

УДК 551.510.535

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КАРТ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В МАРТЕ 2015 г.

© 2022 г. А. В. Тимченко<sup>1, 2, \*</sup>, Ф. С. Бессараб<sup>1, \*\*</sup>, М. В. Клименко<sup>1</sup>,  
А. В. Радиевский<sup>1</sup>, В. В. Клименко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (КФ ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

\*e-mail: timchenko.leks@gmail.com

\*\*e-mail: bessarabf@gmail.com

Поступила в редакцию 18.11.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Представлен анализ изменений коэффициента корреляции между вариациями полного электронного содержания в магнитосопряженных точках, рассчитанных с помощью глобальных ионосферных карт в спокойных геомагнитных условиях и для сильной геомагнитной бури 17 марта 2015 г. — бури Св. Патрика. Показано, что во время геомагнитной бури появляются обширные высокоширотные области значимой корреляции рассматриваемых вариаций в магнитосопряженных точках. После геомагнитной бури в магнитосопряженных областях появляются зоны антикорреляции вариаций полного электронного содержания. Рассчитанные статистические связи отличаются для глобальных карт, представленных разными центрами обработки, однако сохраняют общие принципиальные черты. Также приведено сравнение коэффициентов корреляции, полученных по результатам модельных расчетов глобальной модели верхней атмосферы и по данным наблюдений.

DOI: 10.31857/S0016794022030191

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из часто применяемых параметров для исследования ионосферы является полное электронное содержание (ПЭС). Благодаря постоянному развитию глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) доступность и количество этих данных только увеличивается. Таким образом, становится возможным применение вариаций ПЭС в глобальном масштабе, построенных при помощи различных методов интерполяции. Глобальные ионосферные карты ПЭС (GIM TEC) являются удобным инструментом для исследования отклика ионосферы на различного рода возмущения снизу, например, внезапные стратосферные возмущения [Chau et al., 2012; Polyakova et al., 2014; Timchenko et al., 2020], метеорологические штормы [Карпов и др., 2020], землетрясения [Astafyeva, 2019; Zhu and Jiang, 2020] и т.д. Также данные GIM TEC активно использовались для анализа состояния ионосферы в периоды различных явлений космической погоды [Ratovsky et al., 2020; Bessarab et al., 2020; Демьянов и Ясюкевич, 2021]. Кроме того, карты ПЭС активно используются для построения и адаптации эмпирических моделей [Gulyaeva et al.,

2013; Nava et al., 2011; Liu et al., 2019; Kotova et al., 2020; Zhukov et al., 2021].

Для исследования пространственной динамики ионосферы в работе [Ясюкевич и Живетьев, 2015] использовался корреляционный анализ с применением глобальных карт ПЭС. Ранее статистические методы находили применение для исследования ионосферного отклика на различные возмущения. Например, анализируя связь суточных значений ПЭС [Yue et al., 2007], авторы сделали вывод о значимой корреляции между вариациями полного электронного содержания в высоких широтах северного и южного полушарий, которая может превышать 0.8 в магнитосопряженных точках. В работе [Shim, 2009] было проведено исследование корреляционной связи между вариациями ПЭС в различных пространственных точках на основе карт GIM TEC. Среди множества пар точек GIM TEC наибольшая корреляция отмечалась в магнитосопряженных областях. Авторы [Shuo et al., 2018] рассматривали локальную и пространственную морфологию дневных вариаций ПЭС в низкоширотном регионе. Они отметили наличие значимой корреляции

между вариациями ПЭС в магнитосопряженных точках экваториальной аномалии.

Физические процессы, обеспечивающие связь параметров в магнитосопряженных областях, исследовались достаточно давно [Oguti, 1969]. Они проявляются в вариациях ионосферных параметров вблизи линии терминатора [Afraimovich et al., 2009], в периоды различных явлений космической погоды [Foster and Rideout, 2007], а также во время землетрясений [Li and Parrot, 2018].

В данной работе проведен корреляционный анализ среднесуточных значений ПЭС в магнитосопряженных точках в спокойных геомагнитных условиях и во время геомагнитной бури 17 марта 2015 г. (буря Св. Патрика). Выделение областей с высокими значениями коэффициентов корреляции позволило определить межполушарные статистические связи в ионосфере, а анализ вариаций параметров верхней термосферы в модели ГСМ ТИП – определить их возможные физические механизмы.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе использовались глобальные карты ПЭС, взятые с сайта NASA (<https://cd-dis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>), которые представляют собой данные JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) [Mannucci et al., 1993], которые дополнительно распространяются на сайте ИЗМИРАН (<https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/>). Также в работе использовались данные CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*) [Schaer, 1999]. Карты ПЭС имеют часовое разрешение и определены на пространственной сетке со следующими параметрами: по широте от  $-87.5^\circ$  до  $87.5^\circ$ , с шагом  $2.5^\circ$  и долготе от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ , с шагом  $5^\circ$ .

Для статистического анализа были отобраны глобальные карты ПЭС за весь март 2015 г. Часовые значения ПЭС в каждом узле сетки приводились к среднесуточным значениям. На рисунке 1 приведены карты ПЭС для 1 марта 2015 г. по данным JPL и CODE после усреднения за сутки.

