ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ
ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-56-65>
УДК 550.388.2

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ АВРОРАЛЬНЫХ СУББУРЬ
ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
В АРКТИКЕ

Л.В. ЕГОРОВА

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

eglar@aari.ru

Резюме

Проблема диагностики и прогнозирования характеристик полярной ионосферы может исследоваться с помощью изучения влияния магнитосферных возмущений на высокоширотную ионосферу. Нашей задачей было исследовать зависимость вариаций электронной концентрации F области ионосферы на субавроральных станциях вертикального зондирования (ВЗ) Соданкюла, Ловозеро и Горьковская от вариаций геомагнитного поля. Использовались данные AE и PC геомагнитных индексов во время суббурь зимой 2011–2012 гг. Для анализа применялся метод наложения эпох. В результате нашего исследования показано, что возмущение в электромагнитном поле сопровождается последующим усилением вариаций критических частот foF2, а значит, и электронной концентрации в авроральной и субавроральной ионосфере.

В результате исследования сделан вывод о том, что геомагнитные индексы AE и PC могут служить предикторами возмущений в ходе ионосферного параметра foF2 высокоширотной ионосферы в зимний сезон.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, магнитосфера, магнитная активность, PC-индекс, AE-индекс, геомагнитная возмущенность, критические частоты.

Для цитирования: Егорова Л.В. Анализ эффектов авроральных суббурь по данным вертикального зондирования ионосферы в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. Вып. 1. С. 56–65. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-56-65>.

Поступила 02.12.2019

После переработки 15.02.2020

Принята 21.02.2020

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF AURORAL SUBSTORMS
ON THE DATA OF IONOSPHERE VERTICAL SOUNDING
IN THE ARCTIC

LARISA V. EGOROVA

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

eglar@aari.ru

Summary

The problem of diagnosing and predicting the characteristics of the polar ionosphere can be investigated by studying the effect of magnetospheric disturbances on the high-latitude ionosphere. Our task is to investigate the dependence of the variations in the electron concentration F of the ionosphere region at the subauroral stations of vertical sounding (VS) Sodankyla, Lovozero and Gorkovskaya on variations in the geomagnetic field. The data of AE and PC of geomagnetic indices were used during substorms in the winter of 2011–2012. For analysis, the epoch overlapping method was used. As a result, it was shown that the perturbation in the electromagnetic field is accompanied by a subsequent amplification of variations during the critical frequencies f_oF_2 , and hence the electron concentration, auroral and subauroral ionosphere.

We conclude that the geomagnetic indices AE and PC can serve as predictors of disturbances during the ionospheric parameter f_oF_2 of the high-latitude ionosphere in the winter season.

An increase in the amplitude level of AE from 100 to 350 nT (and $PC > 2$) during the night hours of the winter season precedes an increase in the critical frequencies of the ionosphere F2 layer by an average of 30% of the median. An increase in the amplitude level of AE from 180 to 520 nT (and $PC > 2$) in the winter season in the afternoon precedes the positive or negative deviation of the critical frequencies of the ionosphere F2 layer from the median by a mean of 10%. The response of the high-latitude ionosphere of the F2 layer to variations in the AE and PC indices appears in the first hour after the maximum during geomagnetic indices, the delay of the maximum deviation from the median 1 hour at night and 3 hours in the afternoon at Lovozero station, at Sodankyla and Gorkovskaya is about 3 hours at night and weakly expressed during the day.

Keywords: high-latitude ionosphere, magnetosphere, magnetic activity, PC-index, AE-index, geomagnetic perturbation, critical frequencies.

For Citation: Egorova L.V. Analysis of the effects of auroral substorms on the data of ionosphere vertical sounding in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (1): 56–65. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-56-65>.

Received 12.02.2019

Revised 02.15.2020

Accepted 02.21.2020

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера в основном образуется под воздействием ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, но не только. На высокоширотную ионосферу влияют, в качестве дополнительного источника ионизации, энергичные частицы, выпадающие из магнитосферы [1]. Определенную роль в образовании ионосферы играет и электрическое поле магнитосферной конвекции [2]. Характерной особенностью субавроральной зоны является наличие главного ионосферного провала в условиях затененной ионосферы. Он расположен в интервале инвариантных (исправленных геомагнитных) широт $52\text{--}64^\circ$, наблюдается в ночные часы и является естественной границей между среднеширотной и авроральной ионосферой. Сложность диагностики и прогнозирования параметров полярной ионосферы состоит в том, что на фоне относительно спокойного регулярного хода ионосферных параметров временами наблюдаются аномалии или возмущения, которые существенно меняют распределение характеристик полярной ионосферы.

Во время геомагнитных возмущений усиливаются продольные токи, соединяющие магнитосферу с ионосферой, происходит выделение большого количества энергии — «джоулев нагрев»: перегретый газ поднимается на высоты F области и вызывает возмущения в ходе критических частот V_3 на высотах ионосферы на полярных станциях. Критические частоты f_oF_2 линейно связаны с электронной концентрацией слоев ионосферы [3]. Глобальные индексы геомагнитной актив-

ности AE, AL, AU, AO являются количественной мерой вариаций геомагнитного поля в авроральной зоне [4]. Их расчет проводится путем усреднения магнитных данных нескольких станций, результаты расчета описывают среднестатистическую ситуацию возмущенности в проводимости электрических полей, в продольных и горизонтальных токах в целом в авроральной зоне ионосферы Земли [5]. Задачей данной работы является изучение зависимости вариаций foF2 на субавроральных ст. Соданкюла, Ловозеро и Горьковская от вариаций геомагнитного поля во время суббурь по данным AE- и PC-индексов зимой 2011/12 г.

Совместный анализ градиентов критических частот ионозондов и индексов, характеризующих состояние магнитного поля Земли, может способствовать реализации задач диагностики и прогнозирования характеристик полярной ионосферы [4].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

С декабря 2011 г. ежечасные данные вертикального зондирования ионосферы, полученные на современной цифровой аппаратуре CADI, поступают для обработки в Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ) в реальном времени. Обработка ионограмм осуществляется в автоматизированном режиме в отделе геофизики АНИИ с использованием данных кода ИОНКА. Данные геомагнитного индекса AE поступают из международных сайтов данных. Индекс PC вычисляется по данным, полученным в реальном времени со станций Туле (Норвегия) и Восток в Антарктиде. Для статистических расчетов были выбраны ежечасные данные критических частот F2 области зимнего сезона 2011/12 г. Эти годы близки к году максимума солнечной активности (CA), $W = 128$ в декабре, 113 в январе и 58 в феврале. Для анализа применялся метод наложения эпох [6], были выбраны события, когда наблюдался резкий рост индекса PC > 2 . Им соответствуют случаи увеличения AE > 25 нТл. За ключевой час брался час, когда AE- и PC-индексы достигали максимального значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сопоставление вариаций критических частот foF2 с медианами при различных уровнях геомагнитной активности.

При сравнении вариаций ионосферных параметров трех станций вертикального зондирования (ВЗ) о. Хейса, Диксон, Соданкюла с вариациями магнитного индекса PC, характеризующего геоэффективную часть межпланетного магнитного поля (ММП), в работе [7] было выявлено, что PC-индекс может являться предиктором для диагностики уровня электронной концентрации полярной ионосферы [8, 9]. Рост уровня PC-индекса соответствует как положительным, так и отрицательным градиентам в ходе критических частот F области. В частности, при увеличении PC > 2 в зимний сезон в ночные часы наблюдается прирост уровня электронной концентрации на всех станциях. Задержка отклика ионосферы F области на вариации PC зависит от широты станции: на ст. о. Хейса — не превышает одного часа, на ст. Диксон — двух часов, на ст. Соданкюла — 1 час.

Поскольку AE-индекс характеризует возмущенность в проводимости электрических полей, в продольных и горизонтальных токах, интересно выяснить, как колебания уровня амплитуды AE связаны с вариациями параметров высокоширотной ионосферы для дальнейшего его использования в диагностике и прогнозировании ионосферного отклика на возмущения геомагнитного поля.

За период январь – февраль 2012 г. были выбраны 29 случаев, когда среднесуточный АЕ не превышал значения 125 нТл, и 13 случаев, когда этот уровень был выше 225, но ниже 450 нТл, чем отсекаются из анализа магнитные бури, к которым относятся возмущения с АЕ больше 500 нТл. Усредненный суточный ход этих кривых представлен на рис. 1.

В выборку отбирались те сутки, когда значений АЕ > 225 нТл и АЕ < 125 нТл было больше половины времени и среднесуточное значение АЕ выходило за пределы граничных значений.

Реконструированные ст. Горьковская ($\Phi = 60,23^\circ$) и Ловозеро ($\Phi = 63,3^\circ$) находятся, как и Соданкюла ($\Phi = 64^\circ$), в субавроральной зоне. Интересно выяснить, может ли АЕ-индекс так же, как РС-индекс, являться предиктором для диагностики уровня электронной концентрации на этих станциях. Для анализа используем данные критических частот F2 области за декабрь 2011 – февраль 2012 гг., лет близких к году максимума солнечной активности (СА), $W = 128$ в декабре, 113 в январе и 58 в феврале.

Процессы в авроральной ионосфере во время возмущенности магнитосферы (суббури), когда индекс АЕ > 225 нТл, отличается от поведения ионосферы во время спокойных условий (когда индекс АЕ < 125 нТл), что демонстрируется кривыми на рис. 2–4, которые представляют суточный ход критических частот foF2 и их медиан,

Рис. 1. Усредненный суточный ход индекса АЕ.

1 — для 29 случаев спокойного геомагнитного периода (АЕ < 125 нТл); 2 — для 13 случаев возмущенного геомагнитного периода ($450 > \text{АЕ} > 225$ нТл) за январь – февраль 2012 г.

Fig. 1. Average daily rate of AE-index.

1 — for 29 cases of quiet geomagnetic period (АЕ < 125 NT); 2 — for 13 cases perturbed geomagnetic period ($450 > \text{АЕ} > 225$ NT) for January – February 2012

а также усредненный ход foF2 для суток, когда AE < 125 и AE > 225, число таких событий (*n*) представлено на рис. 2.

Как видим, в случаях AE < 125 нТл медиана практически совпадает с усредненным ходом критических частот foF2, то есть со спокойным уровнем суточного хода на всех трех станциях за редким исключением: в 20 UT в Ловозере и в 22 UT в Соданкюле. В случаях AE > 225 нТл на всех станциях суточный ход foF2 превышает уровень медианы в январе и феврале ночью, причем в отдельных случаях в два раза, в среднем же на 30 %. Днем в январе foF2 выше, а в феврале ниже медианы, в среднем на 10 % (рис. 3).

Графики суточного хода foF2 выполнены по данным ручной интерпретации ионограмм. Как видим, ход критических частот типичен для зимних месяцев. В исследуемый

Рис. 2. Суточный ход критических частот foF2 и их медиан ст. Горьковская.

Верхний ряд: foF2 — тонкие линии, медиана — толстая линия; средний ряд: усредненные foF2 — кривая 1, медиана — кривая 2 для AE < 125; нижний ряд — для AE > 225

Fig. 2. The daily course of critical frequencies foF2 and their medians at Gorkovskaya station.

Top: foF2 — thin lines, median — thick line; middle part: averaged foF2 — curve 1, median — curve 2 for AE < 125; the lower part — for AE > 225

период было довольно много магнитовозмущенных дней, поэтому имеется большое количество случаев, когда на ионограммах отсутствуют отражения от слоя F2, что происходит из-за поглощения в области D (условие В) или экранирования спорадическим слоем Es (условие А). Объединять все зимние месяцы в один статистический ряд нельзя, ибо днем отклонения критических частот Δf_oF2 от медианы могут носить разный знак и при суммировании обнуляться, как происходит это в исследуемый период (рис. 4).

Таким образом, зимой ночью на субавроральных, так же как и на авроральных станциях [7], мы наблюдаем положительную фазу ионосферной бури, днем же — положительную или отрицательную в зависимости, вероятно, от уровня СА. Впрочем, этот вопрос нуждается в более тщательной проработке на больших статистических рядах данных.

Рис. 3. Суточный ход критических частот f_oF2 и их медиан ст. Ловозеро.

Верхний ряд: f_oF2 — тонкие линии, медиана — толстая линия; средний ряд: усредненные f_oF2 — кривая 1, медиана — кривая 2 для $AE < 125$; нижний ряд — для $AE > 225$

Fig. 3. The daily course of the critical frequencies f_oF2 and their medians at Lovozero station.

Top: f_oF2 — thin lines, median — thick line; middle part: averaged f_oF2 — curve 1, median — curve 2 for $AE < 125$; the lower part — for $AE > 225$

Рис. 4. Суточный ход критических частот $foF2$ и их медиан ст. Соданкюла.

Верхний ряд: $foF2$ — тонкие линии, медиана — толстая линия; средний ряд: усредненные $foF2$ — кривая 1, медиана — кривая 2 для $AE < 125$; нижний ряд — для $AE > 225$

Fig. 4. Daily variations of critical frequencies $foF2$ and median at Sodankyla.

Top: $foF2$ — fine lines, median thick line; middle part: averaged $foF2$ — 1 curve, the median curve 2 for $AE < 125$; the lower part is for $AE > 225$

2. Влияние вариаций AE- и PC-индексов на ход критических частот F области в ночной период зимы 2011–2012 гг.

Для анализа вариаций $foF2$ в зимний ночной период декабря 2011 – февраля 2012 гг., связанных с возмущениями в геомагнитном поле, были выбраны случаи резкого роста $PC > 2$. Им соответствуют случаи увеличения $AE > 225$ нТл. Анализ проводился методом наложенных эпох, за ключевой час брался час, когда PC- и AE-индексы достигали максимального значения. Надо сказать, что ход индексов AE и PC в каждом отдельном случае различается, однако в усредненном виде он схож, причем для данной выборки максимумы совпадают.

На рис. 5 приведен усредненный ход AE- и PC-индексов и соответствующие им кривые отклонений $foF2$ от медианы ($\Delta foF2$) для трех станций Соданкюла, Ловозеро и Горьковская. Видим, что PC-индекс растет в среднем от уровня 0, 5 до 3 ночью

Рис. 5. Усредненный временной ход геомагнитных и ионосферных параметров для 70 зимних событий.

a — AE, б — PC; в — $\Delta f_o F_2$ ст. Ловозеро, г — Соданкюла, д — Горьковская

Fig. 5. Averaged time series of geomagnetic and ionospheric parameters for 70 winter events.

a — AE, б — PC, в — $\Delta f_o F_2$ st. Lovozero, г — Sodankyla, д — Gorkovskaya

($n = 3-6$) и от 0,75 до 3,3 днем ($n = 34$), АЕ-индекс — от 100 до 350 нТл ночью ($n = 33$) и от 180 до 520 нТл днем ($n = 32$). К сожалению, во время геомагнитных возмущений F область ионосферы ст. Соданкюла и Ловозеро часто не наблюдается из-за поглощения в области D (условие B) или экранирования спорадическим слоем Es (условие A), поэтому для больших скачков в ходе PC и АЕ выделить значительное число случаев увеличения критической частоты затруднительно. Число случаев n , включенных в анализ, представлено на рис. 5.

Отклонение критической частоты foF2 от медианы ночью растет одновременно с ростом АЕ и достигает максимума через час после максимума в ходе АЕ (PC) на ст. Ловозеро, через 3 часа на ст. Соданкюла и Горьковская. Днем Δ foF2 падает на ст. Ловозеро одновременно с АЕ и достигает минимума через три часа после ключевого дня. На ст. Соданкюла Δ foF2 также падает, однако в меньшей степени, чем в Ловозере. На ст. Горьковская этот тренд еще менее выражен.

Поскольку мы имеем только ежечасные данные критических частот, то отклик ионосферы на вариации электромагнитного поля (АЕ и PC) можно наблюдать через промежуток времени кратный 1 часу. Нужны данные с меньшим шагом отсчета, чтобы судить о задержке более точно.

Нельзя утверждать, что уровень электронной плотности на высотах F2 связан однозначно с вариациями АЕ и PC, но, как правило, возмущение в электрическом поле сопровождается последующим усилением вариаций в ходе критических частот авроральной и субавроральной ионосферы.

Результаты приведенного анализа подтверждают закономерности, выявленные в работах [8, 9]. Вариации отклика параметров субавроральной ионосферы ст. Ловозеро и Горьковская на геомагнитные возмущения аналогичны вариациям на станциях о. Хейса, Диксон, Соданкюла. Наличие таких закономерностей не противоречит выводам, сделанным в работе [10].

ВЫВОДЫ

Геомагнитные индексы АЕ и PC могут служить предикторами возмущений F2 области высокоширотной ионосферы в зимний сезон.

1. Рост уровня амплитуды АЕ от 100 до 350 нТл (и PC>2) в ночные часы зимнего сезона предшествует росту критических частот слоя F2 ионосферы, в среднем на 30 % от медианы.

2. Рост уровня амплитуды АЕ от 180 до 520 нТл (и PC> 2) в зимний сезон днем предшествует положительному или отрицательному отклонению критических частот слоя F2 ионосферы от медианы, в среднем на 10 %.

3. Реакция высокоширотной ионосферы слоя F2 на вариации АЕ- и PC-индексов проявляется в первый час после максимума в ходе геомагнитных индексов, задержка максимума отклонения от медианы составляет на ст. Ловозеро 1 час ночью и 3 часа днем, на ст. Соданкюла и Горьковская около 3 часов ночью и слабо выражена днем.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках ЦНТП Росгидромета, тема 1.2.9.1.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников полярных станций, наблюдавших ионосферу, электрическое и магнитное поле в 2011–2012 гг.

Competing interests. I declare I have no competing interests.

Funding. This work was funded by the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP), project 1.2.9.1.

Acknowledgments. I thank the employees of the polar stations that observed the ionosphere, the electric and magnetic fields in 2011–2012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорошева О.В. Пространственно-временное распределение полярных сияний и их связь с высокоширотными геомагнитными возмущениями // Геомагнетизм и аэронавигация. 1961. Т. 1. № 5. С. 695–701.
2. Davis K. Review of recent progress in ionospheric predictions // Radio Sci. 1981. V. 16. № 6. P. 1407–1430.
3. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
4. Ионосферно-магнитные возмущения в высоких широтах / Под редакцией О.А. Трошичева. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 255 с.
5. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности: Справочное пособие. М.: Гидрометеиздат, 1977. 59 с.
6. Шерстюков Б.Г. Короткопериодные циклические изменения в нижней атмосфере и гелио-космические процессы. М.: Гидрометеиздат, 1986. 186 с.
7. Janzhura A., Troshichev O., Stauning P. Unified PC indices: Relation to the isolated substorms // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A09207. doi:10.1029/2006JA012132.
8. Vovk V.Ya., Egorova L.V. Relationship between variations in the characteristics of the high-latitude ionosphere and magnetic PC indices // Geomagnetism and Aeronomy. 2012. V. 52. № 3. P. 344–349.
9. Егорова Л.В. Связь магнитосферных возмущений с ионосферными в авроральной и субавроральной зонах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52. № 6. С. 800–806.
10. Danilov A.D. F2-region response to geomagnetic disturbances // J. Atmos. Solar – Terr. Phys. 2001. V. 63. № 2. P. 441–449.

REFERENCES

1. Horosheva O.V. Spatio-temporal distribution of auroras and their relationship with high-latitude geomagnetic disturbances. *Geomagnetizm i aeronomiya*. Geomagnetism and aeronomy. 1961, 1: 695–701. [In Russian].
2. Davis K. Review of recent progress in ionospheric predictions. *Radio Sci.* 1981, 16: 1407–1430.
3. Bryunelli B.Ye., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery*. Ionosphere physics. Moscow: Nauka, 1988: 527. [In Russian].
4. *Ionosferno-magnitnye vozmushcheniya v vysokikh shirotakh*. Ionospheric-magnetic disturbances at high latitudes. Troshichev O.A. (Eds). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986: 255. [In Russian].
5. Zabolotnaya N.A. *Indeksy geomagnitnoy aktivnosti (spravochnoye posobiye)*. Indices of geomagnetic activity (reference guide). Moscow: Gidrometeoizdat, 1977: 59 p. [In Russian].
6. Sherstyukov B.G. *Korotkoperiodnyye tsiklicheskiye izmeneniya v nizhney atmosfere i geliokosmicheskiye protsessy*. Short-period cyclic changes in the lower atmosphere and heliocosmic processes. Moscow: Gidrometeoizdat, 1986: 186 p. [In Russian].
7. Janzhura A., Troshichev O., Stauning P. Unified PC indices: Relation to the isolated substorms. *J. Geophys. Res.* 2007, 112: A09207. doi:10.1029/2006JA012132.
8. Vovk V.Ya., Egorova L.V. Relationship between variations in the characteristics of the high – latitude ionosphere and magnetic PC indices. *Geomagnetism and Aeronomya*. 2012, 52, 3: 344–349.
9. Egorova L.V. Relationships between magnetospheric and ionospheric disturbances in the auroral and subauroral zones. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012, 52, 6: 800–806.
10. Danilov A.D. F2-region response to geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Solar – Terr. Phys.* 2001, 63, 2: 441–449.