

Регистрация СМ ПИВ по данным наклонного зондирования в интерактивном режиме

В.А. Иванова⁽¹⁾, А.В. Подлесный⁽¹⁾, А.И. Поддельский⁽²⁾

(1) Институт солнечно-земной физики СО РАН

(2) Институт космических исследований и распространения радиоволн
ДВО РАН

Введение

В ионосфере Земли в дополнение к регулярным сезонным и суточным вариациям периодически наблюдаются волновые возмущения, связанные с различными источниками в нейтральной атмосфере на высотах от тропосферы до нижней термосферы (Shunk, Nagy, 2009; Kelley, 2009). Такие волновые возмущения распространяются посредством внутренних гравитационных волн (ВГВ) и в ионизованной среде на высотах термосферы проявляют себя как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые разделяются на два основных класса: крупномасштабные КМ ПИВ и среднемасштабные СМ ПИВ в зависимости от их периодов и горизонтальных скоростей (Hocke, Schlegel, 1996).

Специфические каспы (Z-образные перегибы), движущиеся из области более высоких задержек в область более низких задержек по верхнему лучу ионограммы наклонного зондирования (НЗ) наблюдаются по данным НЗ. В исследовании (Vertogradov et al., 2005) математическое моделирование показало связь движения таких каспов с распространением СМ ПИВ. В работе (Vertogradov et al., 2005) показано также, что свойства данных каспов зависят от амплитуды СМ ПИВ, их длины волны и направления фазового фронта СМ ПИВ по отношению к трассе распространения.

Статистический анализ различных типов каспов (Kurkin et al., 2014) проводился на основе большого набора данных слабонаклонного зондирования, полученных для зимних и летних месяцев 2011-2012 гг. В работе (Kurkin et al., 2014) была представлена классификация типов каспов, наблюдавшихся на данных ионограммах. Также были исследованы вероятности регистрации СМ ПИВ и средняя продолжительность СМ ПИВ для различных сезонов. Было определено, что такие каспы наблюдаются в 10% от всех ионограмм. В ИСЗФ СО РАН подобные работы по исследованию свойств СМ ПИВ проводятся и для данных наклонного зондирования (НЗ) (Kim et al., 2012). Ранее регистрация СМ ПИВ проводилась только визуально, но в настоящее время в связи с наличием большого объема данных НЗ стоит задача разработки подходов к автоматической регистрации СМ ПИВ по данным НЗ. В работе (Berngardt et al., 2018) описан алгоритм автоматической обработки СМ ПИВ для данных вертикального зондирования (ВЗ), однако для ионограмм НЗ такой подход нереализуем в силу принципиальных различий в данных ВЗ и НЗ.

Целью данной работы является описание методики регистрации СМ ПИВ в интерактивном режиме на среднеширотных трассах НЗ.

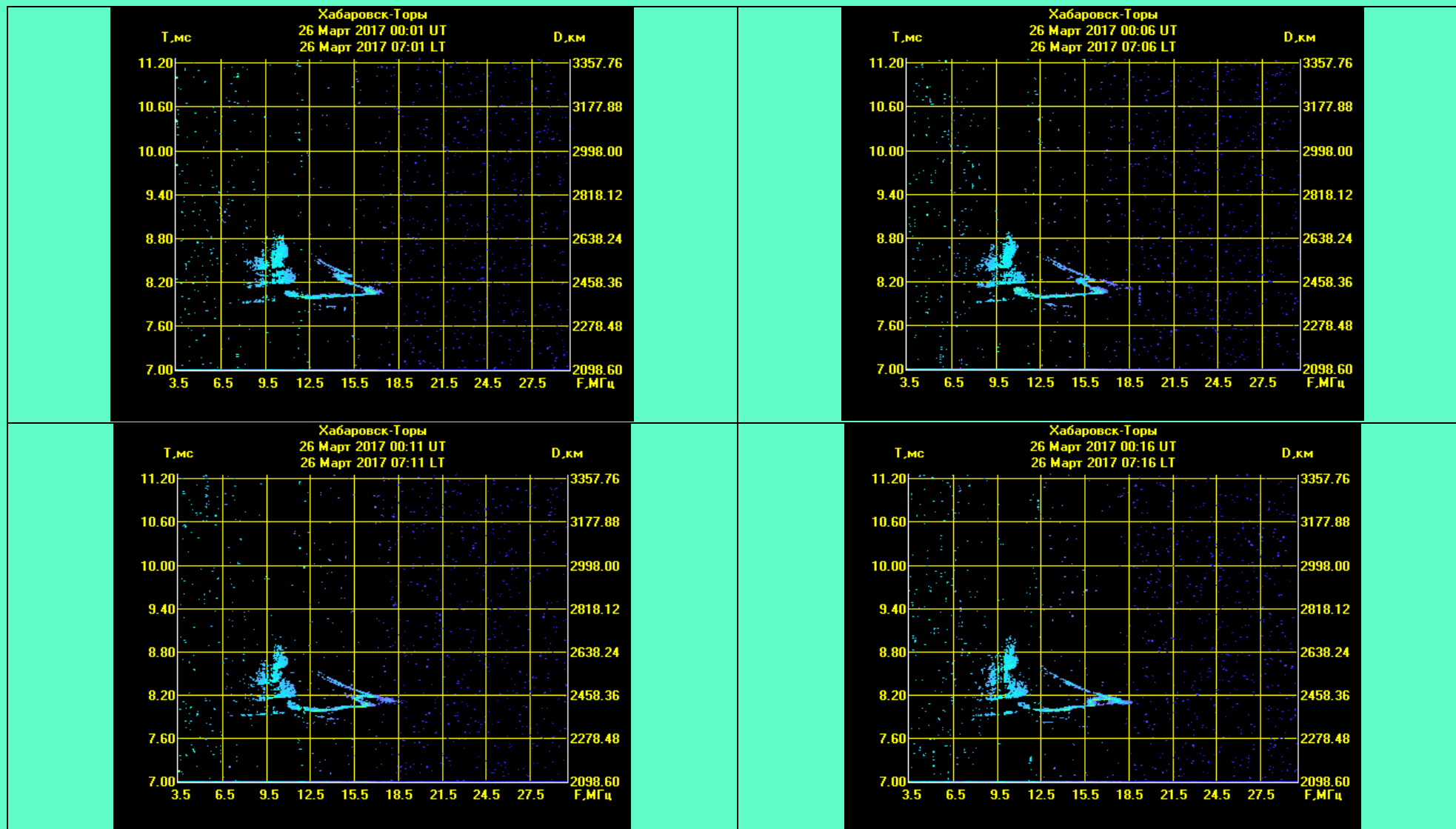
Описание данных

Данные наклонного зондирования получены на трассах Магадан-Торы, Хабаровск-Торы и Норильск-Торы. Протяженность трасс составляет 3100 км, 2300 км и 2200 км соответственно. Координаты передатчиков: 60° с.ш., 150.7° в.д. в Магадане, 47.6° с.ш., 134.7° в.д. в Хабаровске, 69.2° с.ш., 88° в.д. в Норильске. Координаты приемника в пос. Торы (Бурятия): 51.8° с.ш., 103° в.д. Интервалы между зондированиями 5 минут. Начиная с февраля 2014 года измерения на этих трассах проводятся непрерывно в режиме мониторинга на протяжении всего года.