Чтобы привести временные вариации к удобному для статистического анализа виду, из временного ряда с помощью оконного среднего (размер окна равен трем суткам) удалась трендовая составляющая временного ряда:

$$TEC_d = TEC_i - \frac{1}{nw} \sum_{j=i}^{j=i+nw} TEC_j, \quad (1)$$

где  $i$  – номер дня;  $nw$  – размер окна, равный 3;  $TEC_i$  – среднесуточные значения ПЭС в  $i$ -й день;  $TEC_d$  – среднесуточные значения ПЭС с удаленным временным трендом. Процедура (1) применялась к каждому узлу глобальной карты.

На рисунке 2 представлены карты ПЭС после обработки карт JPL и CODE соответственно. Подготовленные таким способом данные использовались для расчета коэффициентов корреляции в соответствии с выражением (2).

Для вычисления коэффициентов корреляции, усредненные данные карт ПЭС, которые приведены в географической системе координат  $(\lambda, \varphi)$ , преобразовывались в геомагнитную дипольную (используется приближение центрального диполя) систему координат, а затем для каждой точки в северном геомагнитном полушарии с координатами  $(\lambda_m, \varphi_m)$  ставилась в соответствие точка с координатами  $(-\lambda_m, \varphi_m)$  в южном. Здесь  $\lambda_m$  и  $\varphi_m$  – геомагнитные широта и долгота соответственно. Значение ПЭС в магнитосопряженной точке, положение которой не совпадает с координатами узла, рассчитывается билинейной интерполяцией по 4 ближайшим узлам сетки. Разумеется, не все отобранные таким образом точки можно назвать магнитосопряженными: из множества их следовало бы исключить пары, относящиеся к разомкнутым силовым линиям. Тем не менее “сопряженность” в расширенном смысле можно обосновать симметрией в дипольной системе координат возмущающих высокоширотную ионосферу геофизических факторов.

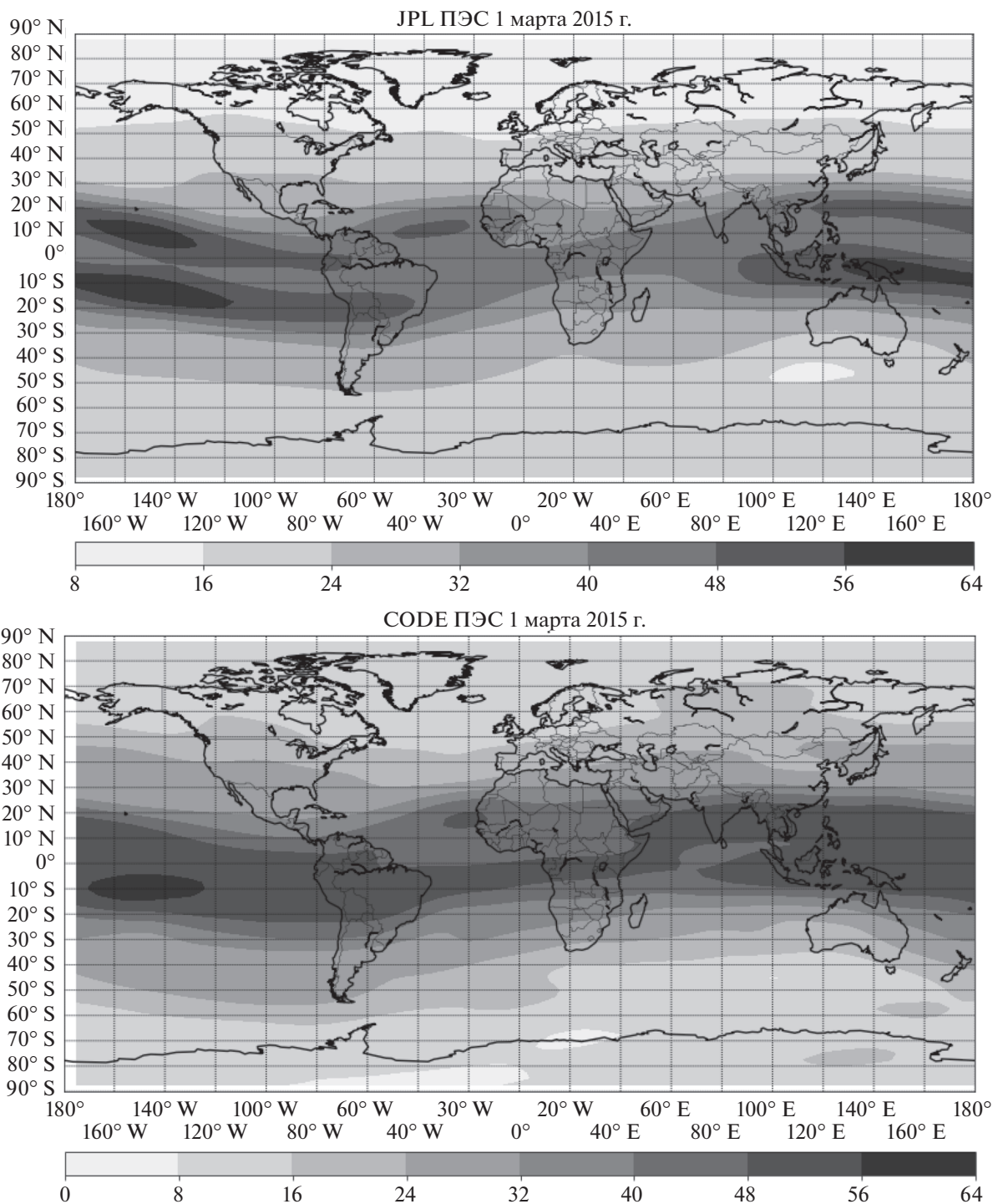
Затем, на основе вариаций ПЭС для каждой пары подобранных точек, вычислялись значения коэффициентов корреляции Пирсона:

