

УДК 550.34:550.510.533

## ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ИОНОСФЕРУ

**И. Г. Захаров, А.М. Цымбал**

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина, e-mail: giz-zig@ukr.net  
Поступила в редакцию 25 октября 2017 г.

Рассмотрено влияние на ионосферу резких усиленных глобальной сейсмической активности. Для анализа использованы ежедневные данные за период 2007-2015 гг. о критической частоте области F2 в восточном и западном полушариях в сейсмически спокойных регионах и глобальные карты полного электронного содержания. Привлекались также данные о тропосфере и космической погоде. Обнаружен устойчивый отклик в ионосфере на глобальные литосферные процессы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ионосферные возмущения, критическая частота области F2, полное электронное содержание ионосферы, глобальная сейсмическая активность.

Розглянуто вплив на іоносферу різких підсилень глобальної сейсмічної активності. Для аналізу використані щоденні дані за період 2007-2015 рр. про критичну частоту області F2 у східній та західній півкулях у сейсмічно спокійних регіонах і глобальні карти повного електронного вмісту. Використано також дані про тропосферу і космічну погоду. Знайдено стійкий відгук в іоносфері на глобальні літосферні процеси.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** іоносферні збурення, критична частота області F2, повний електронний вміст іоносфери, глобальна сейсмічна активність.

Ionospheric effects of sudden increases in global seismic activity are considered according to daily data for 2007-2015 on the critical frequency of the F2 region in the eastern and western hemispheres in seismically quiet regions and global maps of the total electron content. The troposphere and cosmic weather data are also used. A stable response in the ionosphere to global lithospheric processes is obtained.

**KEY WORDS:** ionospheric disturbances, critical frequency of the F2 region, total electron content of the ionosphere, global seismic activity.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно рассматривается влияние землетрясений (ЗТ) и их предвестников на ионосферу [см., например, 1-3]. Следует отметить широкое использование для этих целей навигационных спутников, позволяющих контролировать ионосферные процессы в глобальном масштабе [4]. Полагают, что влияние ЗТ на ионосферу реализуется на основе двух основных механизмов: возбуждение и распространение от эпицентра ЗТ акустических и акустико-гравитационных волн и модификация электрических полей и токов электрическими процессами в литосфере. Характерные пространственные масштабы возмущений ионосферы накануне и после ЗТ составляют от 200-300 км до нескольких тысяч километров, а характерные временные масштабы – от нескольких минут до нескольких суток [2].

В большинстве исследований рассматривают отклик ионосферы на *отдельные* сильные ЗТ. В то же время, уже достаточно давно сформировались представления о ЗТ как о проявлении ("вершине айсберга") глобального непрерывного самоорганизующегося тектонического процесса с периодами накопления и релаксации тектонических напряжений [5-8 и другие работы]. Можно допустить, что глобальный характер сейсмической активности может обусловить некоторые глобальные перестройки в ионосфере, в том числе в сейсмически спокойных регионах, которые, в случае небольшой амплитуды, могут быть приняты за изменения фоновых значений параметров ионосферы. Поэтому для их регистрации необходимо использовать достаточно длинные ряды данных одновременно в нескольких разнесенных пунктах наблюдений и глобальные карты полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Такая постановка задачи оправдана также тем, что, в свете современных представлений, Земля и ее оболочки образуют единую открытую нелинейную динамическую иерархическую систему, в которой взаимодействие возможно, в том числе, за счет энергетически слабых (триггерных) механизмов [9].

Цель данной работы – оценить возможные эффекты глобальной сейсмической активности (ГСА) в ионосфере. Для этой цели в наибольшей мере подходят "изолированные" явления ГСА, развивающиеся после продолжительного относительно спокойного периода. Учитывая, что возможные эффекты ГСА проявляются на фоне постоянного влияния космической и тропосферной погоды на ионосферу, эти данные также включены в анализ.

### ДАнные И МЕТОды АНАЛИЗА

В работе использованы две базы данных: основная – с 1 апреля 2007 по декабрь 2008 года, дополнительная – три независимых ряда данных за 2010 – 2015 гг., в каждом от 9 до 13 сейсмически активных периодов. Основная включала полный набор ежедневных данных, перечисленных ниже, дополнительная использовалась для проверки надежности тех или иных результатов.

