

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАФОВ ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

¹Ю.В. Ясюкевич, ²И.В. Живетьев

USING GRAPH TECHNOLOGY FOR STUDYING THE IONOSPHERE

¹Yu.V. Yasyukevich, ²I.V. Zhivetiev

Одна из проблем физики ионосферы – взаимосвязь различных регионов ионосферы друг с другом. В работе рассмотрено использование технологии графов для изучения связи изменения ионосферной динамики в регионах. В качестве экспериментальных использовались данные глобальных ионосферных карт GIM лаборатории CODE за 2005–2010 гг. Распределение значений максимумов функций корреляции изменения полного электронного содержания в ионосфере (ПЭС) имеет сложный характер и позволяет выделить 2 уровня взаимосвязи между регионами: «сильная» связь ($r > 0.91$), «слабая» связь ($r > 0.76$). Ионосфера арктического региона сильно связана выше 50° MLat. Для южного полушария это область гораздо больше. Слабая связь характерна для всего южного полушария. На юге Северной Америки имеется область, в которой динамика ПЭС скоррелирована в различных узлах и практически нескоррелирована с динамикой в остальной ионосфере.

One of the key problems of the ionosphere physics is a problem of coupling the ionosphere of different regions. We suggest networks technology for studying the coupling of changing ionosphere dynamics in different regions. We used data of global ionosphere maps GIM produced by CODE for 2005–2010. Distribution of total electron content (TEC) changing cross-correlation function maximum value is not simple. This distribution allows two level of ionosphere coupling to be reveal: “strong” ($r > 0.91$) and “weak” ($r > 0.76$). Ionosphere of arctic region upper 50° MLat characterizes by “strong” coupling. For southern hemisphere similar region is bigger. “Weak” coupling is typical for all southern hemisphere. In the North America region there is an area where TEC dynamics is “strong” correlated inside and is not correlated with other regions of ionosphere.

Исследования сложных систем с помощью графов (или сетей) заняли прочное место во многих областях науки. В частности, для исследования нейтральной атмосферы сети используются на протяжении последнего десятилетия [Tsonis et al., 2003, Stolbova et al., 2015]. 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 и т. п. Определяя в предметной области «узлы» и находя между ними «связи» можно сформировать сеть. Исследуя характеристики сети можно получить новую информацию о коллективной динамике системы в целом, в данном случае об ионосфере.

В работе предложен метод исследования ионосферы на основе графов. В качестве экспериментальных используются данные глобальных ионосферных карт (Global ionospheric maps – GIM) [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/]. Карты GIM рассчитываются несколькими лабораториями по всему миру. Существуют систематические расхождения между картами, построенными различными лабораториями [Astafyeva et al., 2008], но общая динамика в целом схожа. В настоящей работе используются карты CODE (Швейцария).

Данные GIM расположены на сетке от -180° до 180° по долготе и от -87.5° до 87.5° по широте. Разрешение сетки составляет 5° по широте и 2.5° по долготе, общее количество ячеек – 5183. Каждая ячейка содержит данные о вертикальном полном электронном содержании (ПЭС) с двухчасовым временным разрешением. Элементарная ячейка GIM является узлом сети. В качестве исследуемого параметра выбрана «аномалия» ПЭС. Под «аномалией» здесь и далее понимается отклонение среднесуточного значения от среднегодового значения ПЭС. Среднегодовое значение для текущего дня рассчи-

тывается в окне ± 182 дня. Таким образом, за период с 2005 по 2015 гг. получилось 5183 рядов, длина каждого составила 2191 значение.

В качестве критерия наличия связи между двумя узлами используется значение корреляции между соответствующими рядами аномальных значений ПЭС. На рис. 1 представлено распределение максимальных значений кросскорреляционных функций r_{xv} для всех узлов. Можно видеть, что значения распределены до величины $r \approx 0.76$ достаточно равномерно. Далее начинается резкий рост, максимум $r \approx 0.96$, уменьшение максимума в $\sqrt{2}$ раз соответствует величине 0.91. На этом основании мы выделили следующие критерии наличия связи: $r_{xv} < 0.76$ – связь отсутствует; $r_{xv} > 0.76$ – присутствует по крайней мере «слабая» связь; $r_{xv} > 0.91$ – присутствует «сильная» связь. Определив критерии, мы построили две сети со «слабыми» и «сильными» связями.

На рис. 2 цветом представлено число связей (так называемая степень deg) для каждого узла

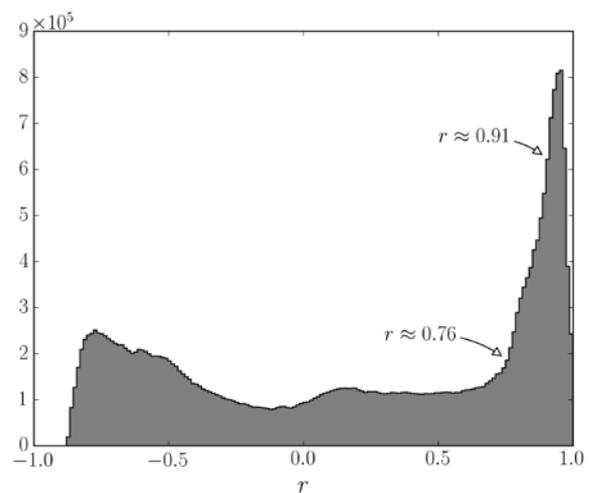


Рис. 1. Распределение максимальных значений кросскорреляционных функций аномалий ПЭС для всех узлов.