$$R(\lambda, \varphi, \lambda_c, \varphi_c) = \frac{\sum_{t=1}^N (TEC_d(\lambda, \varphi)_t - \langle TEC_d(\lambda, \varphi) \rangle) (TEC_d(\lambda_c, \varphi_c)_t - \langle TEC_d(\lambda_c, \varphi_c) \rangle)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (TEC_d(\lambda, \varphi)_t - \langle TEC_d(\lambda, \varphi) \rangle)^2 (TEC_d(\lambda_c, \varphi_c)_t - \langle TEC_d(\lambda_c, \varphi_c) \rangle)^2}}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество рассматриваемых дней;  $\lambda$  и  $\varphi$  – широта и долгота в географической системе координат соответственно;  $\lambda_c$  и  $\varphi_c$  – широта и долгота магнитосопряженной точки в географической системе координат соответственно;

$\langle TEC_d \rangle$  – среднее значение вариаций  $TEC_d$  за рассматриваемый период.

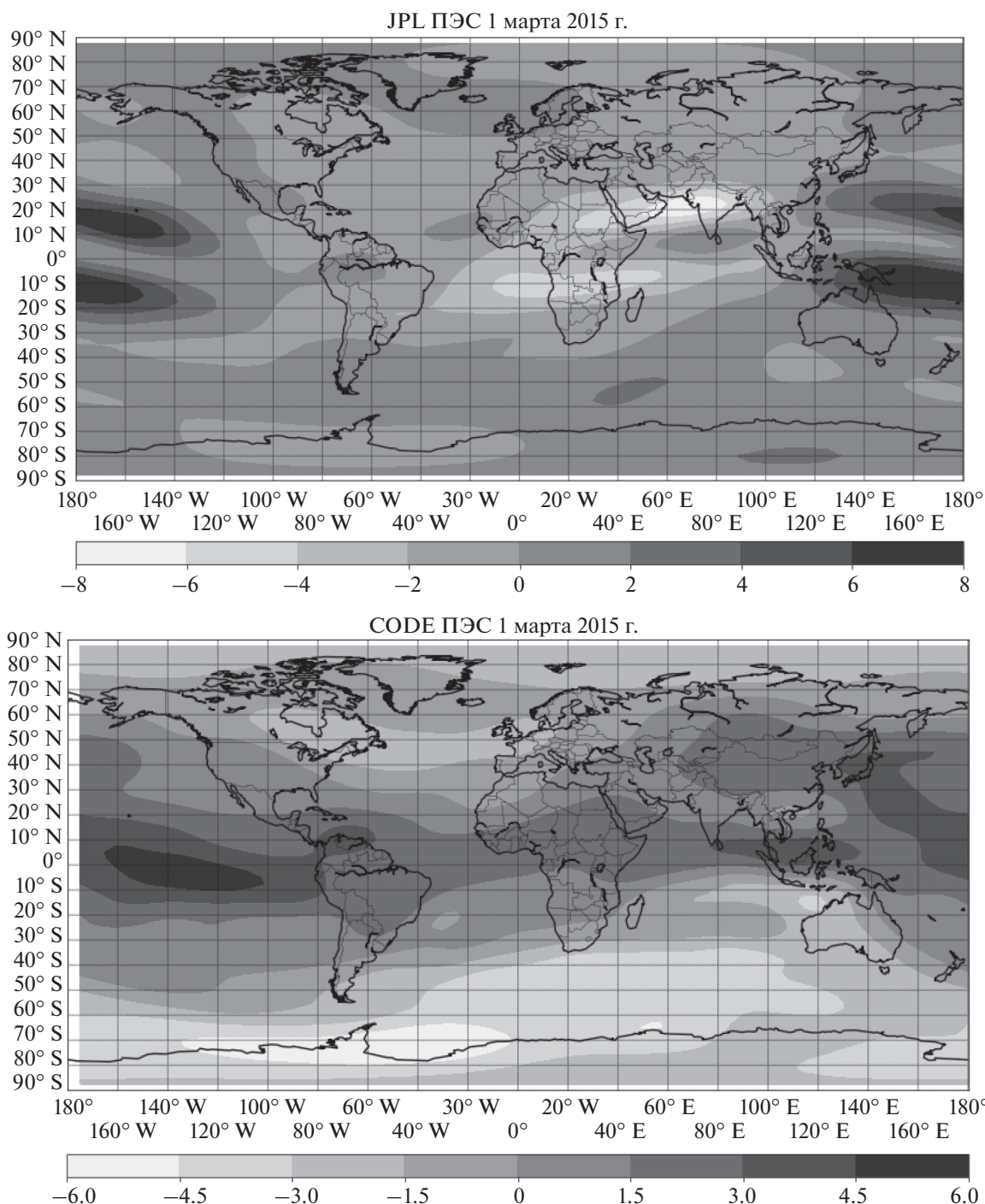
Для определения временных интервалов, для которых рассчитывался коэффициент корреляции



**Рис. 1.** Глобальные карты среднесуточных значений ПЭС для 1 марта 2015 г. по данным JPL (вверху) и CODE (внизу).

ции, использовались значения *Dst*-индекса, которые доступны на сайте Мирового центра данных в Киото (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Поведение *Dst*-индекса для марта 2015 г. с часовым разрешением представлены на рис. 3. График внутри данного рисунка показывают поведение *Dst*-индекса с 00:00 UT 17 марта по 23:00 UT 18 марта.

