

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАФОВ ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

USING NETWORK TECHNOLOGY FOR STUDYING THE IONOSPHERE

Ю.В. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск,
Россия, yasukevich@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

И.В. Живетьев

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, i.zhivetiev@gmail.com
Камчатский государственный технический университет,
Петропавловск-Камчатский, Россия*

Yu.V. Yasyukevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
yasukevich@iszf.irk.ru
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

I.V. Zhivetiev

*Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Paratunka, Russia, i.zhivetiev@gmail.com
Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Аннотация. Одна из актуальных проблем физики ионосферы — взаимосвязь различных регионов ионосферы. В работе изучены межрегиональные связи изменений ионосферной динамики путем применения технологии графов. В качестве информации об ионосфере использованы данные глобальных ионосферных карт (GIM) полного электронного содержания (ПЭС) лаборатории CODE за 2005–2010 гг. Распределение значений максимумов функций корреляции изменения ПЭС в ионосфере имеет сложный характер и позволяет выделить два уровня взаимосвязи между регионами: сильная связь ($r > 0.9$) и слабая связь ($r > 0.72$). В Северном полушарии ионосфера характеризуется сильной связью между узлами Арктического региона выше 50° геомагнитной широты. В Южном полушарии подобная область сильной связи гораздо больше. Слабая связь характерна для всего Южного полушария. На юге Северной Америки имеется область, в которой динамика ПЭС коррелирует в различных узлах, при этом практически не коррелирует с динамикой остальной ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, графы, полное электронное содержание, глобальные ионосферные карты.

Abstract. One of the key problems of ionosphere physics is the coupling between different ionospheric regions. We apply networks technology for studying the coupling of changing ionospheric dynamics in different regions. We used data from global ionosphere maps (GIM) of total electron content (TEC) produced by CODE for 2005–2010. Distribution of cross-correlation function maxima of TEC variations is not simple. This distribution allows us to reveal two levels of ionosphere coupling: «strong» ($r > 0.9$) and «weak» ($r > 0.72$). The ionosphere of the Arctic region upper 50° magnetic latitude is characterized by a «strong» coupling. In the Southern hemisphere, a similar region is bigger. «Weak» coupling is typical for the whole Southern hemisphere. In North America there is an area where TEC dynamics is «strongly» correlated inside and is not correlated with other ionospheric regions.

Keywords: ionosphere, networks, total electron content, global ionosphere maps.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно усилился интерес к ионосферным исследованиям. Во многом это обусловлено развитием средств зондирования ионосферы, которые позволяют получать инструментальные измерения с пространственным (в том числе и по высоте) и временным разрешением и точностью, значительно превосходящими доступные ранее.

Одним из таких средств стали глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система) [Jakowski et al., 2012; Afraimovich et al., 2013] и система геостационарных спутников SBAS (Satellite Based Augmentation System), используемая для поддержки

GPS [Kunitsyn et al., 2015]. С использованием ГНСС в настоящее время осуществляется построение карт вариаций полного электронного содержания (ПЭС) с высоким пространственным разрешением (в регионах, где имеются достаточно плотные сети GPS/ГЛОНАСС, — Япония, Калифорния) [Saito et al., 1998], проводятся интерферометрия ионосферных неоднородностей [Afraimovich et al., 1998] и 4D-реконструкция ионосферы [Kunitsyn et al., 2011], строятся глобальные карты распределения ПЭС [Mannucci et al., 1998; Schaer et al., 1998; Hernández-Pajares et al., 1999].

Глобальные ионосферные карты полного электронного содержания GIM (карты GIM) представляют собой набор элементарных ячеек, которые охватывают практически весь земной шар. Размер ячейки состав-

ляет 5° по долготе и 2.5° по широте. Общее количество ячеек — 5183. Каждая ячейка содержит данные о вертикальном ПЭС. Таким образом, можно получить данные о вертикальном ПЭС с двухчасовым (с 2014 г. для отдельных лабораторий с часовым) временным разрешением по всему земному шару. В последние годы строятся региональные ионосферные карты с более высоким пространственным и временным разрешением [Ping et al., 2002; Bergeot et al., 2014].

С использованием карт GIM было решено большое число задач: проведены оценка полного числа электронов в ионосфере Земли [Astafyeva et al., 2008] и анализ особенностей Экваториальной аномалии [Huang et al., 2014], выявлены годовая асимметрия ионизации Северного и Южного полушарий [Gulyaeva et al., 2014] и эффекты стратосферных потеплений [Polyakova et al., 2014] и т. д. Глобальность представленных данных, вообще говоря, должна позволить решить задачу взаимодействия ионосферы различных регионов. Для этой цели мы планируем впервые использовать теорию графов.