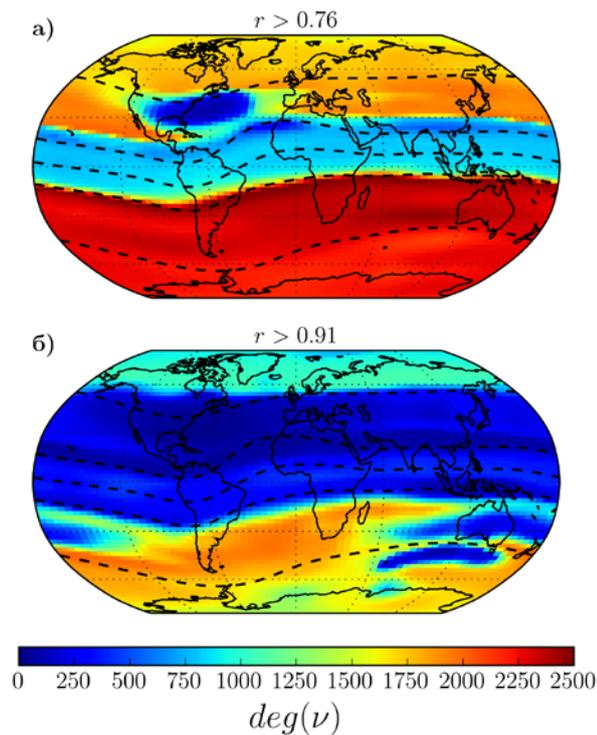


Рис. 2. Пространственное распределение количества связей для каждого из узлов сети: *a* – слабая связь, *б* – сильная связь. Пунктирными линиями нанесены геомагнитный экватор и геомагнитные параллели ($\pm 14^\circ$ MLat, $\pm 50^\circ$ MLat).

сети. Рисунок 2, *a* – слабая связь; *б* – сильная связь. На рис. 2, *a* можно видеть, что выделяются три основных региона с границей по $\pm 14^\circ$ MLat: регион экваториальной аномалии [Appleton, 1954], северное и южное полушарие. Внутри регионов среднее число связей с другими узлами близко. Также в северном полушарии на юге Северной Америки существует выделенный регион, который характеризуется малым числом связей. Этот регион захватывает часть мексиканского залива, атлантического океана и достигает 50° MLat.

Анализ числа сильных связей (рис. 2, *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, и в результате интерполяции данных узлы связаны друг с другом сильнее. Однако на юге Африки и Южной Америки число станций вполне достаточно, но количество сильных связей для узлов в этом регионе также велико. Кроме того, регион Австралии характеризуется числом связей, меньшим, чем в среднем по южному полушарию. Это может говорить о том, что плотность станций, не оказывает значительного влияния на характеристики сети.

Также на рис. 2, *б* мы можем видеть, что ионосфера арктического региона северного полушария сильно связана выше 50° MLat. В южном полушарии полярные широты выражены гораздо слабее, а при пороге $r \approx 0.76$ (рис. 2, *a*) практически все южное полушарие оказывается связанным.

На юге Северной Америки имеется область, изменения ПЭС в которой коррелированы друг с другом, при этом их динамика значительно отличается от соответствующей динамике в остальной среднеширотной ионосфере северного полушария. По данным, представленным в [Wang et al., 2010] можно видеть, что в этой области наблюдаются наибольшие эффекты во время магнитных бурь, проанализированных в указанной работе. С этим может быть связан факт низкого значения корреляции с остальными регионами.

Географически эта изолированная область располагается в области формирования основной ветви теплового течения Гольфстрим. Однако размер области достаточно большой и значительно превышает область формирования. В работе [Buffon, 1984] было показано, что над зоной Гольфстрима увеличивается концентрация углекислого газа. Температурные особенности и нейтральный состав атмосферы могут приводить и 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.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы стратегического развития ИГУ (№ P212-ОУ-033).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Appleton E.V. The anomalous equatorial belt in the F2-layer // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1954. V. 5. P. 348–351.
- Astafyeva E.I., 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.
- Buffon J.L. Evidence for atmospheric carbon dioxide variability over the Gulf Stream // *Geophys. Res. Lett.* 1984. V. 11. P. 1141–1143.
- Stolbova V., et al. Topology and seasonal evolution of the network of extreme precipitation over the Indian subcontinent and Sri Lanka // *Nonlin. Processes Geophys.* 2014. V. 21. P. 901–917.
- Tsonis A.A., Roebber P.J. The architecture of the climate network // *Physica A.* 2004. V. 333. P. 497–504.
- Wang W., et al. Ionospheric response to the initial phase of geomagnetic storms: Common features // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. A07321. DOI: 10.1029/2009JA014461.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия