

В.И. Куркин, Н.М. Полех, М.А. Черниговская, Н.А. Абушенко

## Исследование влияния атмосферных процессов на ионизацию $F_2$ -слоя ионосферы

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 18.08.2006 г.

По данным, полученным на трассах наклонного зондирования Магадан–Иркутск и Норильск–Иркутск, отмечено резкое увеличение максимальных применимых частот в утренние и дневные часы в период с 24 по 26 сентября 2005 г. В это же время наблюдалось повышение ионизации на анализируемых станциях по данным вертикального зондирования.

Рассматриваемый временной период характеризуется спокойными геомагнитными условиями. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемых вариаций ионосферных параметров. В анализ были включены спутниковые данные по вертикальному распределению температуры в стратосфере–мезосфере зондом MLS (Microwave Limb Sounder), установленным на борту космического аппарата EOS Aura. Также использовались данные отношений концентраций атомарного кислорода к молекулярному азоту  $[O]/[N_2]$  на высотах нижней термосферы, полученные УФ-спектрометром пространственного сканирования GUVI (Global Ultraviolet Imager), установленным на борту спутника TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics). Поскольку электронная концентрация на высотах максимума слоя  $F_2$  ионосферы пропорциональна отношению  $[O]/[N_2]$ , выдвинуто предположение, что наблюдаемый эффект в ионосферных параметрах может быть связан с вариациями температуры и состава нейтральной атмосферы (возможно, в ходе сезонной перестройки атмосферы).

### Введение

Термосфера и ионосфера Земли являются наиболее изменчивой частью земной атмосферы. С одной стороны, они подвержены активному воздействию гелиофизических факторов (электромагнитному излучению Солнца, корпускулярным потокам частиц, магнитным полям), особенно во время магнитных возмущений, с другой стороны, на параметры термосферы и ионосферы оказывают большое влияние различные геофизические факторы (метеорологические, сейсмические события и др.).

Изменения атмосферных характеристик в нижней и средней атмосфере могут приводить к вариациям параметров на ионосферных высотах. Например, во время геомагнитных возмущений высыпания частиц значительно меняют газовый и ионный состав атмосферы и ионосферы, увеличивая его молекулярную составляющую. Эти возмущения в авроральных широтах усиливают нейтральный ветер, направленный к экватору, тем самым меняется содержание ионов и нейтральных частиц на средних широтах.

В обзорных работах [1–3] показана важность исследований влияния различного рода волновых движений, возникающих в стратосфере и тропосфере, на распределение параметров ионосферы на высотах 200–400 км, приведены корреляционные характеристики воздействия гравитационных и планетарных волн на изменения критических частот в  $F$ -области. На средних широтах в спокойных геомагнитных условиях, когда воздействие магнито-

сферных эффектов на характеристики ионосферы минимальны, фоновые параметры нейтральной атмосферы и ионосферы могут меняться ото дня ко дню в значительных пределах (до 15–20% и более), вызывая вариации характеристик ионосферного радиоканала. Поэтому при построении моделей атмосферы и ионосферы возникает различного рода неопределенности: с какими процессами можно связать такие вариации, каковы их количественные характеристики, которые можно было бы учесть при построении моделей. Решение этих вопросов является очень важной геофизической задачей.

В данной статье обсуждаются вариации характеристик наклонного зондирования, обусловленные изменениями ионосферы вдоль трассы распространения, и критических частот  $F_2$ -слоя в конечных пунктах трасс с точки зрения изменения параметров нейтральной атмосферы в период равноденствия в спокойных геомагнитных условиях при минимальной солнечной активности.