К настоящему моменту теория графов очень хорошо разработана и имеет в своей основе строгий математический аппарат (см., например, обзор [Newman, 2003]). Теория графов (или, как их часто называют, сетей — networks) в последнее время широко используется для исследования больших сложных систем. Под сетью понимается набор взаимодействующих узлов, связанных между собой тем или иным образом. Признаком связи может выступать любой выбранный параметр — жесткое соединение в компьютерной сети, родственные связи в человеческом сообществе или уровень корреляции между рядами наблюдений. Определяя в предметной области «узлы» и находя между ними «связи», можно сформировать сеть.

Исследуя топологию полученной сети, можно обнаружить глобальную симметрию или асимметрию, выявить кратчайшие пути и скорость передачи информации (в широком смысле), изучить реакцию на сильное воздействие или перестройку системы в связи с каким-либо фактором, т. е. в конечном счете получить новую информацию о коллективной динамике системы в целом — в данном случае об ионосфере.

Исследования нейтральной атмосферы ведутся с применением теории графов с 2000-х гг. [Tsonis, Roebber, 2004; Tsonis, Swanson, 2008; Guez et al., 2012]. Анализ осуществлялся, как правило, с использованием данных архивов реанализа (в частности NCEP reanalysis data, NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado [http://www.cdc.noaa.gov]). В настоящей работе мы планируем приложить теорию графов к исследованию ионосферы.

МЕТОДИКА

Как уже было сказано, в работе используются данные глобальных ионосферных карт ПЭС GIM [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex]. Карты GIM рассчитываются несколькими лабораториями. Существуют систематические расхождения между данными различных карт [Afraimovich et al., 2008],

однако в целом общая динамика ПЭС схожа. В настоящей работе мы остановились на использовании данных CODE (Center for Orbit Determination in Europe, Бернский университет, Швейцария) [http://aiub.unibe.ch].

Узлами сети являются ячейки карты GIM, расположенные с шагом 2.5° по широте и 5° по долготе. Для каждой ячейки карты GIM мы получаем ряд значений вертикального ПЭС за период 2005–2010 гг. Общее число рядов — 5183, временное разрешение — 2 ч. Далее для каждого ряда проводится усреднение за каждые сутки с 0 до 24 UT. На выходе получаются ряды среднесуточных значений ПЭС длиной 2191 значение. Среднесуточные ряды сглаживаются скользящим средним с окном 365 дней, центрированным на данный день (окно охватывает диапазон ± 182 дня относительно текущего), и вычитаются из соответствующих рядов среднесуточных значений ПЭС. В результате мы получаем ряды так называемой аномалии вертикального ПЭС — отклонений среднесуточного ПЭС от текущего годового среднего. Каждый из 5183 полученных рядов аномалии ПЭС соответствует конкретной ячейке карты GIM. Каждому дню исследуемого интервала соответствует одно значение в каждом из рядов. Общая длина рядов аномалии ПЭС — 2191 значение. Использование в качестве исследуемого параметра аномалии ПЭС предполагает, что анализируется согласованность отклика ионосферы на возмущающее воздействие. Взаимосвязь узлов графа определяется на основе корреляции двух рядов аномалии ПЭС в соответствующих ячейках. Кросскорреляционные функции (ККФ) рассчитывались для всех комбинаций пар узлов (всего $\sim 13.5 \cdot 10^6$ функций).

Пример исходных рядов аномалии ПЭС для трех узлов (27.5° N, -65° E; 35° N, -80° E; 72.5° N, 150° E) представлен на рис. 1, а. Шкала для ряда, соответствующего узлу 72.5° N, 150° E, приведена справа. Ряды значений аномалии ПЭС для узлов 27.5° N, -65° E и 35° N, -80° E имеют схожую динамику. ККФ для этих узлов (рис. 1, б, толстая черная кривая) имеет хорошо выраженный максимум, превышающий 0.9. В то же время для узлов 35.5° N, -80° E и 72.5° N, 150° E динамика аномалии ПЭС значительно различается. Коэффициент кросскорреляции (рис. 1, б, черная штриховая кривая) не превышает 0.4. Толстой серой кривой на рис. 1, б приведена ККФ для узлов, расположенных в Северном (72.5° N, 150° E) и Южном (-40° N, -80° E) полушариях. Можно видеть, что ККФ отрицательна и имеет слабо выраженный максимум (по абсолютной величине) при сдвиге $\Delta N_{\text{day}}=1$ день.

В работе [Tsonis, Roebber, 2004] для задач исследования нейтральной атмосферы принималось, что узлы связаны между собой, если уровень корреляции был более 0.5. При исследовании ионосферы такой подход не совсем приемлем. В связи с тем, что солнечная активность для всей ионосферы является основным фактором, изменение солнечной активности сказывается с определенной задержкой на всех узлах. В результате уровень кросскорреляции между различными узлами будет в целом достаточно высоким.

