Верификация методики автоматической обработки наинизших наблюдаемых частот во время рентгеновских солнечных вспышек

В.А. Иванова[(1)], *А.В. Ойнац*[(1)],
А.В. Подлесный[(1)], *А.И. Поддельский*[(2)]

(1) Институт солнечно-земной физики СО РАН
(2) Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Введение

Разработка методов автоматической обработки различных параметров наклонного зондирования (НЗ) ионосферы является важной и актуальной задачей в связи с резким увеличением объемов экспериментальных данных, получаемых на трассах НЗ в Азиатском регионе Российской Федерации в последнее десятилетие. Для анализа уровня поглощения декаметровых радиосигналов во время рентгеновских солнечных вспышек необходимо измерение параметра наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ). В работе [1] представлен метод автоматической обработки ионограммы НЗ для определения ННЧ, который показал достаточную точность обработки ННЧ во время рентгеновской солнечной вспышки класса M5.5 02.10.2015 г. на трассе Хабаровск-Торы. Однако для дальнейшего применения данного метода необходимо провести его верификацию на большем массиве данных.

Целью данной работы является верификация метода автоматической обработки ННЧ на ряде рентгеновских солнечных вспышек.

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. (рис. 1) Интервалы между зондированиями 5 минут. Начиная с февраля 2014 года измерения на этих трассах проводятся непрерывно в режиме мониторинга на протяжении всего года.

Данные о рентгеновском солнечном излучении получены со спутников GOES в диапазоне 1-8Å, сайт лаборатории солнечной астрономии ИКИ (http://xras.ru/).



Рис.1 – Расположение исследуемых трасс НЗ.

Сравнение методики автоматической интерпретации ННЧ и результатов ручной обработки

Для оценки точностных характеристик описанной в [1] методики по вычислению ННЧ были проведены расчеты для рентгеновских солнечных вспышек, наблюдавшихся в июле-августе 2011 г. [2], 6 сентября 2017 г. [3] и в апреле 2022 г. [4]. Временной ход ННЧ (LOF – Lowest Observed Frequency), полученных с помощью ручной обработки (синяя линяя) и программы автоматической интерпретации ННЧ (черная линия) для исследованных трасс приведен на рисунках 2-7.

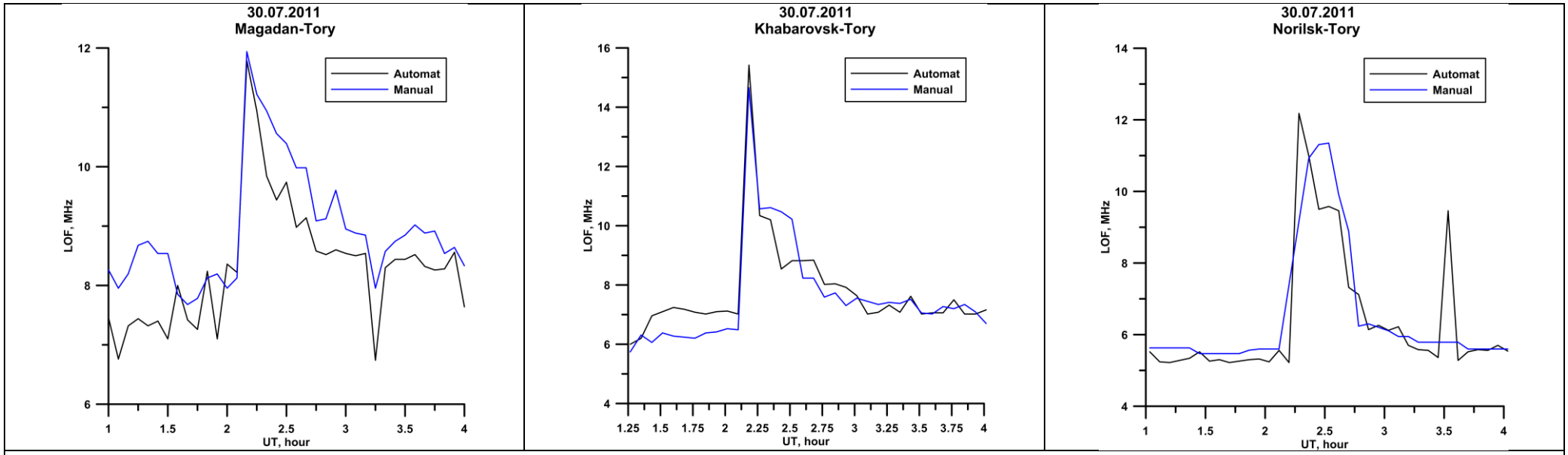


Рис.2 – Временной ход ННЧ для 30.07.2011 г.