**Литосферные данные:** максимальная за сутки на земном шаре магнитуда ЗТ ( $M_{max}$ ) как индикатор ГСА. **Ионосферные данные:** критическая частота области F2 ( $f_0F2$ ) в 16 часов местного времени (это время, благодаря инерционности ионосферных процессов, лучше отражает типичные дневные условия в ионосфере) для двух ионосферных станций, расположенных на большом расстоянии друг от друга (для исключения роли локальных эффектов) – Милстон Хилл {42.6 N; 288.5 E} и Пругонице {50,0 N; 14,6 E}, а также станции Москва, Хабаровск и Боулдер в дополнительной базе данных; глобальные карты ПЭС ионосферы, по которым вычислялось планетарное значение ПЭС. **Тропосферные данные:** приземное атмосферное давление ( $P$ ) для Праги и Милстон Хилл (в непосредственной близости к пунктам ионосферных наблюдений). **Космическая погода:** плотность потока радиоизлучения Солнца  $F_{10,7}$ ; индекс геомагнитной активности  $A_p$ . Данные взяты со следующих сайтов: атмосферное давление – [www.gismeteo.ru](http://www.gismeteo.ru), ЗТ – <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>,  $f_0F2$  – [ulcar.uml.edu/DIDBase/](http://ulcar.uml.edu/DIDBase/), карты ПЭС – [www.aiub.unibe.ch/download/CODE/](http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/), космическая погода – [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/).

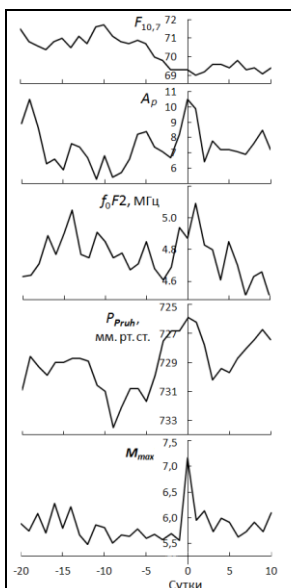
Исследования проводены с использованием метода наложенных эпох с проверкой достоверности результатов расчетов по непараметрическому критерию Фридмана [10]. Особенностью критерия Фридмана является то, что он вычисляется по ранжированным значениям исследуемого показателя и, таким образом, полностью определяется характером изменения и не зависит от абсолютных значений показателей. Как следствие, достоверность сходства и различия изменения величин определяется непосредственно по уровню статистической значимости  $p$ , тогда как стандартная ошибка среднего ("усы" на графиках) является неинформативной.

В качестве нулевых дат выбирались дни резкого увеличения  $M_{max}$  после продолжительного периода относительного затишья, превышающего время проявления предвестников согласно [11]:  $\Delta T [\text{годы}] = 10^{0.26M - 3.50}$ . Расчеты проведены от  $-20$ -х до  $+10$ -х суток, фактически от одного сейсмически активного периода до следующего.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменения максимальной магнитуды  $M_{max}$  по данным за 2007-2008 гг. показаны на рис. 1, 2 (нижний график). В целом, исследуемые интервалы, кроме активного периода после нулевой даты, охватывают спокойный период до нулевой даты и период менее существенного предшествующего усиления ГСА вблизи  $-15$ -х суток.

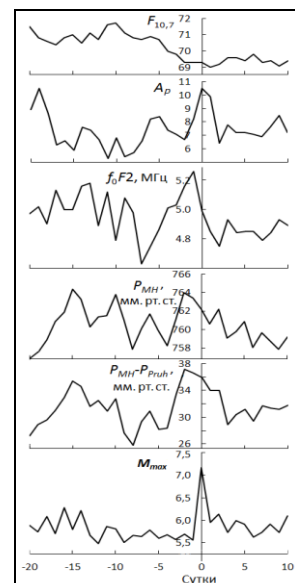
Изменения критической частоты области F2 ( $f_0F2$ ) на станции Пругонице (рис. 1), несмотря на



**Рис. 1.** Вариации  $f_0F2$  на ст. Пругонице. Показаны факторы воздействия на ионосферу "сверху" и "снизу".

изрезанность кривой, демонстрируют два очевидных максимума, приуроченных к периодам повышенной ГСА вблизи  $-15$ -х и нулевых суток. Учитывая зависимость ионосферы от космической погоды и состояния тропосферы, на рис. 1 приведены также изменения солнечного ( $F_{10,7}$ ) и геомагнитного ( $A_p$ ) индексов и изменения приземного атмосферного давления  $P$ . Изменения СА невелики: согласно [12], соответствующие изменения ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца можно оценить в 2 – 3 %. Уровень геомагнитной активности (ГМА) также был низким: максимальное значение индекса  $A_p$  за все рассмотренные периоды только в двух случаях вдали от нулевой даты едва превысило уровень  $A_p = 27$  ( $K_p = 4_0$ ), который обычно рассматривают как граничный между суббуревыми и возмущенными условиями. Как следствие, несмотря на малую амплитуду максимумов  $f_0F2$  (менее 0,4 МГц), объяснить их изменениями СА и ГМА не представляется возможным.

Изменения  $f_0F2$  на станции Милстон Хилл (рис. 2) также демонстрируют два очевидных максимума, приуроченных к периодам повышенной



**Рис. 2.** Вариации  $f_0F2$  на ст. Милстон Хилл. Показаны факторы воздействия на ионосферу "сверху" и "снизу".

ГСА, при этом основной максимум наблюдается накануне усиления ГСА. Несмотря на изрезанность кривых, видно, что изменения  $f_0F2$  на противоположных частях земного шара подобны и в обоих случаях не следуют за изменениями СА и ГМА. Основное различие касается более раннего роста  $f_0F2$  накануне нулевой даты в Милстон Хилл, сменившееся быстрым уменьшением  $f_0F2$ , когда значения  $f_0F2$  в Пругонице еще оставались высокими. Возможно, некоторую роль в это могли внести изменения ГМА при условии, что в Пругонице лучше проявились изменения в ионосфере, характерные для положительной фазы ионосферной бури (увеличение  $f_0F2$  за счет подъема области F2 на большие высоты направленным на юг ветром), а в Милстон Хилл – для отрицательной (изменение состава нейтральной ионосферы), но нужно учитывать, что локальный максимум ГМА был низким не только в среднем, но и для всех отдельных периодов: вблизи нулевой даты  $A_{Pmax} = 21$ .

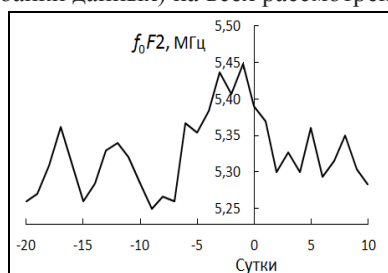
Изменения  $P$  в Пругонице (рис. 1) также имеют два локальных экстремума: накануне усиления ГСА происходит уменьшение  $P$ , которое несколько опережает экстремумы в ионосферных данных. Поражает устойчивость этого явления: уменьшение атмосферного давления наблюдалось накануне всех 10 рассмотренных случаев резкого роста ГСА, при этом в 5 случаях этот минимум был наибольшим среди всех за один месяц (от  $-20$  до  $+10$  суток), в четырех – сопоставим с величиной минимумов вдали от нулевой даты, и только в одном случае был меньше других минимумов. Анализ отдельных активных периодов также показал, что минимум  $P$  смещается на 3 – 4 суток на более раннее время при увеличении  $M_{max}$ .

Изменения  $P$  в Милстон Хилл (рис. 2) также имеют два локальных экстремума (в том числе имеется слабая тенденция к смещению положения максимума в зависимости от магнитуды ЗТ), но почти в противофазе к изменениям  $P$  в Пругонице, при этом разность средних давлений  $P_{Prub} - P_{MH}$  (условно примем ее за разность давлений в восточном и западном полушарии) накануне усиления ГСА испытывала скачок на 10 мм. рт. ст. (рис. 2). Такие изменения давления могли быть обусловлены межполушарными потоками воздуха, которые уже давно рассматривают как один из триггеров ЗТ в некотором сейсмоактивном регионе (см., например, [13]), однако в данном случае мы рассматриваем ГСА. Конечно же, значения давления в двух пунктах наблюдения не дают полной картины изменения давления на земном шаре и не позволяют сделать однозначных выводов, однако можно допустить, что глобальная атмосферная циркуляция (ГАЦ) и ГСА связаны между собой. Одним из механизмов связи ГСА и ГАЦ может выступать неравномерность вращения Земли.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В обсуждении, кроме результатов расчетов для основной базы данных, будут активно использоваться результаты, полученные с использованием дополнительного банка данных.

По данным за 2010 – 2015 гг., максимум  $f_0F2$  вблизи нулевого дня присутствует во всех без исключения расчетах. Средние изменения  $f_0F2$  по всем имеющимся данным (основной и дополнительный банки данных) на всех рассмотренных станциях представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Средние изменения  $f_0F2$  за 2007 – 2015 гг., суммарное ( $N = 79$ ) при резком изменении ГСА

В анализе также использовались глобальные карты ПЭС за 2015 г., по которым вычислены средние по земному шару изменения ПЭС вблизи резкого роста ГСА (рис. 4). Такие данные как нельзя лучше подходят для оценки возможных глобальных эффектов. Видно, что накануне нулевой даты наблюдается значительный рост ПЭС, который заметно превышает изменения, которые могли быть вызваны СА. Отметим также очевидное сходство изменений ПЭС и средних изменений  $f_0F2$  (рис. 3 и 4).

Как следует из рис. 1 и 2, вариации  $f_0F2$  также согласуются с изменениями  $P$  на той же станции, что является подтверждением ранее полученных результатов [14]. Эта связь более очевидна в минимуме СА и проявляется лишь как тенденция на фоне более сильных вариаций космических данных вблизи максимума 11-летнего солнечного цикла.

