВ. Эти обстоятельства позволяют исследовать особенности ионосферных вариаций.

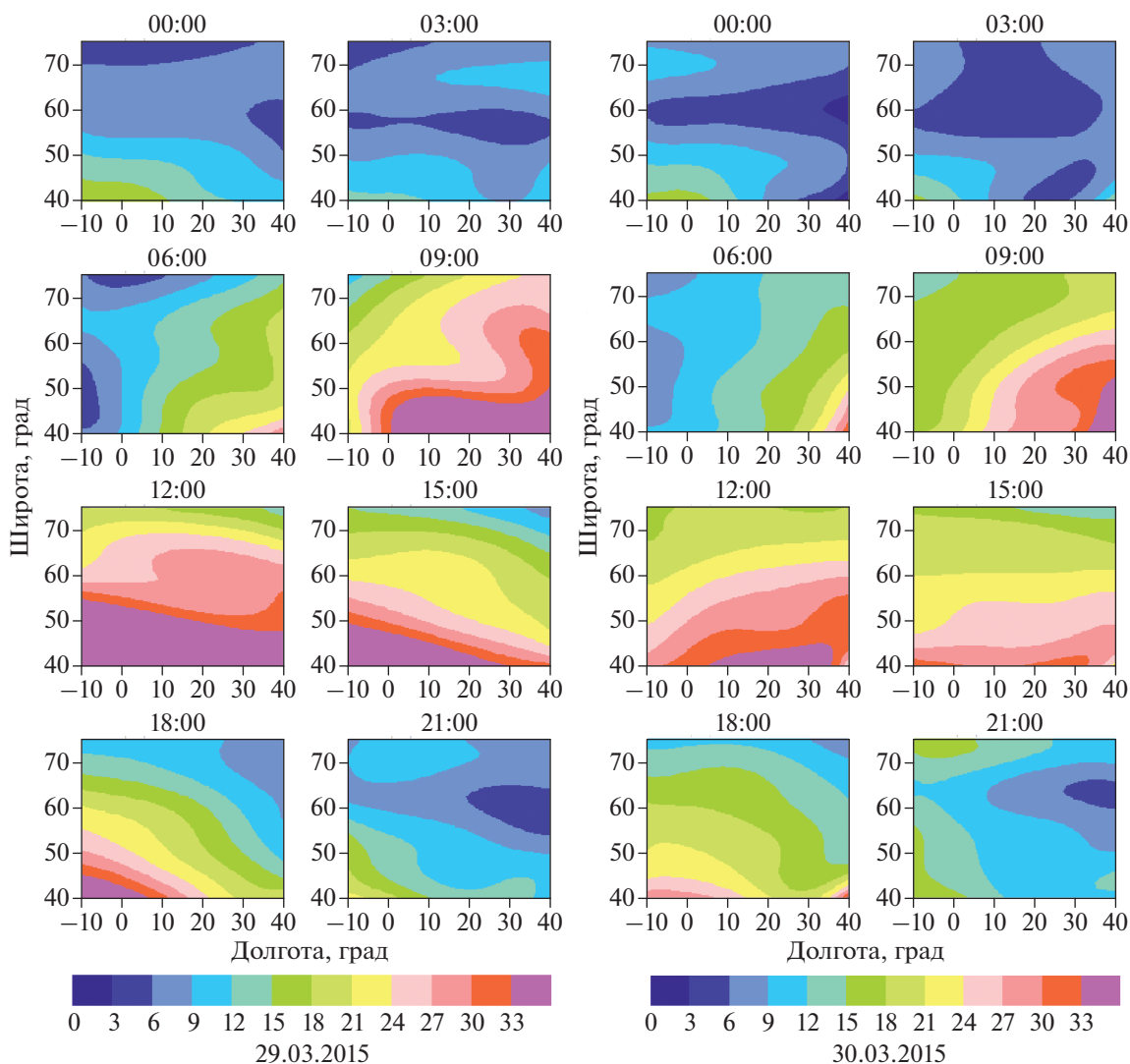


Рис. 6. Карты ТЕС над Европейским регионом во время метеорологического возмущения 29–30 марта 2015 г.

ций, наблюдаемых в течение нескольких дней в одни и те же периоды местного времени, и выделять возмущения, обусловленные изменениями геофизической обстановки [31].

4. СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ С ИЗМЕНЕНИЯМИ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

На основе данных, полученных с помощью калининградского ионозонда, неоднократно исследовалась связь между электронной концентрацией в максимуме F2-слоя и солнечной и геомагнитной активностью [32, 33]. Данные магнитно-ионосферной обсерватории за период 2008–2015 гг. использовались для создания локальной модели электронной концентрации в максимуме F2-слоя