### Анализ данных наблюдений

В сентябре 2005 г. проводились исследования распространения радиоволн на трассах наклонного зондирования ионосферы в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Необходимость проведения таких исследований обусловлена тем, что длительные непрерывные наблюдения обеспечивают регистрацию характеристик в различных гелиогеофизических условиях и позволяют оценить вариации исследуемых параметров в зависимости от

изменения параметров среды распространения. Были задействованы трассы Магадан–Иркутск и Норильск–Иркутск. Протяженность среднеширотной трассы Магадан–Иркутск составляет 3000 км, длина трассы Норильск–Иркутск равна 2100 км. Геометрия этих трасс такова, что точка излучения Магадан и средние точки обеих трасс (районы Подкаменной Тунгуски и Якутска) имеют приблизительно одинаковую геомагнитную широту  $\sim 51^\circ$  с.ш., поэтому условия прохождения декаметровых радиоволн на этих трассах в значительной мере определяются состоянием субавроральной ионосферы и динамикой ее границ с изменением уровня магнитной возмущенности.

Как правило, в спокойных условиях на этой трассе наблюдалось одно- и двухскачковое распространение КВ-сигнала. В отдельных экспериментах наблюдались и моды большей кратности. Величины максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) можно рассчитать с погрешностью, определяемой точностью описания параметров ионосферы.

Во время возмущений картина усложняется: в дневные часы, как правило, наблюдаются пониженные значения МНЧ, а в вечерние и ночные часы регистрируются боковые отражения от северной стенки главного ионосферного провала (ГИП) с МНЧ, превышающими обычные медианные значения [4]. Время регистрации таких сигналов меняется в зависимости от границ главного ионосферного провала во время возмущений [4, 5].

В первой половине сентября наблюдения проводилась в условиях возмущенного магнитного поля Земли – магнитосферных бурь с длительной фазой восстановления. Они вызвали отрицательное возмущение в ионосфере (т.е. уменьшение электронной концентрации в  $F$ -области), и, как следствие, наблюдались понижение величин МНЧ в дневные часы и исчезновение отражений из-за поглощения в вечернее и ночное время. После 15 сентября 2005 г. геомагнитная обстановка стабилизировалась: магнитное поле стало спокойным. Поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см  $F_{10,7}$ , характеризующий ионизирующую способность Солнца, изменялся от 91 до 72 (в ед.  $10^{-22}$  Вт/(Гц · м<sup>2</sup>)). На рис. 1 приведены вариации геомагнитных параметров и наблюдаемые МНЧ для исследуемых трасс с 23 по 28 сентября.

На трассе Магадан–Иркутск отражения присутствовали практически в течение всех суток. МНЧ односкачкового мода менялись от 16,9 до 25,4 МГц. На трассе Норильск–Иркутск устойчивое прохождение радиосигналов наблюдалось также практически в течение всех суток. Можно отметить существенную роль влияния спорадических слоев на распространение КВ-сигнала в спокойных геомагнитных условиях, особенно в ночные и вечерние часы.

Особенностью распространения КВ-радиосигналов этого периода наблюдений является регистрация повышенных дневных значений МНЧ с 24 по 26 сентября, причем это отмечается на трассе Магадан–Иркутск и Норильск–Иркутск.

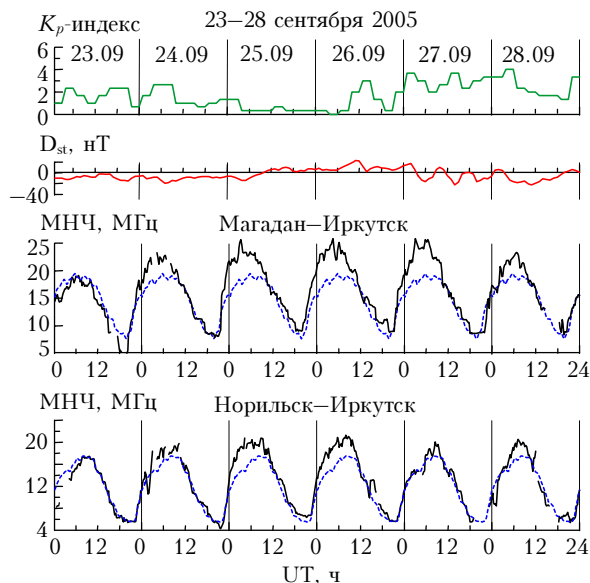


Рис. 1. Вариации геомагнитных параметров и наблюдаемые МНЧ для исследуемых трасс с 23 по 28 сентября 2005 г.