Изменения СА по данным за 2008 г. (вблизи минимума 11-летнего цикла СА) были незначительны и имели максимум вдали от нулевой даты; во всех других независимых группах расчетов максимум СА был вблизи нулевой даты (см., как пример, рис. 4). Однако, только 60 – 75 % отдельных усилений СА согласовывались с увеличениями ГСА и обеспечивали согласованность временных вариаций этих величин в среднем. Следовательно, изменения СА не могут выступать триггером всех без исключения ЗТ. Одновременно недостаточно устойчивый рост СА вблизи нулевых дат не мог обусловить в полной мере установленное увеличение  $f_0F2$  и ПЭС.

В целом, связь ионосферы с процессами в тропосфере и литосфере более очевидна в минимуме 11-летнего цикла СА, тогда как при высоком уровне СА влияние "снизу" менее заметно. Можно



**Рис. 4.** Средние изменения глобального ПЭС и индекса солнечной активности вблизи резкого усиления ГСА в 2015 г.

констатировать также частую (хотя и частичную – с учетом амплитуды эффектов) синхронизацию процессов в системе литосфера – тропосфера – ионосфера – магнитосфера, когда сходные временные вариации рассмотренных параметров наблюдаются одновременно в нескольких геосферах.

Мы не рассматриваем физические механизмы связей, однако считаем необходимым обратить внимание на один из возможных механизмов. Хорошо известна (см., например, [15]) роль выхода на поверхность радона и других газов в области подготовки и реализации землетрясения. Известно также, что этот процесс носит глобальный характер [16]. Важной особенностью процесса глубинной дегазации является его неравномерность как во времени, так и в пространстве. Основной поток глубинных восстановленных газов разгружается в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов. Можно ожидать, что эти и другие процессы могут привести к изменениям проводимости нижних слоев тропосферы и глобальной электрической цепи в планетарном масштабе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ с использованием ежедневных данных показывает обоснованность такого понятия как глобальная сейсмическая активность и его связи с процессами в ионосфере. Установлено возрастание критической частоты области F2 при резком усилении ГСА после продолжительного спокойного периода. Несмотря на небольшую амплитуду (не более чем на 0,5 МГц), эффект достаточно устойчив и проявляется почти одновременно на ионосферных станциях, расположенных в восточном и западном полушариях, а также в планетарных значениях ПЭС. Устойчивый эффект получен также в изменениях приземного атмосферного давления при наличии некоторых особенностей в восточном и западном полушариях, что указывает на возможную роль межполушарных потоков воздушных масс в усилении ГСА. Оба эффекта более очевидны при низком уровне СА. При высоком уровне СА усиление сейсмической активности происходит, как правило, на фоне усиления солнечной активности, что затрудняет установление источника возмущения в ионосфере и тропосфере. Скорее всего, одновременно реализуется несколько различных связей между геосферами, частично синхронизированных изменениями космической погоды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Y., Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2009. – V. 34, No. 6-7. – P. 485–495.
2. Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V. On recent physical models of lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling before earthquakes // *Natural hazard and Earth system sciences*. – 2007. 0000:0001.12.
3. Tanimoto T., Heki K., Artru-Lambin J. Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere // *Treatise on Geophysics*, 2<sup>nd</sup> edition. – Oxford: Elsevier, 2015. – Vol 4. – P. 421-443.
4. Shuanggen Jin, Giovanni Occhipinti, Rui Jin. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics // *Earth. Science Reviews*. – 2015. – V. 147. – P. 54–64.
5. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1992. 230 с.
6. Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н. Ротационная геодинамическая модель // *Методы изучения, строение и мониторинг литосферы*. – Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1998. – С. 163-165.
7. Фридман А.М., Поляченко Е.В., Насырканов Н.Р. О некоторых корреляциях в сейсμοдинатике и двух компонентах сейсмической активности Земли // *Успехи физ. наук*. – 2010. – Т. 180, № 3. – С. 303-312.
8. Шуман В.Н. Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы // *Геофизический журнал*. – 2015. – Т. 37, № 2. – С. 38-55.
9. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // *Радиофизика и радиоастрономия*. Т. 8. № 1. С. 59–106. 2003.
10. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977. – 245 с.
11. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1991. – 224 с.
12. Казачевская Т.В., Нусинов А.А. Прогностическая модель коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1986. – Т. 15, № 2. – С. 593–596.
13. Гордиец Б.Ф., Марков М.Н., Шелепин Л.А. Солнечная активность и Земля. – М.: Знание, 1980. – 64 с.
14. Zakharov I.G. Ionospheric day-to-day variability and its coupling with processes in geospace, troposphere and lithosphere // *The scientific heritage*. – 2016. – V. 1, No. 6. – P. 9-16.
15. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes // *Sensours*. – 2007, – V. 7. – P. 1141-1158.
16. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация и глобальные катастрофы. – М.: "Геоинформмарк", 2002. – 250 с.