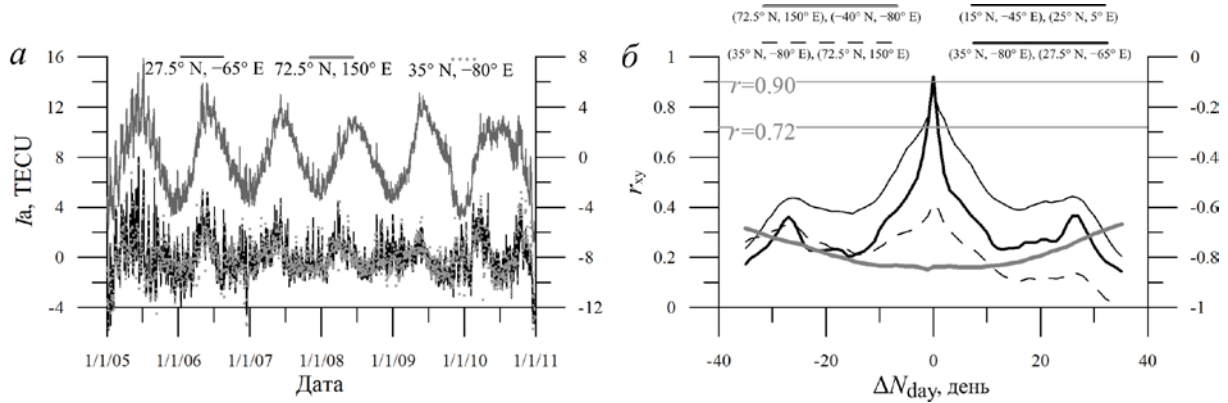


Рис. 1. Ряды аномалии ПЭС (а) для трех ячеек карты GIM (27.5° N, -65° E; 35° N, -80° E; 72.5° N, 150° E) и ККФ рядов аномалий ПЭС (б) для трех пар узлов: 35° N, -80° E и 72.5° N, 150° E; 35° N, -80° E и 27.5° N, -65° E; 15° N, -45° E и 25° N, 5° E. Шкалы для узла 72.5° N, 150° E на панели а и для ККФ узлов 72.5° N, 150° E и -40° N, -80° E на панели б приведены справа

На рис. 2 представлено распределение максимальных по абсолютной величине значений ККФ аномалий ПЭС r_{xy} для всех пар узлов (всего $\sim 13.5 \cdot 10^6$ значений). Шкала слева отмечает число пар узлов, максимум значения ККФ рядов аномалий ПЭС для которых приходится на текущий бин. Можно видеть, что до $r=0.72$ значения распределены достаточно равномерно. Далее начинается резкий рост. Кроме того, имеется достаточное большое число пар, для которых корреляция рядов превышает 90%. В распределении уровень корреляции 0.9 приходится на величину, которая в $\sim \sqrt{2}$ раз меньше максимума. На основании этого мы выделили следующие критерии наличия связи: $r_{xy} < 0.72$ — связь отсутствует; $r_{xy} > 0.72$ — присутствует по крайней мере слабая связь; $r_{xy} > 0.90$ — присутствует сильная связь.

Некоторое увеличение распределения в области отрицательной корреляции (рис. 2) может быть связано с обратной зависимостью в ионосферной динамике различных полушарий. При этом ни для каких пар не отмечалась корреляция сильнее -0.9. Меньший уровень (по абсолютной величине) корреляции относительно узлов с положительной корреляцией

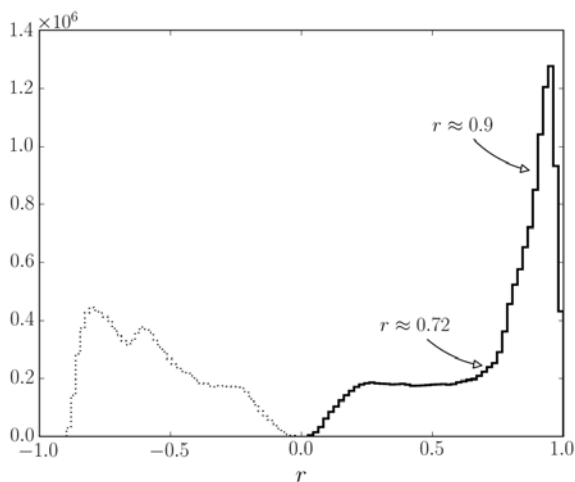


Рис. 2. Распределение максимальных по абсолютной величине значений ККФ аномалий ПЭС для всех узлов. Пунктиром обозначена область отрицательных значений

обусловлен, по-видимому, пространственным разнесением узлов с высоким уровнем отрицательной корреляции и несогласованной изменчивостью локальных и глобальных характеристик ионосферы. Заметим, что в областях, в которых отсутствуют непосредственные измерения GPS/ГЛОНАСС, существенное влияние оказывает интерполяция данных. В результате корреляция рядов данных для близких узлов будет в любом случае выше, чем для разнесенных.

На рис. 3 представлены временные сдвиги рядов, при которых наблюдается максимум ККФ. Можно видеть, что наиболее вероятные значения лежат в пределах одного дня. Значения, расположенные в бинах [-1] и [1], в реальности могут соответствовать ситуации, когда сдвиг обусловлен не реальной задержкой, а выбором начала суток в 0 UT (universal time) вместо, например, 0 LT (local time) или 12 LT. Расположение большинства значений сдвига, соответствующего максимуму корреляционной функции, указывает на глобальный характер как взаимодействия узлов, так и внешнего влияния на ионосферу.

На следующем этапе исследования нами были построены сети (графы) с выбранным порогом наличия связи.

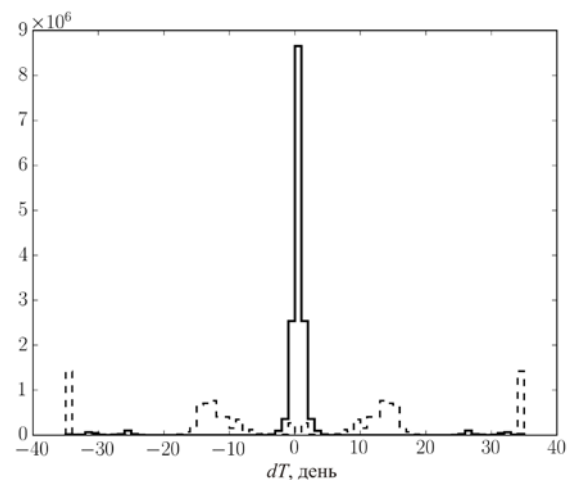


Рис. 3. Распределение временных сдвигов, при которых наблюдается максимум по абсолютной величине ККФ между рядами. Сплошная кривая — выборка для ККФ с положительным максимумом, штриховая — с отрицательным

СТЕПЕНЬ ВЗАИМОСВЯЗИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ ИОНОСФЕРЫ

На рис. 4 плотностью заливки представлено число связей (так называемая степень — deg) для каждого узла сети, т. е. число узлов карты GIM, с которыми для текущего узла достигнут заданный уровень корреляции: панель *a* — слабая связь; панель *б* — сильная связь. Можно видеть (рис. 4, *a*), что выделяются три основных региона с границей по $\pm 14^\circ$ геомагнитной широты (MLat — magnetic latitude): регион экваториальной аномалии [Appleton, 1954], Северное и Южное полушария. Внутри регионов среднее число связей с другими узлами близко. В Северном полушарии на юге Северной Америки выделяется регион, который характеризуется малым числом связей. Этот регион захватывает часть Мексиканского залива, Атлантического океана и достигает 50° MLat.

Анализ числа сильных связей (рис. 4, *б*) показывает значительную асимметрию Северного и Южного полушарий. Частично это может быть связано с методикой построения карт GIM. В Южном полушарии имеется меньшее число станций, используемых для построения карт GIM. В результате интерполяции данных узлы связаны друг с другом сильнее. Заметим, что это верно только отчасти, так как в регионе юга Африки и Южной Америки станций вполне достаточно, однако количество сильных связей для узлов в этом регионе довольно значительное. Кроме того, если бы большое число связей было только эффектом построения карт, то и регион Австралии также должен был бы характеризоваться большим числом связей.

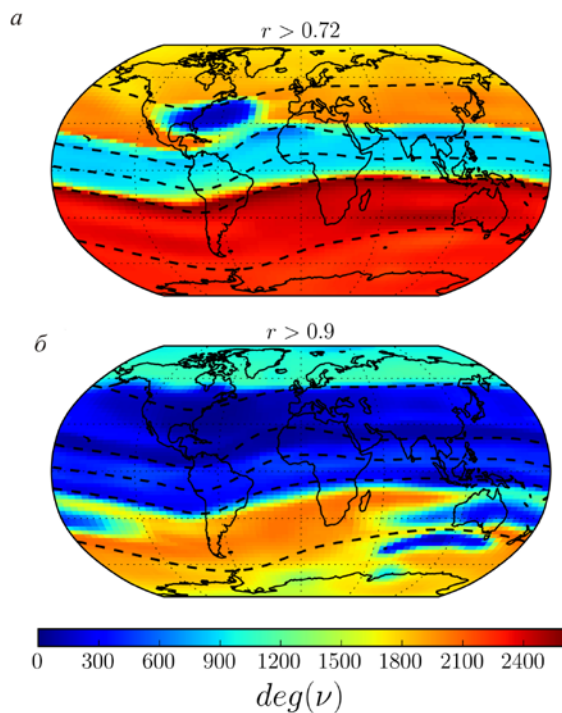


Рис. 4. Пространственное распределение числа связей каждого узла: *a* — порог $r > 0.72$ (слабая связь), *б* — порог $r > 0.9$ (сильная связь). Штриховыми линиями нанесены геомагнитный экватор и геомагнитные параллели ($\pm 14^\circ$ MLat, $\pm 50^\circ$ MLat).

Для более детального выяснения механизма влияния методики построения карт необходимо рассмотреть, какие именно узлы сети взаимодействуют между собой.

На рис. 5 для узлов в Северном (72.5° N, 150° E) и Южном (-82.5° N, 0° E) полушариях представлено, с какими из узлов сети у них имеются слабые (*a*, *б*) и сильные (*в*, *г*) связи. Выбранный узел отмечен крупной белой точкой, узлы, с которыми имеются связи, обозначены мелкими точками. Фоном показано пространственное распределение числа связей, представленное на рис. 4.

Можно видеть (рис. 5, *б*, *г*), что узел на Южном полюсе характеризуется слабым уровнем связи со всем Южным полушарием и сильным уровнем связи с большей частью узлов в Южном полушарии. Это же справедливо для узла в Северном полушарии (рис. 5, *a*, *в*). В слабом уровне связей в Северном полушарии обособленно стоит регион юга Северной Америки. Кроме того, уровень сильной связи между узлами Северного полушария ограничен Арктическим регионом (область выше $+50^\circ$ MLat). Таким образом, узлы в Арктическом регионе очень сильно связаны друг с другом и гораздо слабее с узлами в средних широтах.

Достаточно хорошее согласование изменений ПЭС имеет место для экваториальной ионосферы (рис. 6, *a*, *в*). При этом в данной области связь носит в целом слабый характер. Сильная связь наблюдается только для небольших областей (рис. 6, *б*).

На рис. 6, *б*, *г* представлены узлы, с которыми центральный узел в южной части Северной Америки (отмечен крупной белой точкой) имеет сильные связи. Можно видеть, что внутри выделенной области узлы характеризуются слабой связью (сильная связь в этой области наблюдается между близко расположенными узлами) и практически не связаны с остальной ионосферой.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с использованием теории графов изучена связь изменений ионосферной динамики в регионах. Распределение значений максимумов функций корреляции аномалии ПЭС имеет сложный характер и позволяет выделить два уровня взаимосвязи между регионами — сильную ($r > 0.9$) и слабую ($r > 0.72$) связь.

Выявлено, что ионосфера Арктического региона характеризуется сильной связью выше 50° MLat. Для Южного полушария область сильной связи гораздо больше. Слабая связь между узлами характерна для всего Южного полушария.

На юге Северной Америки имеется область, изменения ПЭС в которой коррелированы друг с другом. При этом их динамика значительно отличается от соответствующей динамики в остальной среднеширотной ионосфере Северного полушария. Схожая по свойствам область имеется в Южном полушарии в австралийском секторе. Стоит отметить, что данные области не совпадают с известными ионосферными аномалиями, такими как якутская аномалия или аномалия моря Уэдделла [Klimenko et al., 2015], чего можно было бы ожидать.

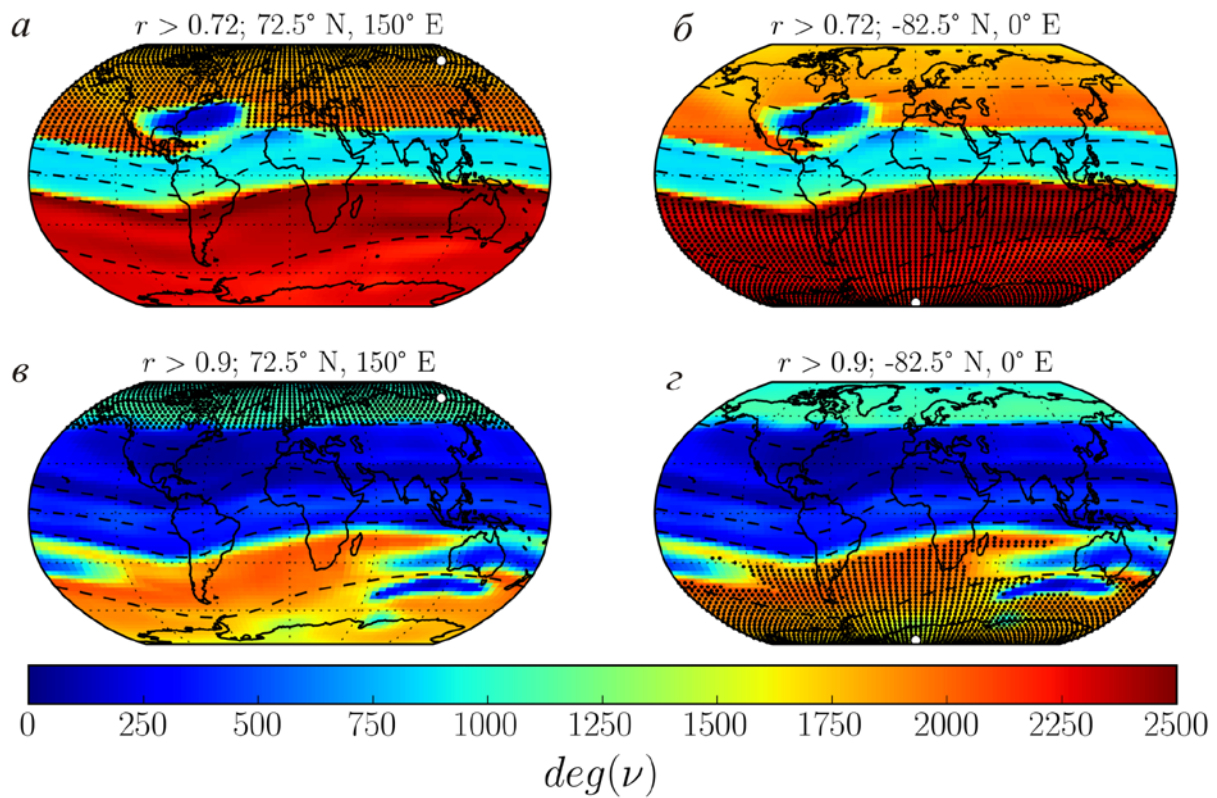


Рис. 5. Взаимосвязь узлов в Северном (*a*, *в*) и Южном (*б*, *г*) полушариях: *a*, *б* — слабая связь, *в*, *г* — сильная связь. Крупной белой точкой на каждой панели отмечен выбранный для примера узел; мелкими точками — узлы, с которыми он связан

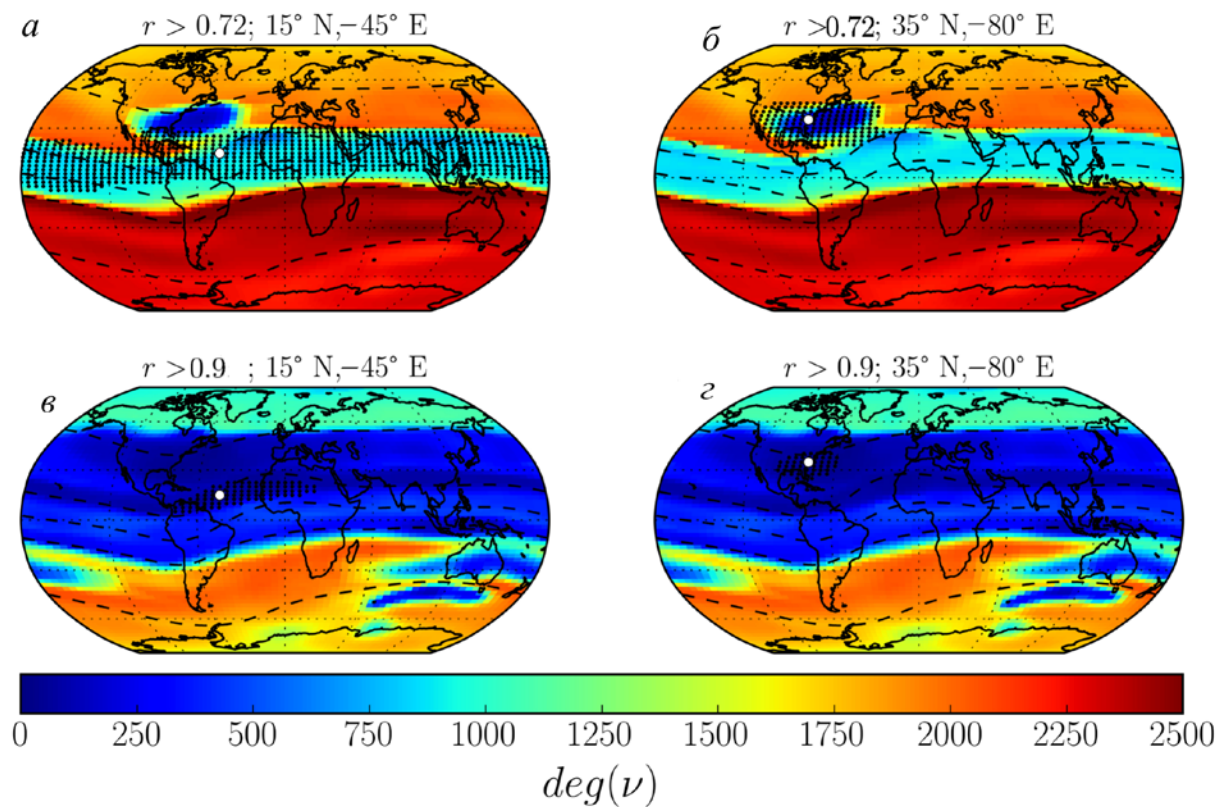


Рис. 6. Взаимосвязь узлов в экваториальной области (*a*, *в*) и регионе юга Северной Америки (*б*, *г*): *a*, *б* — слабая связь; *в*, *г* — сильная связь. Крупной белой точкой на каждой панели отмечен выбранный для примера узел; мелкими точками — узлы, с которыми он связан

Может ли эта область на графе быть артефактом, связанным с особенностями построения карт GIM CODE или плотностью распределения по поверхности Земли станций GPS/ГЛОНАСС, используемых для построения карт GIM? Хотя в Северной Америке на территории США расположена одна из самых плотных в настоящее время сетей станций GPS/ГЛОНАСС, далеко не все станции используются при построении карт. Из-за большой ресурсоемкости для расчета карт GIM используется разреженная сеть. В результате плотность сетей в американском и европейском секторах сопоставима. Стоит заметить, что регион, где наблюдается аномалия, расположен вблизи материка, следовательно, ионосфера в этом регионе зондируется наклонными лучами «приемник–спутник», т. е. плотность сетей, по всей видимости, не может являться причиной появления артефакта на графе. Чтобы выяснить, чем является данная особенность графа: артефактом, обусловленным методикой построения карт GIM, или отражением аномальных свойств ионосферы, — мы провели расчеты для карт GIM еще одной лаборатории (Grup Universitat Politècnica de Catalunya — UPCG). В UPCG используется двухслойная модель ионосферы с переменной высотой [Hernández-Pajares et al., 1999], существенно отличающаяся от модели тонкого слоя на заданной высоте, используемой CODE. Аномальная область с особенной ионосферной динамикой в регионе Северной Америки присутствует на графах, полученных по данным обеих лабораторий. Следовательно, можно заключить, что данная область не является артефактом и ее появление обусловлено реальными физическими механизмами в ионосфере.

По данным, представленным в [Wang et al., 2010], можно видеть, что в этой области наблюдаются наибольшие ионосферные эффекты во время магнитных бурь. С этим может быть связан факт низкого значения корреляции с остальными регионами. Однако этот факт может быть справедлив только для бурь, рассматриваемых в [Wang et al., 2010]. Кроме того, вопрос о физической причине усиления эффектов остается открытым.

Географически данная изолированная область располагается в области формирования основной ветви теплого течения Гольфстрим, однако по размеру она значительно превышает область формирования основной ветви Гольфстрима. В работе [Bufton, 1984] было показано, что над зоной Гольфстрима увеличивается концентрация углекислого газа. В целом особенности температурного режима и нейтрального состава атмосферы могут приводить к особенностям в динамике электронной концентрации, хотя в случае такого механизма более вероятно было бы регистрировать аномалию вдоль всего Гольфстрима. Для выявления реального механизма формирования изолированной области, характеризующейся собственной ионосферной динамикой, необходимы дальнейшие исследования.

В настоящей работе мы не останавливаемся на особенностях локального воздействия во время экстремальных событий в ионосфере, таких как магнитные бури или стратосферные потепления. Дан-

ные задачи представляют собой предмет дальнейших исследований.

Авторы искренне благодарны рецензентам за замечания, позволившие значительно улучшить данную статью. Авторы благодарят центры CODE и UPCG за данные карт GIM. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (14-37-00027).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998. V. 60, N 12. P. 1205–1223.
- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Yasyukevich Yu.V., et al. Response of global and regional ionosphere electron content to solar activity changes // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008. V. 48, N 2. P. 187–200.
- 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 and Space Climate.* 2013. V. 3. A27.
- Appleton E.V. The anomalous equatorial belt in the F2-layer // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1954. V. 5. P. 348–351.
- Astafyeva E. I., Afraimovich E. L., Oinats A.V., et al. Dynamics of global electron content in 1998–2005 derived from global GPS data and IRI modeling // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. P. 763–769. DOI: 10.1016/j.asr.2007.11.007.
- Bergeot N., Chevalier J.-M., Bruyninx C., et al. Near real-time ionospheric monitoring over Europe at the Royal Observatory of Belgium using GNSS data // *J. Space Weather and Space Climate.* 2014. V. 4. A31.
- Bufton J.L. Evidence for atmospheric carbon dioxide variability over the Gulf Stream // *Geophys. Res. Lett.* 1984. V. 11, N 11. P. 1141–1143.
- Guez O., Gozolchiani A., Berezin Y., et al. Climate network structure evolves with North Atlantic Oscillation phases // *Europhys. Lett.* 2012. V. 98. P. 38006. DOI: 10.1209/0295-5075/98/38006.
- Gulyaeva T.L., Arikani F., Hernandez-Pajares M., Veselovsky I.S. North-south components of the annual asymmetry in the ionosphere // *Radio Sci.* 2014. V. 49. P. 485–496. DOI:10.1002/2014RS005401.
- Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1999. V. 61. P. 1237–1247.
- Huang L., Wang J., Jianga Y., et al. A preliminary study of the single crest phenomenon in total electron content (TEC) in the equatorial anomaly region around 120° E longitude between 1999 and 2012 // *Adv. Space Res.* 2014. V. 54, N 11. P. 2200–2207. DOI:10.1016/j.asr.2014.08.021.
- Jakowski N., Béniguel Y., DeFranceschi G., et al. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques // *J. Space Weather and Space Climate.* 2012. V. 2. A22.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., et al. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55. P. 2020–2032.
- Kunitsyn V.E., Nesterov I.A., Padokhin A.M., Tumanova Yu.S. Ionospheric radio tomography based on the GPS/GLONASS navigation systems // *J. Communications Technology and Electronics.* 2011. V. 56, N 11. P. 1269–1281.
- Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasyukevich Yu., Padokhin A. Investigation of SBAS L1/L5 signals and their application to the ionospheric TEC studies // *Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2015. V. 12, N 3. P. 547–551. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2350037.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.