Из рис. 2 видно, что отрицательные отклонения, наблюдаемые в первой половине сентября, обусловлены магнитосферными возмущениями.

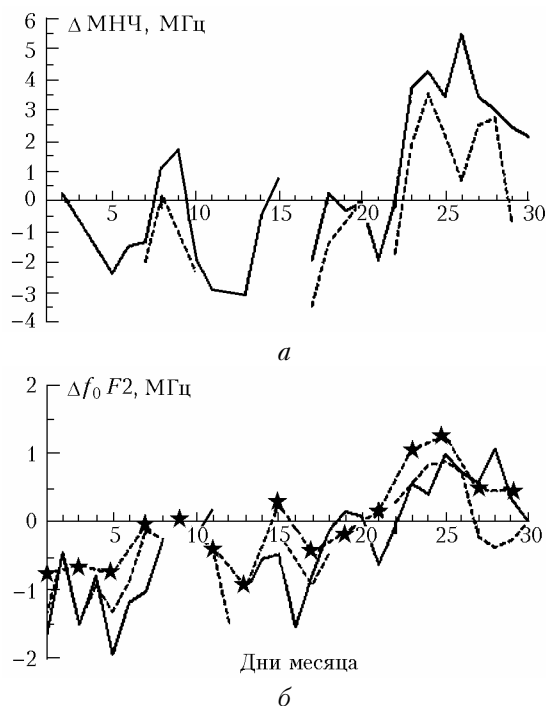


Рис. 2. Вариации отклонений полуденных значений МНЧ от их медианных значений на трассах Магадан–Иркутск (сплошная линия), Норильск–Иркутск (пунктирная) (а) и вариации отклонений критических частот для ионосферных станций Иркутск (сплошная линия), Якутск (штрихпунктирная), Магадан (линия с символами) (б) для сентября 2005 г.

После 22 сентября до 26 сентября отклонения положительные в течение нескольких суток, и, как показывают данные вертикального зондирования,

они сохраняются на относительно большой территории (более 2000 км), охватывающей регион Восточной Сибири и Дальнего Востока.

## Обсуждение результатов и выводы

1. Считается, что положительные возмущения в ионосфере (т.е. увеличение электронной концентрации в  $F$ -области) обусловлены ростом отношения концентраций атомного кислорода к молекулярному азоту  $[O]/[N_2]$ . Летом это отношение на высотах максимума  $F2$ -слоя меньше, зимой оно возрастает. Во время магнитных бурь величина отношения падает. Из рис. 3 видно, что магнитоспокойным условиям ( $A_p < 10$ ) соответствуют наибольшие величины отношения  $[O]/[N_2]$ .

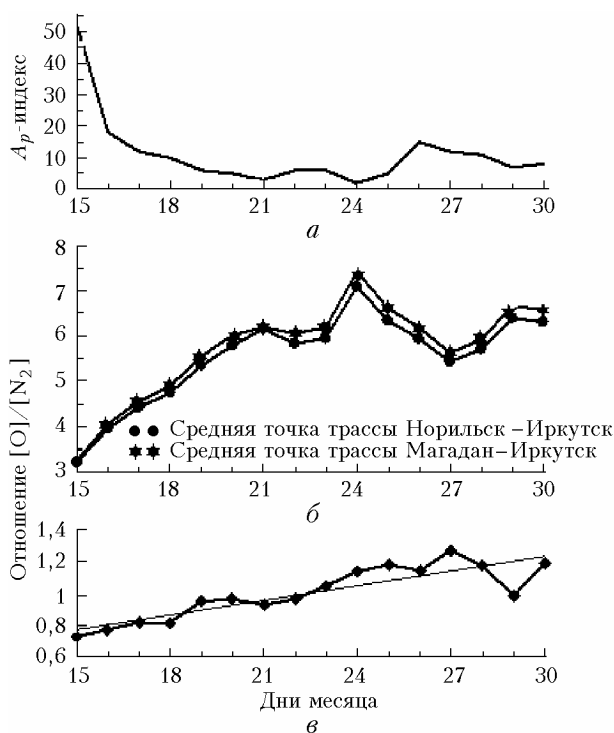


Рис. 3. Вариации среднесуточного магнитного планетарного  $A_p$ -индекса (а), среднесуточных значений отношения  $[O]/[N_2]$ , рассчитанных по модели MSIS-90 для высоты 300 км в средних точках трасс (районы Подкаменной Тунгуски и Якутска) (б), и спутниковые данные отношения  $[O]/[N_2]$  GUVI TIMED на высотах нижней термосферы (~100 км) для региона г. Иркутска (в) для второй половины сентября 2005 г.