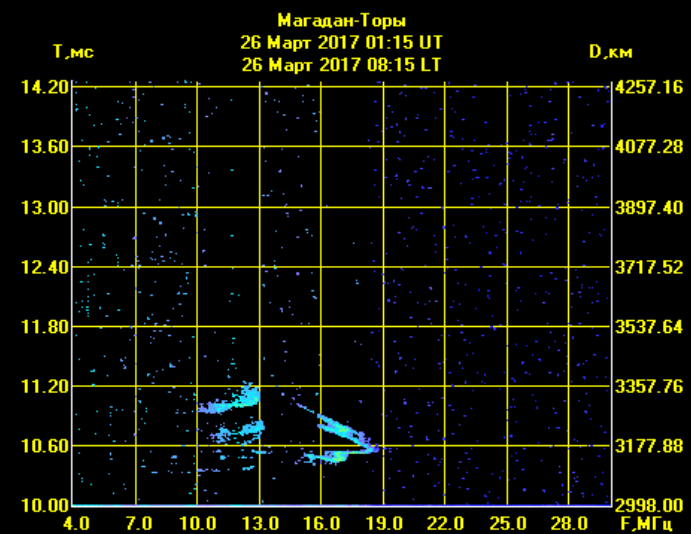
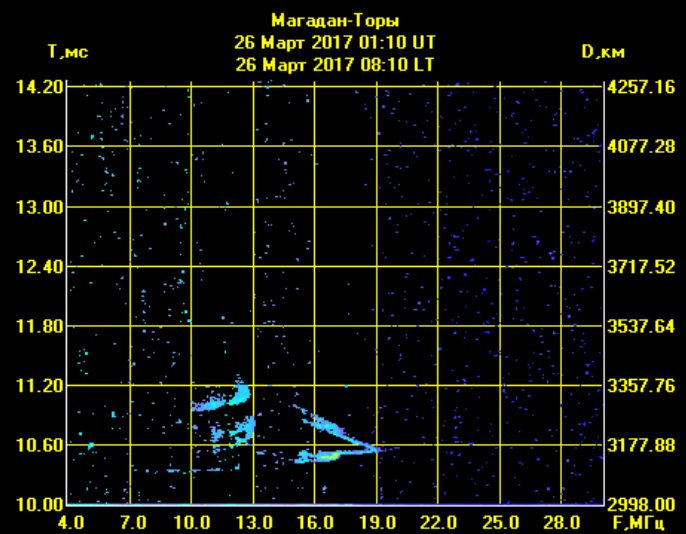
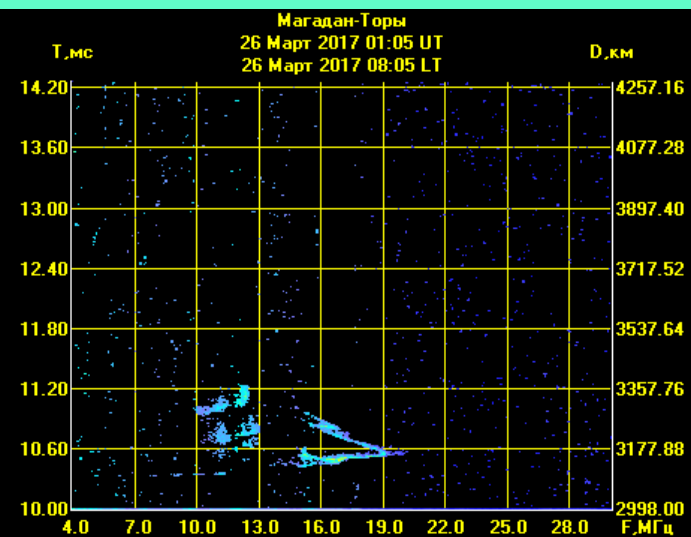
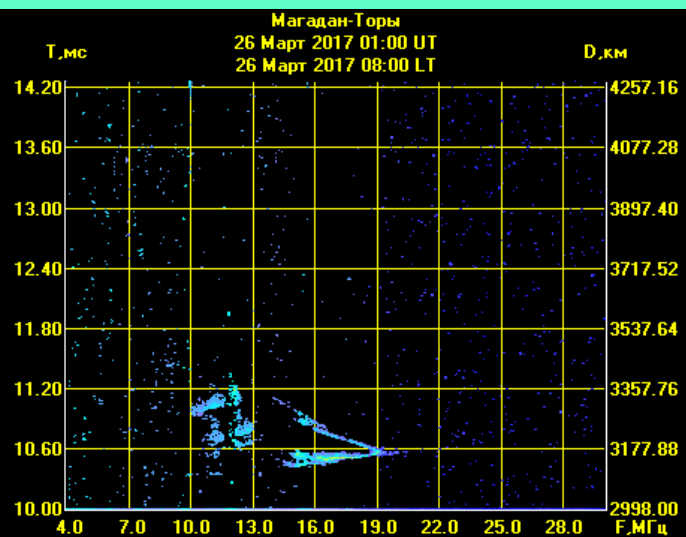
На ионограмме НЗ КМ ПИВ проявляются как значительные вариации максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) без изменений структуры трека на ионограмме. С другой стороны, СМ ПИВ изменяют форму трека верхнего луча дистанционно-частотной характеристики (ДЧХ), образуя специфический перегиб. Следует заметить, что СМ ПИВ изменяет ДЧХ ионограммы, если СМ ПИВ распространяется вдоль дуги большого круга от точки входа КВ-радиолуча в ионосферу до средней точки трассы (Kim et al, 2012).

Примеры ионограмм НЗ с СМ ПИВ

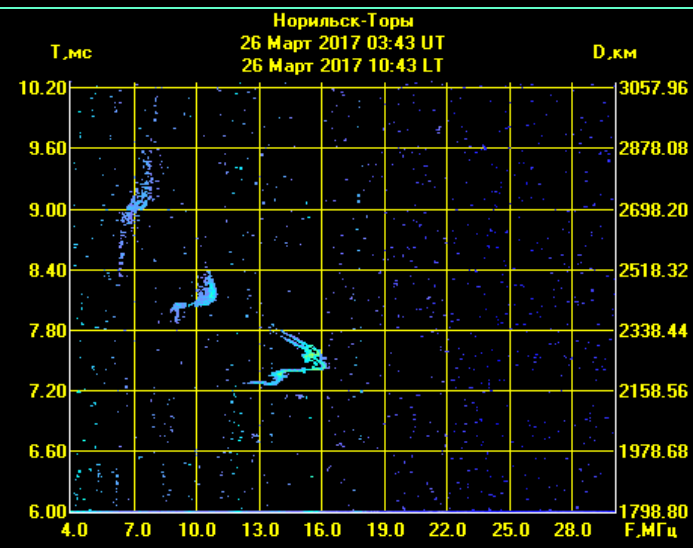
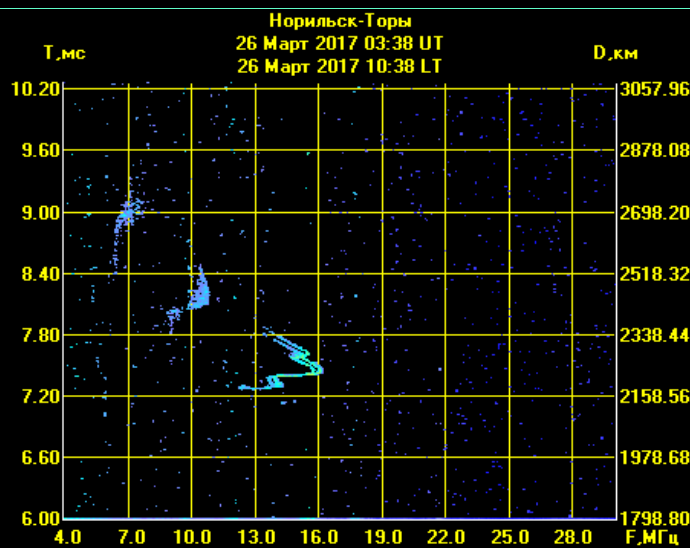
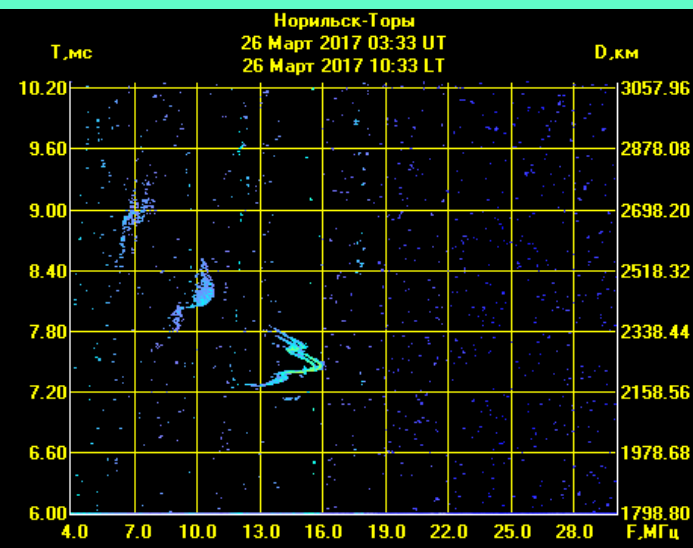
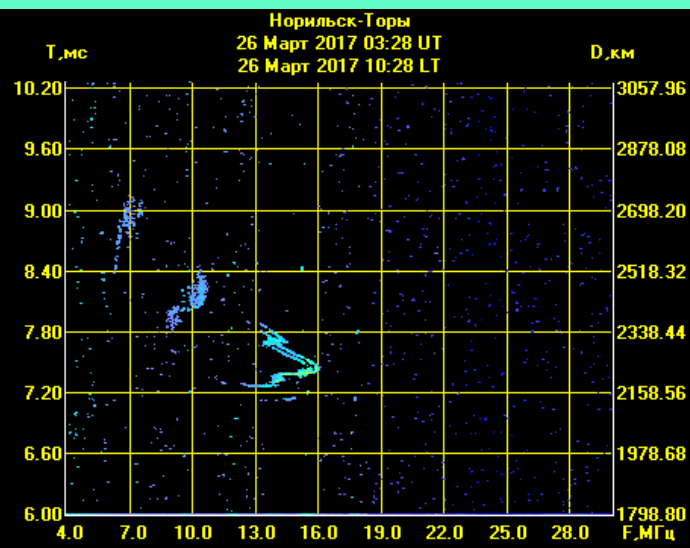
Трасса Хабаровск-Торы