Newman M.E.J. The structure and function of complex networks // *SIAM Rev.* 2003. V. 45, N 2. P. 167–256. DOI: 10.1137/S003614450342480.

Ping J., Kono Y., Matsumoto K., et al. Regional ionosphere map over Japanese Islands // *Earth Planets Space.* 2002. V. 54. P. e13–e16.

Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in Eastern Siberia region // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 120. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.

Saito A., Fukao S., Miyazaki S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3079–3082. DOI: 10.1029/98GL52361.

Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // *Proc. IGS AC Workshop.* Darmstadt, Germany. February 9–11. 1998. P. 307–320.

Tsonis A.A., Roebber P.J. The architecture of the climate network // *Physica A.* 2004. V. 333. P. 497–504.

Tsonis A.A., Swanson K.L. Topology and predictability of El Niño and La Niña Networks // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. 228502.

Wang W., Lei J., Burns A.G., et al. Ionospheric response to the initial phase of geomagnetic storms: Common features // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A07321. DOI: 10.1029/2009JA014461.

REFERENCES

Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998, vol. 60, no. 12, pp. 1205–1223.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Yasukevich Yu.V., et al. Response of global and regional ionosphere electron content to solar activity changes. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008, vol. 48, no. 2, pp. 187–200.

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 and Space Clim.* 2013, vol. 3, A27.

Appleton E.V. The anomalous equatorial belt in the F2-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1954, vol. 5, pp. 348–351.

Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Oinats A.V., et al. Dynamics of global electron content in 1998–2005 derived from global GPS data and IRI modeling. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, pp. 763–769. DOI: 10.1016/j.asr.2007.11.007.

Bergeot N., Chevalier J.-M., Bruyninx C., et al. Near real-time ionospheric monitoring over Europe at the Royal Observatory of Belgium using GNSS data. *J. Space Weather and Space Clim.* 2014, vol. 4, A31.

Buften J.L. Evidence for atmospheric carbon dioxide variability over the Gulf Stream. *Geophys. Res. Lett.* 1984, vol. 11, no. 11, pp. 1141–1143.

Guez O., Gozolchiani A., Berezin Y., Brenner S., Havlin S. Climate network structure evolves with North Atlantic Oscillation phases. *Europhys. Lett.* 2012, vol. 98, 38006. DOI: 10.1209/0295-5075/98/38006.

Gulyaeva T.L., Arikani F., Hernandez-Pajares M., Veselovsky I.S. North-south components of the annual asymmetry in the ionosphere. *Radio Sci.* 2014, vol. 49, pp. 485–496. DOI: 10.1002/2014RS005401.

Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1999, vol. 61, pp. 1237–1247.

Huang L., Wang J., Jianga Y., et al. A preliminary study of the single crest phenomenon in total electron content (TEC) in the equatorial anomaly region around 120° E longitude between 1999 and 2012. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 54, no. 11, pp. 2200–2207. DOI: 10.1016/j.asr.2014.08.021.

Jakowski N., Béniguel Y., DeFranceschi G., et al. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques. *J. Space Weather and Space Clim.* 2012, vol. 2, A22.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., et al. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, pp. 2020–2032.

Kunitsyn V.E., Nesterov I.A., Padokhin A.M., Tumanova Yu.S. Ionospheric radio tomography based on the GPS/GLONASS navigation systems. *J. Communications Technology and Electronics.* 2011, vol. 56, no. 11, pp. 1269–1281.

Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasukevich Yu., Padokhin A. Investigation of SBAS L1/L5 signals and their application to the ionospheric TEC studies. *Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2015, vol. 12, no. 3, pp. 547–551. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2350037.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements. *Radio Sci.* 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582.

Newman M. E. J. The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Rev.* 2003, vol. 45, no. 2, pp. 167–256. DOI: 10.1137/S003614450342480.

Ping J., Kono Y., Matsumoto K., et al. Regional ionosphere map over Japanese Islands. *Earth Planets Space.* 2002, vol. 54, pp. e13–e16.

Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 120, pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.

Saito A., Fukao S., Miyazaki S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, pp. 3079–3082. DOI: 10.1029/98GL52361.

Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere. *Proceedings of the IGS AC Workshop.* Darmstadt, Germany, February 9–11, 1998, pp. 307–320.

Tsonis A.A., Roebber P.J. The architecture of the climate network. *Physica A.* 2004, vol. 333, pp. 497–504.

Tsonis A.A., Swanson K.L. Topology and predictability of El Niño and La Niña networks. *Phys. Rev. Lett.* 2008, vol. 100, 228502.

Wang W., Lei J., Burns A.G., et al. Ionospheric response to the initial phase of geomagnetic storms: Common features. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A07321. DOI: 10.1029/2009JA014461.