ионосферы, $N_m F2$. В модели для каждого месяца рассчитываются суточные (среднемесячные) вариации $N_m F2$ в зависимости от солнечной и геомагнитной активности. В качестве индекса солнечной активности использовался индекс $F_{10.7}$, усредненный за 27 сут. Для описания зависимости $N_m F2$ от геомагнитной активности использовался среднесуточный, усредненный за 27 сут, индекс A_p . Для построения модели были получены 27-дневные медианные (центрированные на 22-е число каждого месяца) суточные вариации $N_m F2$ для 12 месяцев каждого года за период 2008–2015 гг. Для создания локальной модели $N_m F2$ для каждого часа локального времени (LT) и каждого месяца на основании полученных значений $N_m F2$ и $F_{10.7}$ методом наименьших квадратов рассчитывались коэффициенты линейной регрес-

Таблица 1. Среднеквадратические ошибки модели IRI-plas в определении значений f_oF_2 над среднеширотной станцией Калининград для разных месяцев с августа 2017 по август 2018 в спокойных условиях (верхняя часть таблицы) и в геомагнитно-возмущенных условиях (нижняя часть таблицы)

Период	Без коррекции	С коррекцией
08.2017	0.41	0.33
09.2017	0.46	0.39
10.2017	0.54	0.55
11.2017	0.53	0.53
12.2017	0.38	1.00
01.2018	0.44	1.47
02.2018	0.50	0.49
03.2018	0.46	0.46
04.2018	0.39	0.39
05.2018	0.49	0.41
06.2018	0.31	0.28
07.2018	0.30	0.28
Дни магнитных возмущений		
31.08.2017	0.63	0.39
7.09–10.09.2017	0.80	0.62
27.09–28.09.2017		

сии, определяющие зависимость значений N_mF_2 от солнечной активности. Кроме того, на основании тех же данных и значений усредненного индекса A_p методом наименьших квадратов были получены коэффициенты двойной линейной регрессии, определяющие зависимость N_mF_2 от солнечной и геомагнитной активности. Для выбранных зависимостей было рассчитано среднеквадратичное отклонение данных наблюдений от результатов линейной регрессии. В онлайн-версии локальной эмпирической модели N_mF_2 над Калининградом, размещенной на сайте ИЗМИРАН (<https://www.izmiran.ru/ionosphere/nmf2-klgd/>), пользователь имеет возможность учитывать или не учитывать зависимость N_mF_2 от геомагнитной активности. Для получения интересующего пользователя результата он должен выбрать номер месяца от 1 до 12 и задать значения индексов солнечной и геомагнитной активности, усредненные за интересующий пользователя день и 26 предыдущих дней. Локальная модель рассчитывает значения N_mF_2 для выбранного часа LT или для каждого часа LT выбранного дня и значения среднеквадратичного отклонения.

5. КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ГНСС-ПРИЕМНИКОВ

На основе годового массива данных наблюдений ГНСС-приемника и ионозонда (с 01.08.2017 по 01.08.2018) было проведено тестирование методики коррекции эмпирической модели ионосферы по данным наземных приемников сигналов ГНСС на станции Калининград. Для проведения исследования в основу был взят метод коррекции, предложенный в работе [34]. В настоящем исследовании в отличие от [34], где использовалась модель IRI-2007, используется модель IRI-Plas [35]. Метод коррекции параметров модели ионосферы основан на минимизации суммы квадратов невязок между измеренным и модельным значением ТЕС для каждого наблюдаемого спутника. Изменяемым параметром моделей является индекс, отражающий солнечную активность, — сглаженное число солнечных пятен R_z12 . Использовались данные спутников с углом места от 45 до 90 град во всем азимутальном секторе.

Эффективность коррекции оценивалась путем сравнения данных f_oF_2 , измеренных ионозондом и полученных после коррекции модели. В табл. 1 приведены среднеквадратические отклонения (СКО) f_oF_2 , вычисленные по модели IRI-plas с учетом и без учета коррекции. Следует отметить очевидную сезонную зависимость эффективности коррекции модели для определения f_oF_2 , которая наиболее эффективна в равноденствие и в летнее солнцестояние. В зимнее солнцестояние коррекция модели по данным ГНСС-приемников приводит к значительному увеличению СКО по сравнению с результатами, полученными по модели без коррекции. Этот результат подтверждает выводы, сделанные ранее по той же методике для четырех выбранных дней 2014 г. [36, 37]. Впервые показано, что во время геомагнитных возмущений методика коррекции модели IRI-plas по данным ГНСС-приемников лучше, чем для спокойных условий.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе показаны широкие возможности использования данных наблюдений магнитно-ионосферной обсерватории в пос. Ульяновка (25 км от Калининграда) для решения различных прикладных и фундаментальных задач в области радиотехнических систем связи и обнаружения объектов, мониторинга космической погоды в регионе, а также комплексного исследования атмосферно-ионосферного взаимодействия.

Исследование вариаций параметров атмосферы и ионосферы в периоды метеорологических

возмущений в Калининградской области выявили существенные изменения состояния ионосферы в отсутствие геомагнитных возмущений, проявляющиеся в усилении вариаций параметров с периодами, составляющими 2–8 мин в тропосфере по данным лидарного зондирования и 12–16 мин в верхней атмосфере по данным спутникового зондирования. Быстрые изменения метеорологической обстановки в условиях шторма создают благоприятные условия для возбуждения АГВ в широком диапазоне периодов. Распространение АГВ в верхнюю атмосферу и их диссипация вызывают в течение нескольких часов после начала метеорологического шторма наблюдаемые возмущения ионосферы.