На графике видно, что основная фаза бури проходила с 05:00 UT до 22:00 UT 17 марта, при этом значение индекса *Dst* уменьшалось до  $-223$  нТл. Фаза восстановления длилась вплоть до начала апреля. Также стоит отметить, что в начале марта, судя по поведению *Dst*-индекса, первую неделю марта, строго говоря, нельзя счи-



**Рис. 2.** Глобальные карты среднесуточного ПЭС после оконного усреднения для 1 марта 2015 г. по данным JPL (вверху) и CODE (внизу).

тать спокойными геомагнитными условиями. Мы разделили март на четыре временных отрезка: первая неделя с 1 по 7 марта; вторая неделя с 8 по 14 марта; третья неделя с 17 по 23 марта; и четвертая неделя с 24 по 28 марта. Для каждого из этих временных интервалов были рассчитаны значения коэффициентов корреляции между вариациями ПЭС в магнитосопреженных точках.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов представлены на рис. 4 в виде азимутальной проекции северного полушария, на которую нанесены изолинии, отображающие величины от значимого (0.75–0.9) до сильного (>0.9) коэффициента корреляции/антикорреляции соответственно. На рисунке 4 по-

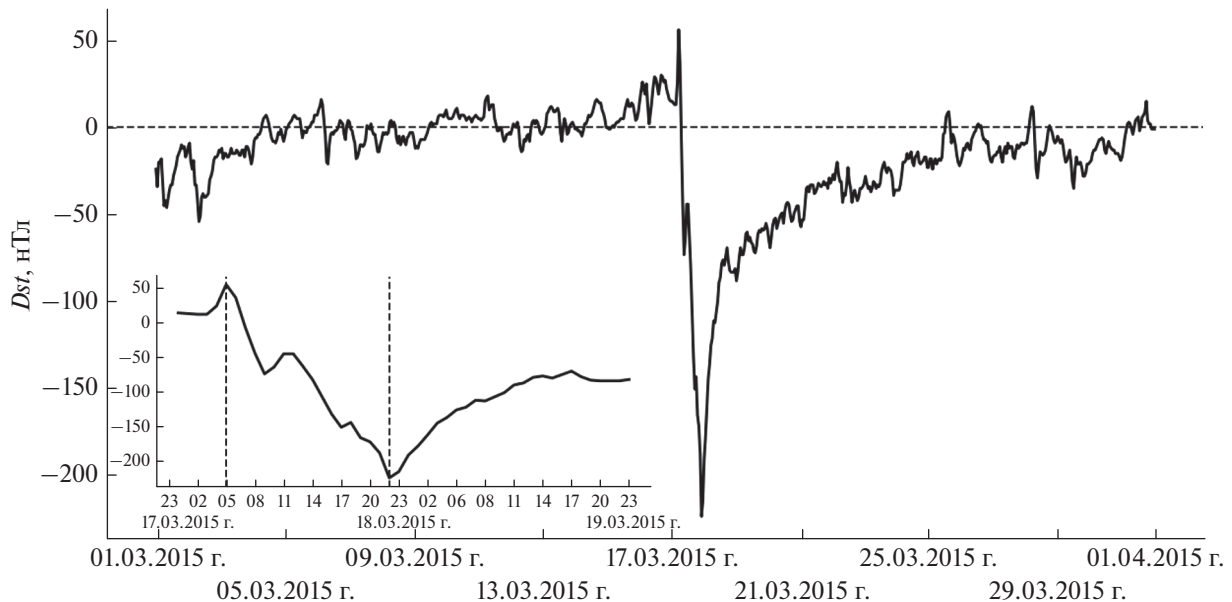


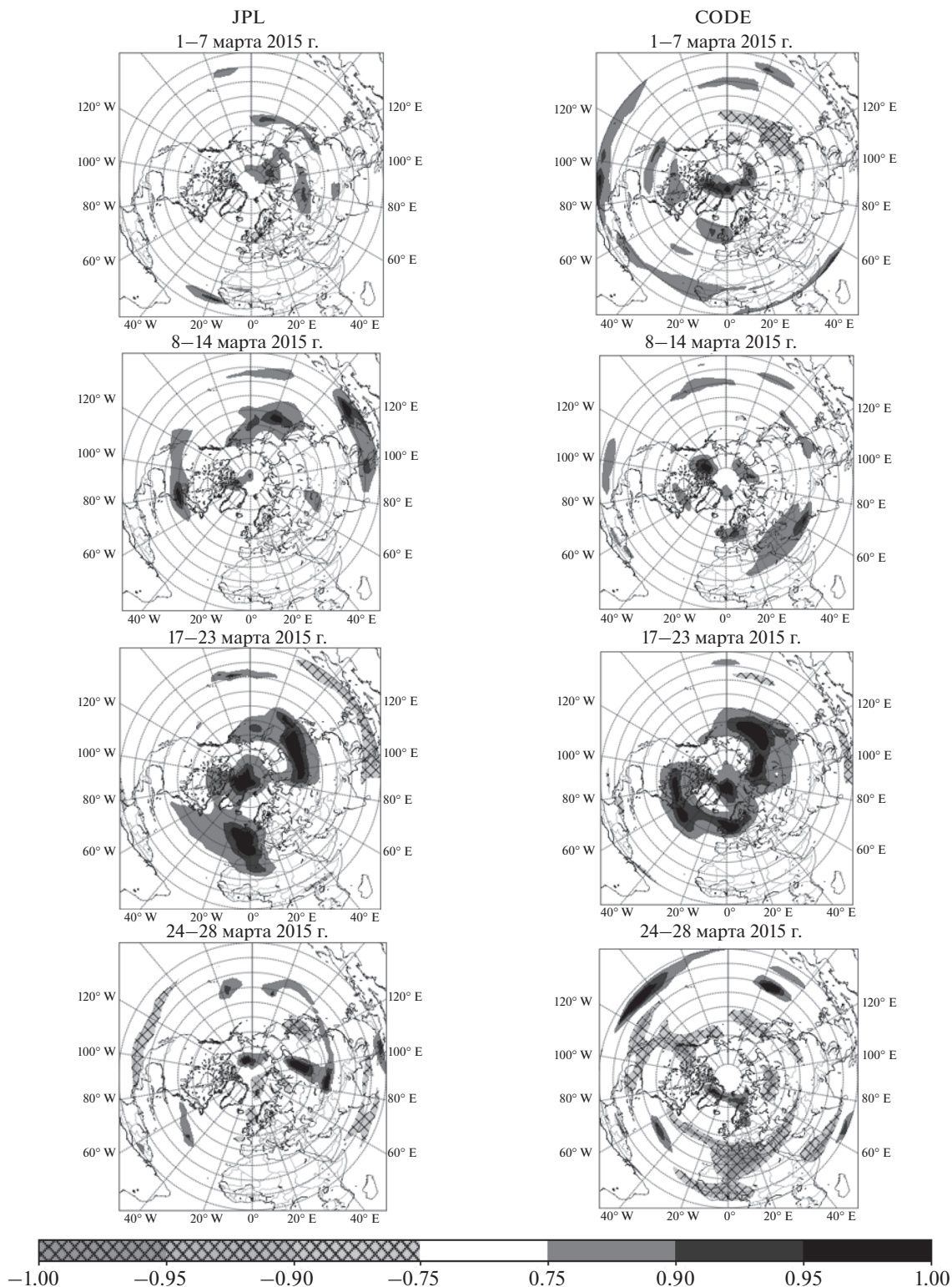
Рис. 3. Поведение *Dst*-индекса для марта 2015 г.

казаны значения коэффициента корреляции, рассчитанного на основе данных JPL и CODE.

Хорошо видно, что в спокойных условиях первой недели марта области значимой корреляции/антикорреляции вариаций ПЭС в магнитосопряженных точках малочисленны и невелики по площади в данных JPL. По данным CODE таких областей больше и по числу, и по площади. Важным различием двух полученных результатов является наличие “антикорреляционной” области в данных CODE на месте области с положительной корреляцией в данных JPL. Картина корреляции, построенная для второй предбуревой недели, также значительно отличается для двух наборов данных. Общей чертой полученных результатов является минимальное количество областей со значимой величиной коэффициента антикорреляции. На третью неделю марта приходится буревое событие. Хорошо видно, что