На средних широтах после дня осеннего равноденствия происходит активная перестройка атмосферы (состава, термобарического и динамического полей) от летних условий к зимним. Это хорошо заметно по модельным расчетам (по Международной справочной модели MSIS-90) для начала и конца сентября. При одних и тех же значениях  $A_p$  величина отношения концентраций атомного кислорода к молекулярному азоту  $[O]/[N_2]$  в начале месяца ниже, чем в конце, т.е. отмечается явная тенденция увеличения этого отношения к концу

месяца. Данные модельных расчетов подтверждаются данными спутниковых измерений отношения  $[O]/[N_2]$  с помощью УФ-спектрометра пространственного сканирования GUVI (Global Ultraviolet Imager) [6], установленного на ИСЗ TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics). Спутник TIMED, запущенный NASA в 2001 г., предназначен для исследования энергетики, динамики, а также взаимодействия ионосферы, нижней термосферы и мезосферы с нижележащими слоями атмосферы. Данные наблюдений TIMED относятся к наименее изученной пограничной области между атмосферой Земли и ближним космосом (известной как MLTI) на высотах 60–180 км. Орбита спутника имеет высоту 625 км и наклонение  $74,1^\circ$ .

Из рис. 3, в видно, что наряду с общей тенденцией небольшого возрастания с 24 по 28 сентября наблюдается рост значений отношения  $[O]/[N_2]$  с резким спадом к 29 сентября. Весьма схожая картина наблюдалась вблизи г. Магадан и средних точек исследуемых трасс.

2. Для дальнейшего выявления причины значительных вариаций параметров ионосферы и атмосферы в течение 24–26 сентября 2005 г. мы проанализировали данные о вертикальных профилях температуры атмосферы, которые были получены с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS, установленного на борту космического аппарата Aura [7]. Спутник Aura запущен NASA в июле 2004 г. и является частью Международной программы исследования глобальных изменений климата Земли EOS (Earth Observing System). Данные измерений зонда MLS Aura используются для восстановления профилей химического состава, относительной влажности и температуры для областей атмосферы от тропосферы, стратосферы, мезосферы до верхней тропосферы. Спутник имеет полярную орбиту с высотой 705 км, пространственный охват почти глобален (от  $-82^\circ$  до  $+82^\circ$  по широте). Вертикальное разрешение измерений составляет приблизительно 3 км. Каждый вертикальный профиль измеряется через  $1,5^\circ$  ( $\sim 165$  км) вдоль траектории орбиты. В сутки осуществляется примерно 15 пролетов спутника.

На рис. 4, а приведены высотные профили отклонений дневных температур атмосферы в дни, когда в Иркутске, Магадане и средних точках рассматриваемых трасс наблюдалось одновременное увеличение в течение нескольких дней полуденных величин МНЧ (24–26 сентября 2005 г.) по отношению к температурам в предшествовавшие спокойные дни (20–22 сентября 2005 г.) на примере г. Иркутска и Магадана. Можно отметить сильную изменчивость температуры как по высоте (рис. 4), так и ото дня ко дню (рис. 5).

Значительные вариации температур наблюдались на высотах мезопаузы ( $\sim 80$ – $90$  км) (см. рис. 4 и 5, а). Вблизи Иркутска 25 сентября температура на высотах мезопаузы уменьшилась по сравнению с температурой 21 сентября примерно на  $30^\circ$  (с 199

до 170 К) (см. рис. 4, *а*), для Магадана (рис. 4, *б*) и Якутска понижение температур составляло примерно 15°. В последующие дни к концу сентября температура вновь возросла, например в Иркутске до 212 К (рис. 5, *а*). На высотах стратопазузы (~50 км) наблюдалось повышение температуры на 5–10° (рис. 4 и 5, *б*).