В период метеорологического возмущения 1 апреля 2016 года отмечается возникновение таких явлений, как F-рассеяние и поглощение в D-области по данным вертикального зондирования ионосферы. Анализ карт полного электронного содержания над европейским регионом демонстрирует уменьшение значений ТЕС в период прохождения метеорологических штормов 29–30 марта 2015 года по сравнению с метеорологически спокойными днями.

Данные магнитно-ионосферной обсерватории были использованы для создания локальной эмпирической модели электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы над Калининградом. Онлайн-версия этой модели размещена на сайте ИЗМИРАН. Тестирование методики коррекции эмпирической модели ионосферы по данным наземных приемников сигналов ГНСС, выполненное на основе годового массива данных наблюдений на станции Калининград, подтверждает наличие сезонной зависимости эффективности коррекции модели для определения f_oF_2 . Коррекция модели наиболее эффективна в равноденствие и в летнее солнцестояние. В зимнее солнцестояние коррекция модели по данным ГНСС-приемников приводит к ухудшению модельного описания f_oF_2 по сравнению с результатами модели без коррекции. Показано, что методика коррекции модели IRI-Plas по данным ГНСС приемников эффективней работает во время геомагнитных возмущений по сравнению со спокойными условиями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 19-45-393002 (М.И. Карпов — обработка и анализ данных наблюдений вертикального зондирования и спутниковых данных), № 19-45-390005 (О.П. Борчевкина — обработка, анализ и интерпретация данных лидарного и спутникового зондирования), Правительства Калининградской области, и гранта

Российского научного фонда № 17-77-20009 (М.В. Клименко, Д.С. Котова, И.А. Носиков — коррекция моделей ионосферы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2000. V. 62. № 8. P. 685.
2. Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. // Radio Sci. 2005. V. 40. P. RS5009.
3. Rishbeth H., Mendillo M. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2001. V. 63. № 15. P. 1661.
4. Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. // Adv. Space Res. 2015. V. 55. № 8. P. 2041.
5. Martinis C.R., Manzano J.R. // Ann. Geoph. 1999. V. 42. № 1. P. 1.
6. Fuller-Rowell T., Akmaev R., Wu F. et al. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. L18104.
7. Pedatella N.M. // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 9383.
8. Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. // Совр. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 264.
9. Борчевкина О.П., Карпов И.В. // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 5. С. 670.
10. Карпов И.В., Карпов М.И., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 39. № 7. С. 79.
11. Yigit E., Medvedev A.S. // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 983.
12. Plougonven R., Zhang F. // Rev. Geoph. 2014. V. 52. № 1. P. 33.
13. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. и др. // Хим. физ. 2016. Т. 35. № 1. С. 49.
14. Медведев А.В. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск: ИСЗФ, 2014.
15. Гвишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н. и др. // Гелиогеофиз. исслед. 2013. Вып. 4. С. 68.
16. Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Якимова Г.А. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 9. С. 81.
17. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Войсков С.В. и др. // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 18. С. 24.
18. Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Voeikov S.V. // Adv. Space Res. 2008. V. 41. P. 1459.
19. Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitzina N.J. // Artificial satellites — J. Planetary Geodesy. 1997. V. 32. № 1. P. 49.
20. Yasyukevich Y.V., Kiselev A.V., Zhivetiev I.V. et al. // GPS Solut. 2020. V. 24. P. 69.
21. Борчевкина О.П., Карпов И.В., Карпов М.И. и др. // Радиотехника. 2020. Т. 2. № 4. С. 37.
22. Mitchell N.J., Thomas L., Prichard I.T. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1994. V. 56. № 8. P. 939.
23. Борчевкина О.П., Адамсон С.О., Андриенко О.С. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 3. С. 209.
24. Карпов И.В., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 59.
25. Карпов И.В., Борчевкина О.П., Карпов М.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 4. С. 492.

26. *Karpov I., Kshevetskii S.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 164. P. 89.
27. *Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C.* // Comput. Geosci. 2010. V. 36. P. 628.
28. *Пудовкин М.И., Распопов О.М.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 1.
29. *Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е. и др.* // Совр. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 197.
30. *Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е. и др.* // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 10. С. 25.
31. *Борчевкина О.П., Карпов И.В.* // Совр. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 299.
32. *Абдуллаев А.Р., Марков А.В., Клименко М.В. и др.* // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 12. С. 39.
33. *Чурик Н.В., Клименко М.В., Клименко В.В. и др.* // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 12. С. 66.
34. *Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V.* // Adv. Space Res. 2015. V. 56. № 5. P. 900.
35. *Gulyaeva T.L., Titheridge J.E.* // Ibid. 2006. V. 38. № 11. P. 2587.
36. *Котова Д.С., Оводенко В.Б., Ясюкевич Ю.В. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 87.
37. *Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasyukevich Y.V. et al.* // GPS Solut. 2019. V. 24. P. 25.