в этом случае построенные распределения коэффициентов корреляции для наборов данных JPL и CODE качественно схожи. Области значимой корреляции приобретают характерную вытянутую форму, сосредоточенную в восточносибирском и американском долготных секторах в высокоширотном регионе. Небольшие области антикорреляции как по данным JPL, так и CODE, располагаются в низких и экваториальных широтах. В четвертую неделю марта, которая включает и фазу восстановления бури, и спокойные дни, мы снова видим качественно отличные картины распределения коэффициента корреляции. Для карт JPL расположение областей положительной корреляции, в целом, соответствует первой неде-

ле марта. Отличие только в появлении областей отрицательной корреляции на всех широтах — от приполярных до экваториальных. По данным CODE, конец марта, напротив, характеризуется доминированием областей со значимыми величинами отрицательной корреляции, в отличие от первой и второй недели марта. Таким образом, общей тенденцией для всех наборов данных является то, что после периода геомагнитной бури появляются достаточно большие области антикорреляции вариаций ПЭС в магнитосопряженных областях. Мы полагали, что возмущения, распространяющиеся вдоль трубки из одного геомагнитного полушария в другое в течение суток, приведут к относительному “выравниванию” вариаций ПЭС и преобладанию областей с высоким положительным значением коэффициента корреляции. Однако, поскольку этого не наблюдается, можно предположить, что в период восстановления ионосферы, сгенерированные бурей осцилляции планетарного масштаба в нейтральной атмосфере имеют противоположные фазы в северном и южном полушариях и не затухают в течение нескольких суток после фазы восстановления. Заметим, что в спокойных условиях первой и второй недели марта практически отсутствует антикорреляционная связь в магнитосопряженных точках. Отличительными особенностями результатов расчетов, полученных по данным CODE, является также большее количество областей с положительной и отрицательной корреляционной связью, в сравнении с данными JPL.

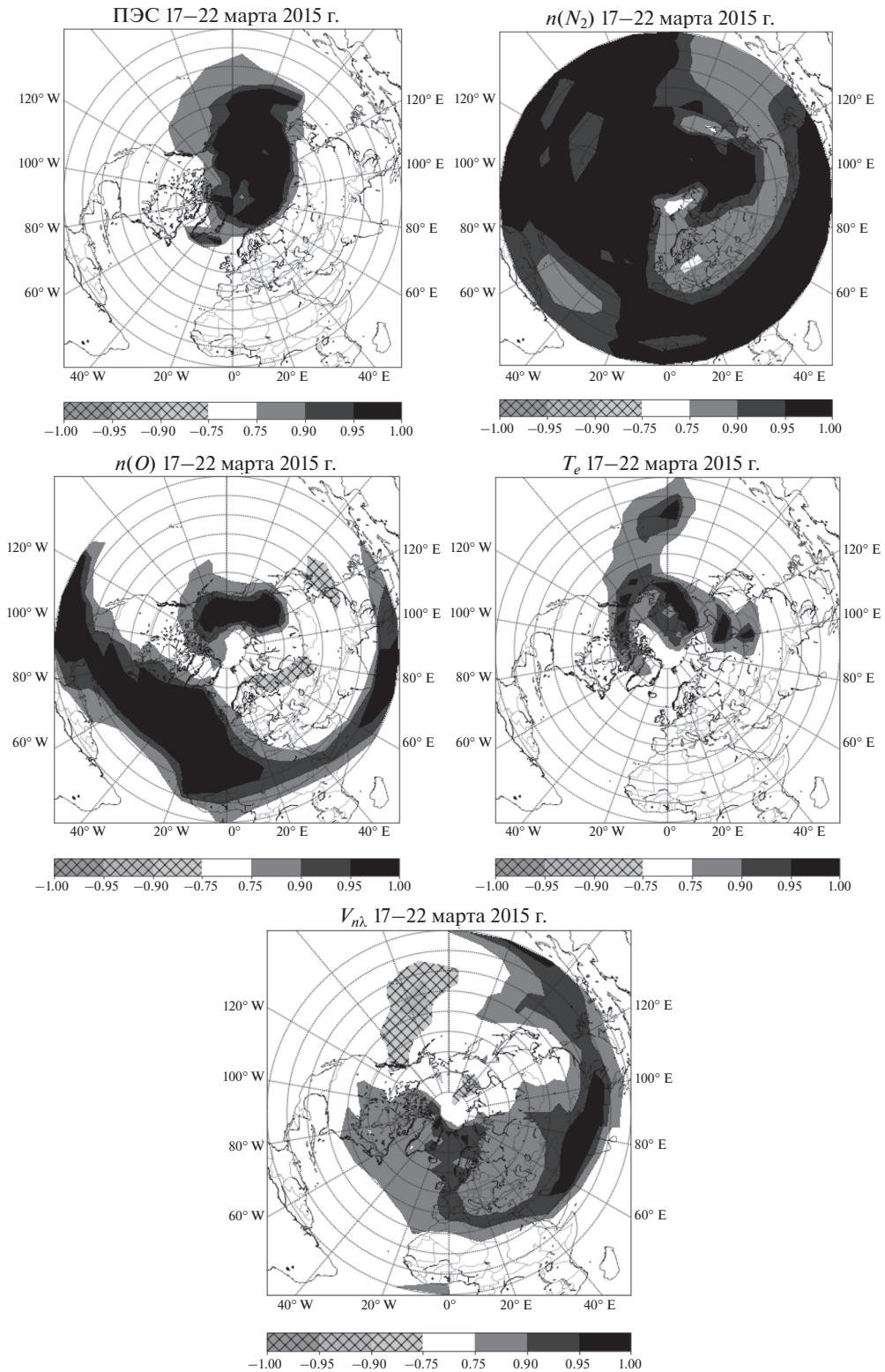
Кроме данных наблюдений в исследовании, по описанной выше методике, были проанализи-



**Рис. 4.** Значения коэффициента корреляции, рассчитанные по картам ПЭС JPL (слева) и CODE (справа) для четырех недель марта 2015 г.

рованы результаты модельных расчетов глобальной самосогласованной модели термосфера, ионосфера, протоносфера (ГСМ ТИП) [Korenkov et al., 1998]. Ранее с использованием модели ГСМ

ТИП были исследованы различные аспекты отклика ионосферы на геомагнитную бурю в марте 2015 г.: влияние квазизахваченных электронов на повышение электронной концентрации [Dmi-



**Рис. 5.** Значения коэффициента корреляции, рассчитанные по картам ПЭС,  $n(O)$ ,  $n(N_2)$ ,  $T_e$ ,  $V_{nl}$ , соответственно, на ГСМ ТИП.

triev et al., 2017]; эффекты последствия геомагнитной бури на средних широтах [Ратовский и др., 2018; Ratovsky et al., 2020]; изменчивость главного ионосферного провала и аврорального

электроджета [Klimenko et al., 2018]; влияние “языка” в высокоширотном распределении молекулярного азота на структуру высокоширотного “языка ионизации” [Klimenko et al., 2019]. Ре-

зультаты расчетов на модели ГСМ ТИП были получены на пространственной сетке от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  по широте, с шагом  $5^\circ$  и от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$  по долготе, с шагом  $15^\circ$  с временным разрешением 1 ч.

Заметим, что анализ модельных данных интересен тем, что в численных экспериментах набор возмущающих факторов ограничен, а их поведение контролируется. На рисунке 5 приведены коэффициенты корреляции вариаций ПЭС и других параметров в магнитосопряженных точках для интервала 17–22 марта по результатам численных расчетов ГСМ ТИП.

На рисунке видно, что в значениях коэффициента корреляции, полученным по результатам модельных расчетов, отсутствуют отрицательные величины. Область положительной корреляции охватывает всю полярную область и смещена к средним и низким широтам в долготном секторе от  $140^\circ$  W до  $140^\circ$  E. Так как модель в представленной постановке среди многих возмущающих факторов учитывает воздействие на ионосферу только геомагнитной бури, то основное (согласованное в магнитосопряженных областях) воздействие геомагнитной бури ожидаемо приходится на высокоширотный регион. Появление по результатам численного моделирования обширной области значимого коэффициента корреляции в высокоширотном регионе во время геомагнитной бури в общих чертах согласуется с аналогичными результатами по данным измерений. Обращает на себя внимание отсутствие в результатах расчетов наблюдаемой высокой корреляции в высокоширотных областях американского долготного сектора.

Для интерпретации полученного распределения коэффициента корреляции вариаций ПЭС в магнитосопряженных точках нами аналогичным образом были рассчитаны и построены карты коэффициентов корреляции вариаций в магнитосопряженных точках для концентраций атомарного кислорода, молекулярного азота, электронной температуры и меридионального ветра на высоте 300 км. Как известно, эти параметры играют определяющую роль при интерпретации возмущений ПЭС во время геомагнитных бурь [Klimenko et al., 2018]. Под действием меридиональной компоненты термосферного ветра плазма за счет ион-нейтрального трения может увлекаться нейтральными частицами, перемещаясь вверх или вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля. При этом ветер к экватору/полюсу поднимает/опускает плазму вверх/вниз в области, соответственно, меньших или больших скоростей химических потерь в ионно-молекулярных реакциях. Это приводит к росту или падению электронной концентрации [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Согласно Prolss [1995] положитель-

ная ионосферная буря на средних широтах в главную фазу геомагнитной бури объясняется этим механизмом. Поскольку атомарный кислород является основным источником ионизации в F-области ионосферы, а молекулярный азот определяет основные потери доминирующих ионов атомарного кислорода, то изменение отношения  $n(O)/n(N_2)$  определяет знак изменений электронной концентрации – рост этого отношения приводит к увеличению электронной концентрации, а падение – к уменьшению [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Сравнение карт корреляций приводит к следующему выводу: в пространственной области высокой корреляции ПЭС корреляции  $n(N_2)$ ,  $n(O)$  и  $Te$  достигают высоких значений. То есть эти параметры способствуют формированию области с высокой корреляцией ПЭС в магнитосопряженных точках. При этом в этой же области формируется антикорреляция меридионального ветра, что приводит к ослаблению корреляции ПЭС.

Несмотря на тот факт, что буря Святого Патрика произошла в весеннее равноденствие, в вариациях ПЭС, концентрации кислорода и термосферного ветра на 300 км формируется межполушарная асимметрия отклика на геомагнитную бурю. Этот результат совпадает с выводами, сделанными Astafyeva et al. [2015] на основании анализа мультиинструментальных данных наблюдений. Как отмечалось в этой работе, одной из основных причин межполушарной асимметрии в ПЭС во время бури является изменение нейтрального состава. Этот вывод подтверждается результатами наших модельных расчетов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен корреляционный анализ глобальных карт ПЭС в магнитосопряженных точках перед, во время и после геомагнитной бури Св. Патрика 2015 г. Показано, что:

- 1) во время геомагнитной бури Святого Патрика 2015 г. появляются обширные высокоширотные области, в которых значения коэффициентов корреляции, рассчитанные для магнитосопряженных точек, превышают 0.75;
- 2) временной интервал после геомагнитной бури отличается наличием большого числа областей антикорреляции вариаций ПЭС в “магнитосопряженных” точках;
- 3) результат статистического анализа зависит от используемых карт ПЭС, представленных различными центрами обработки, хотя принципиальные выводы, представленные в пунктах 1 и 2, сохраняются.

Так как в рассматриваемый период не было отмечено существенных возмущений в нижней и средней атмосфере, как и в излучении Солнца,



поэтому высокие значения коэффициента корреляции между магнитосопряженными областями, пространственное расширение этих областей во время бури может свидетельствовать о сильном влиянии геомагнитной возмущенности на изменчивость полного электронного содержания по сравнению с иными факторами. В период восстановления в ионосфере начинают преобладать другие процессы, не связанные напрямую с геомагнитной бурей. В частности, такими процессами могут быть развивающиеся после бури крупномасштабные осцилляции нейтральных параметров, которые имеют противоположные фазы в северном и южном полушариях, что приводит к появлению областей с высоким значением антикорреляции между вариациями ПЭС в магнитосопряженных точках.

Анализ результатов численного моделирования показал, что параметры  $n(N_2)$ ,  $n(O)$  и  $T_e$  способствуют формированию области с высокой корреляцией ПЭС в магнитосопряженных точках. При этом в этой же области формируется антикорреляция меридионального ветра, что приводит к ослаблению корреляции ПЭС.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим Юрия Ясюкевича за помощь в доступе к глобальным картам ПЭС CODE.

Глобальные карты ПЭС JPL предоставлены в общем доступе на сайте NASA (<https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была выполнена при финансовой поддержке грантом Российского научного фонда № 21-17-00208.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 527 с. 1988.
- Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем // Солнечно-земная физика. Т. 7. № 2. С. 30–52. 2021. <https://doi.org/10.12737/szf72202104>
- Карпов И.В., Васильев П.А. Возмущения ионосферы, обусловленные воздействием локализованных термосферных источников // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 4. С. 496–501. 2020.
- Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В., Чирик Н.В., Коренькова Н.А., Котова Д.С. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение // Солнечно-земная физика. Т. 4. № 4. С. 32–42. 2018. <https://doi.org/10.12737/szf44201804>
- Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. Использование технологии графов для ионосферных исследований // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 3. С. 21–27. 2015. <https://doi.org/10.12737/10545>
- Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator // Adv. Space Res. V. 44. P. 824–835. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.05.017>
- Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophys. Res. – Space. V. 120. № 10. P. 9023–9037. 2015.
- Astafyeva E. Ionospheric detection of natural hazards // Rev. Geophys. V. 57. № 4. P. 1265–1288. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019RG000668>
- Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Korenkov Yu.N., Funke B., Zakharenkova I. E., Wissing J.M., Rozanov E.V. Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15–22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results // Adv. Space Res. V. 65. № 11. P. 2475–2496. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.026>
- Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H. Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events: Ionospheric effects during SSW events // Space Sci. Rev. V. 168. P. 385–417. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9797-5>
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Rатовский К.Г., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V.A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008 // J. Geophys. Res. – Space. V. 122. P. 2398–2423. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JA023260>
- Foster J. C., Rideout W. Storm enhanced density: magnetic conjugacy effects // Ann. Geophysicae. V. 25. № 8. P. 1791–1799. 2007. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-1791-2007>
- Gulyaeva T.L., Arikani F., Hernandez-Pajares M., Stani-slawska I. GIM-TEC adaptive ionospheric weather assessment and forecast system // J. Atmos. Sol-Terr. Phys. V. 102. P. 329–340. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.06.011>
- Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasukevich Y.V. et al. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes // GPS Solut. V. 24. № 1. P. 1–12. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0936-x>
- Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Forster M., Bessarab F.S., Surotkin V.A. Calculated and observed ionospheric parameters for Magion 2 passage above EISCAT on July 31 1990 // J. Geophys. Res. V. 103. P. 14697–14710. 1998. <https://doi.org/10.1029/98JA00210>
- 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. Sol-Terr. Phys. V. 180. P. 78–92. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017>
- Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., Lukanova R.Y., Cherniak I.V. Simulation and observations of the polar tongue of ionization at different heights during the 2015 St. Patrick's Day storm // Space Weather. V. 17. № 7.

- P. 1073–1089. 2019.  
<https://doi.org/10.1029/2018SW002143>
- *Li M., Parrot M.* Statistical analysis of the ionospheric ion density recorded by DEMETER in the epicenter areas of earthquakes as well as in their magnetically conjugate point areas // *Adv. Space Res.* V. 61. № 3. P. 974–984. 2018.
- *Liu L., Yao Y., Zou S., Kong J., Shan L., Zhai C., Zhao C., Wang Y.* Ingestion of GIM-derived TEC data for updating IRI-2016 driven by effective IG indices over the European region // *J. Geodesy.* V. 93. № 10. P. 1911–1930. 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s00190-019-01291-5>
- *Mannucci A.J., Wilson B.D., Edwards C.D.* A new method for monitoring the Earth's ionospheric total electron content using the GPS global network / Proc. of the 6<sup>th</sup> international technical meeting of the satellite Division of the Institute of Navigation. Salt Lake City. UT. September 1993. P. 1323–1332. 1993.
- *Nava B., Radicella SM, Azpilicueta F.* Data ingestion into NeQuick 2 // *Radio Sci.* V. 46. № 06. P. 1–8. 2011.  
<https://doi.org/10.1029/2010RS004635>
- *Oguti T.* Conjugate point problems // *Space Sci. Rev.* V. 9. P. 745–804. 1969.
- *Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P.* Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region // *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* V. 120. P. 15–23. 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.011>
- *Prolss G.W.* Ionospheric F-region storms / Handbook of Atmospheric Electrodynamics. V. 2. Ed. *Volland H.* Boca Raton. CRC Press. P. 195–248. 1995.
- *Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., Klimenko V.V., Vesnin A.M.* Statistical analysis and interpretation of High-, Mid- and Low-Latitude responses in regional electron content to geomagnetic storms // *Atmosphere.* V. 11. № 12. P. 1308. 2020.  
<https://doi.org/10.3390/atmos11121308>
- *Schaer S.* Mapping and predicting the earths ionosphere using the Global Positioning System. PhD thesis, Ph. D. dissertation. University of Bern, Bern, Switzerland. P. 205. 1999.
- *Shim J.S.* Analysis of Total Electron Content (TEC) variations in the Low- and Middle-Latitude ionosphere. All Graduate Theses and Dissertations. P. 403. 2009.
- *Shuo L., Jinsong Ya., Tao Yu, Zhiqiang Zh.* Horizontal spatial correlation of the ionospheric TEC derived from GPS global ionospheric maps // *Adv. Space Res.* V. 62. № 7. P. 1775–1786. 2018.
- *Timchenko A.B., Bessarab F.S., Klimenko M.V. et al.* Variability of the global electron content during the major sudden stratospheric warmings in January 2009 // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* V. 17. № 6. P. 167–172. 2020.
- *Yue X., Wan W., Liu L., Mao T.* Statistical analysis on spatial correlation of ionospheric day-to-day variability by using GPS and Incoherent Scatter Radar observations // *Ann. Geophysicae.* V. 25. № 8. P. 1815–1825. 2007.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-25-1815-2007>
- *Zhu F., Jiang Y.* Investigation of GIM-TEC disturbances before  $M \geq 6.0$  inland earthquakes during 2003–2017 // *Sci. Rep.* V. 10. P. 18038. 2020.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-74995-w>
- *Zhukov A.V., Yasyukevich Y.V., Bykov A.E.* GIMLi: Global Ionospheric total electron content model based on machine learning // *GPS Solut.* V. 25. № 1. P. 1–9. 2021.