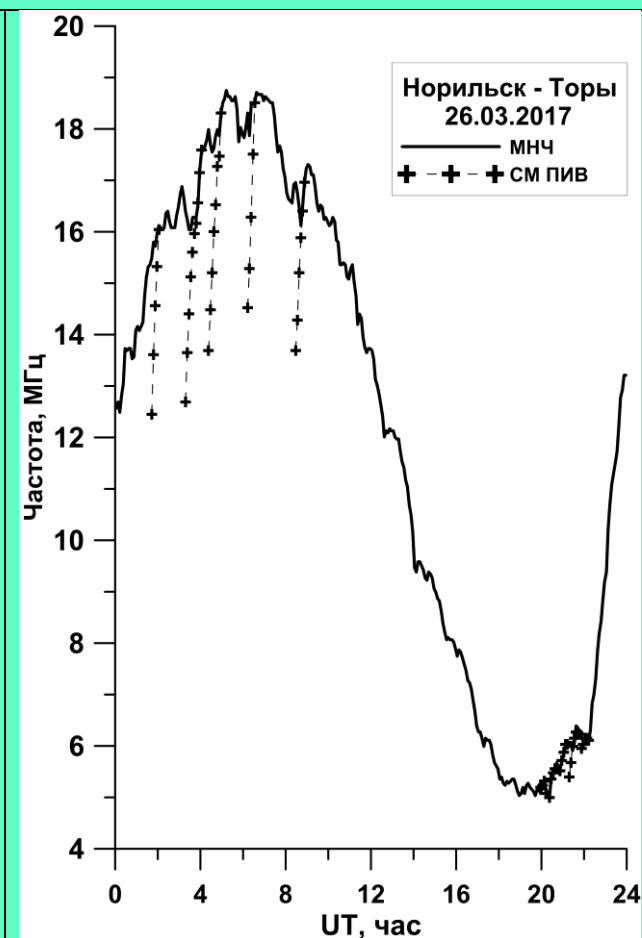
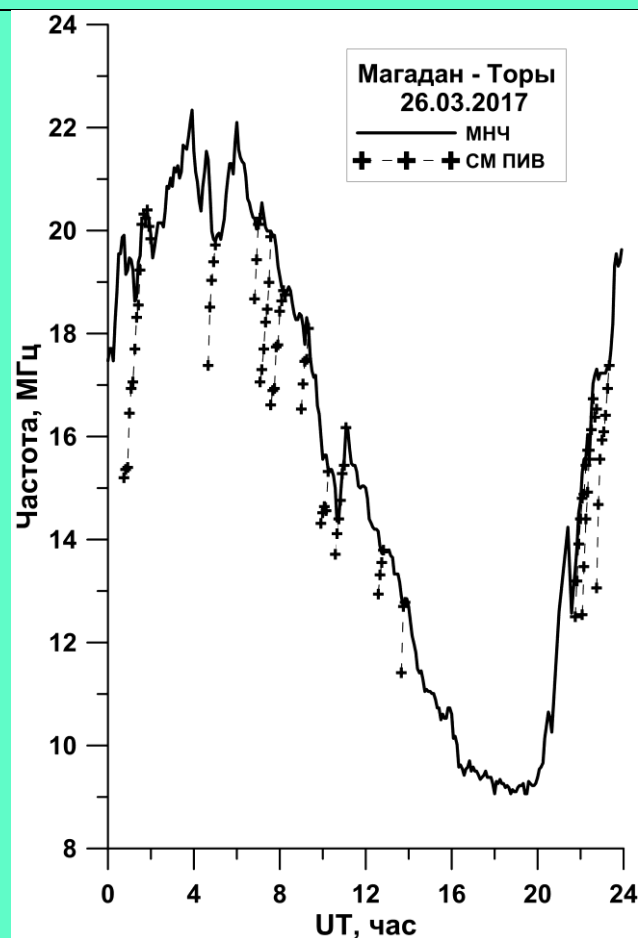