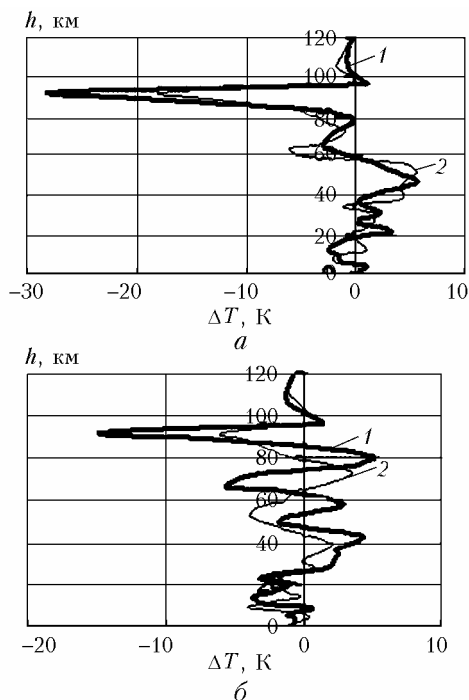


Рис. 4. Высотные профили отклонений дневных температур для региона г. Иркутска (*а*) (1 – в день 25.09.06 от дня 21.09.06; 2 – в день 26.09.06 от дня 21.09.06) и региона Магадана (*б*) (1 – в день 25.09.06 от дня 20.09.06; 2 – в день 24.09.06 от дня 20.09.06)

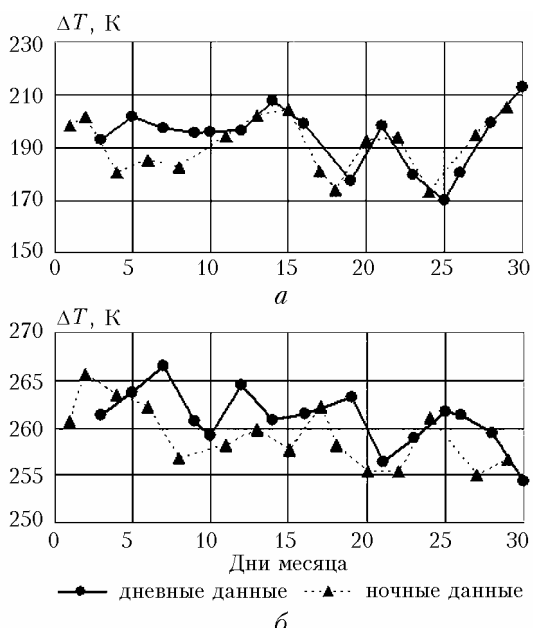


Рис. 5. Межсуточные вариации температур на высотах порядка 90 (*а*) и 50 км (*б*) для региона г. Иркутска в сентябре 2005 г.

Оперативное определение поля вертикальных профилей земной атмосферы относится к важнейшим достижениям космического дистанционного зондирования, поскольку позволяет рассматривать атмосферу как единую систему [8]. В результате анализа данных измерений MLS Aura высотного распределения температуры атмосферы установлено, что на огромном пространстве ~2000 км в течение 4–5 дней отмечалось одновременное изменение ряда параметров атмосферы и ионосферы, а именно: вариации температуры на высотах страто- и мезопазузы, вариации отношения  $[O]/[N_2]$  на высотах нижней термосферы и вариации полуденных величин МНЧ, которые являются показателем увеличения ионизации ионосферы в F2-области.

Мы уже отмечали, что исследуемый временной интервал относится ко времени сезонной перестройки атмосферы в равноденственный период, которая охватывает все слои атмосферы, включая тропосферу и стратосферу и вышележащие слои. Главным образом, она касается динамического режима, который, в свою очередь, во многом определяет свойства и параметры атмосферы (температура, плотность, давление, химический состав и т.п.).