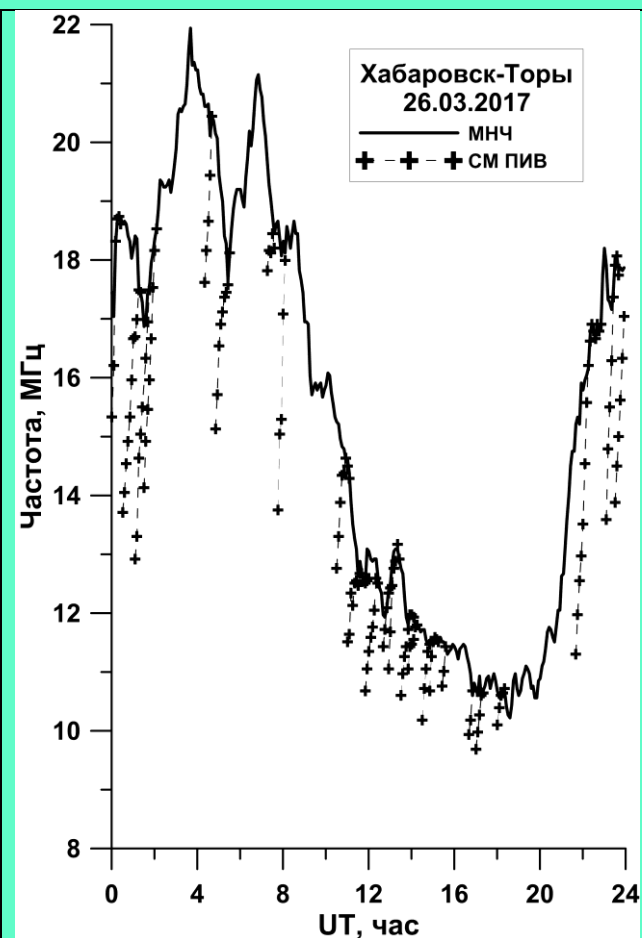
Трасса Магадан-Торы



Трасса Норильск-Торы



В качестве примера работы предлагаемой методики полуавтоматической регистрации СМ ПИВ рассмотрим суточный ход МНЧ на трех исследуемых трассах для 26.03.2017. Данный день был спокойным с точки зрения геомагнитных возмущений. Сплошными линиями на рис. 1 нанесен ход МНЧ, а крестиками – движение Z-образного перегиба (каспа) вдоль верхнего луча ДЧХ. Хорошо видно, что волнообразные вариации МНЧ с 3 до 7 UT на трассе Хабаровск-Торы не связаны с движением СМ ПИВ. Т.е. их появление можно отнести к движению КМ ПИВ в районе трассы распространения КВ-сигнала. Аналогичная ситуация наблюдалась для этого периода времени также на трассе Магадан-Торы, хотя проявления КМ ПИВ в вариациях МНЧ были выражены на этой трассе значительно слабее. С другой стороны, долготная трасса Норильск-Торы в дневное время 26.03.2017 г. была практически не подвержена влиянию КМ ПИВ, тогда как на ней регистрировались достаточно сильные по интенсивности СМ ПИВ, которые вызвали незначительные вариации МНЧ.



Вариации МНЧ (сплошная линия) и максимальных частот Z-образного перегиба или каспа на верхнем луче ДЧХ (крестики) вдоль исследуемых трасс НЗ для 26 марта 2017 года.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет произвести подсчет количества случаев появления исследуемых каспов на ионограммах наклонного зондирования, а также их сравнение относительно случаев регистрации КМ ПИВ. Она может быть полезной при разработке методик автоматического анализа СМ и КМ ПИВ, а также их статистических исследований.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия N075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>).

Литература

1. Berngardt O.I., Bubnova T.V., Podlesnyi A.V. Automatic estimation of dynamics of ionospheric disturbances with 1-5 minute lifetimes as derived from ISTP SP RAS fast chirp ionosonde data // *Solar-Terrestrial Physics*. 2018. Vol. 4. No. 1. P. 64-70. DOI: 10.12737/stp-41201807.
2. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // *Annales Geophysicae*. 1996. V. 14. No. 9. P. 917-940. DOI: 10.1007/s00585-996-0917-6.
3. Kelley M.C. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. 2nd edition. International Geophysics Series. Vol. 96. Elsevier. 2009. 556 p.
4. Kim A.G., Ponomarchuk S.N., Kotovich G.V., Romanova E.B. Modeling z-shaped disturbance along the Pedersen ray of oblique sounding ionogram using adaptation of IRI to experimental data // *Solar-Terrestrial Physics*. 2016. V. 2. No. 4. P. 55-69. DOI: 10.12737/21815.
5. Kurkin V.I., Laryunin O.A., Podlesny A.V., Pezhemskaya M.D., Chistyakova L.V. Studying Morphological Characteristics of Traveling Ionospheric Disturbances with the Use of Near-Vertical Ionospheric Sounding Data // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014. V. 27. No. 4. P. 303-309. DOI: 10.1134/S1024856014040095.
6. Shunk R., Nagy A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. 2nd edition. Cambridge. 2009. 628 p.
7. Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Uryadov V.P. Oblique sounding and modeling of the ionospheric HF channel // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2005. Vol. 48. No. 6. P. 405-419. DOI: 10.1007/s11141-005-0084-8.