Земная атмосфера является единой сложной динамической системой, в которой наблюдается широкий спектр пространственных и временных вариаций характеристик движений. Эффективным механизмом межслоевого взаимодействия является перенос вещества и энергии посредством распространяющихся вверх внутренних волн разного масштаба. Возмущения атмосферных параметров глобальной горизонтальной протяженности с временным масштабом больше суток представляют собой планетарные волны (волны Россби) [9]. Эти волны могут распространяться вверх вплоть до высот термосферы и ионосферы с возрастанием амплитуды. Но процессу переноса могут препятствовать господствующие на высотах страто-мезосферы системы горизонтальных ветров.

Восточные (летняя циркуляция) и сильные западные ветры являются наиболее надежными фильтрами для крупномасштабных атмосферных волн и служат их отражающими барьерами. В течение большей части зимы, когда на этих высотах господствуют западные ветры, а также в периоды сезонных перестроек, когда происходит смена циркуляции с летней восточной на зимнюю западную, создаются наиболее благоприятные условия для распространения вверх планетарных волн. Возможно, рассматриваемые в работе глобальные вариации параметров атмосферы и ионосферы связаны с распространяющейся планетарной волной с периодом порядка 4–5 дней.

Таким образом, анализ данных наклонного и вертикального зондирования, полученных в спокойных геомагнитных условиях при низкой солнечной активности, выявил положительные возмущения на значительной территории длительностью около 3–4 сут. Использование спутниковых наблюдений за составом и температурой нейтральной атмосферы подтвердило существование значительных

пространственных вариаций параметров нейтральной атмосферы в эти дни. Это дает основание предположить, что подобные вариации электронной концентрации на высотах максимума слоя  $F$  ионосферы связаны с генерацией планетарных волн в средней атмосфере и их распространением на большие высоты.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-05-64634) и программы Президиума РАН № 16 (часть 3).

1. *Kazimirovsky E.S., Herraiz M., De la Morena B.A.* Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // *Surv. Geophys.* 2003. V. 24. N 1. P. 139–184.
2. *Lastovicka J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68. N 2–3. P. 479–497.

3. *Rishbeth H.*  $F$ -region links with the low atmosphere? // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68. N 3–5. P. 469–478.
4. *Жеребцов Г.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Пирог О.М., Полех Н.М., Чистякова Л.В.* Проявление ионосферных возмущений в северо-восточном регионе России // *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца.* 1997. Вып. 107. С. 8–19.
5. *Урядов В.П., Куркин В.И., Вертоградов Г.Г., Полятов А.А., Пономарчук С.Н.* Особенности распространения КВ-сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2004. Т. 47. № 12. С. 1041–1056.
6. [http://guvi.jhuapl.edu/guvi\\_accessdata.html](http://guvi.jhuapl.edu/guvi_accessdata.html)
7. <http://mls.jpl.nasa.gov>
8. *Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
9. *Гайгеров С.С.* Исследование синоптических процессов в высоких слоях атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 252 с.

***V.I. Kurkin, N.M. Polekh, M.A. Chernigovskaya, N.A. Abushenko. Study of influence of the atmospheric processes on the ionization of F2 ionosphere.***

An abrupt increase of the maximum observed frequency was noted on the Magadan–Irkutsk and Norilsk–Irkutsk oblique sensing paths in the morning and daytime hours during September, 24–26. According to vertical sensing data the ionization increase was observed in Irkutsk, Magadan and Norilsk at the same time.

The analyzed period is characterized by quiet geomagnetic conditions. Possible mechanisms of observed variations of ionosphere parameters are discussed. We included in analysis the satellite data of vertical temperature distribution in a stratosphere-mesosphere by MLS (Microwave Limb Sounder) from EOS Aura spacecraft. Also we analyzed the ratio of atomic oxygen density to molecular nitrogen density  $[O]/[N_2]$  in the lower thermosphere received by the UV-spectrometer of spatial scanning GUVI (Global Ultraviolet Imager) aboard the satellite TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics). As electron density at the heights of the  $F2$  layer maximum is proportional to  $[O]/[N_2]$ , we assumed that the noted effect in the ionosphere parameters can be connected with the temperature and neutral atmosphere composition variations. Possibly, this effect is related with the seasonal variations of the atmospheric parameters.