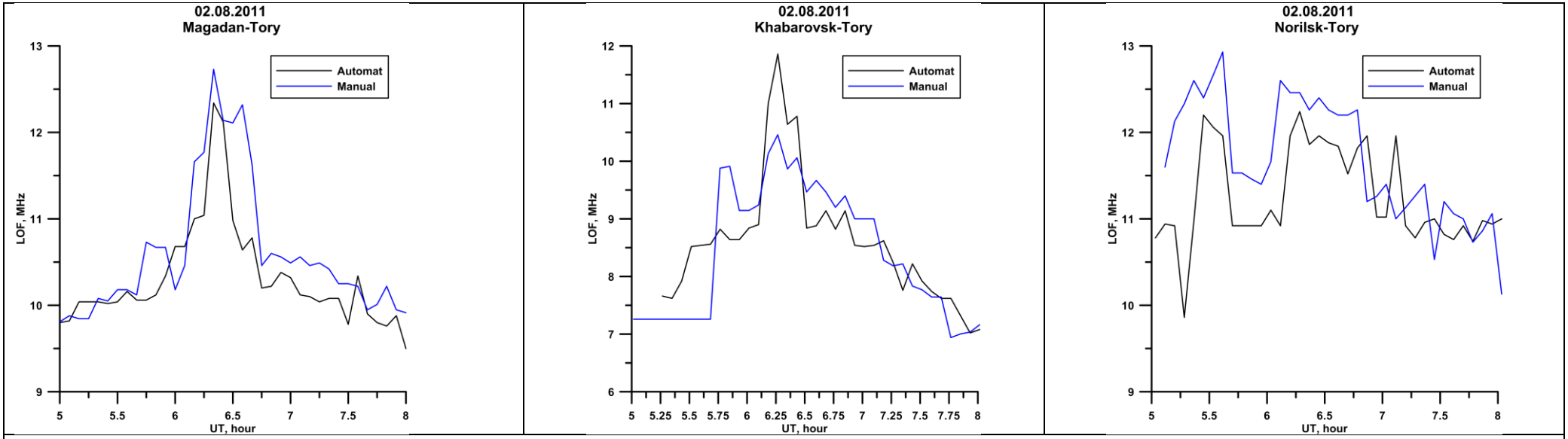


Рис.3 – Временной ход ННЧ для 02.08.2011 г.

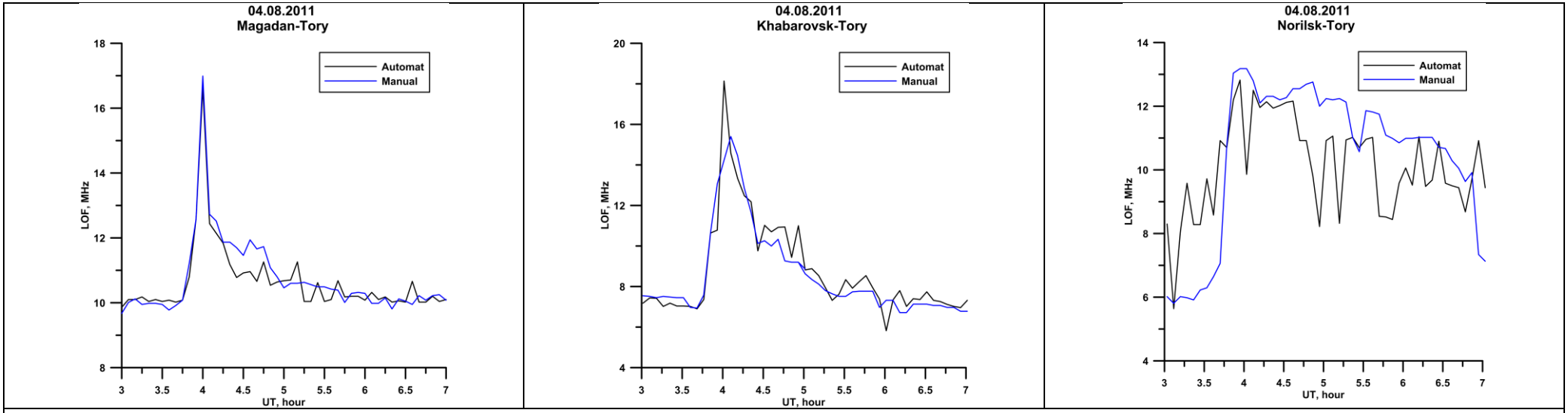


Рис.4 – Временной ход ННЧ для 04.08.2011 г.

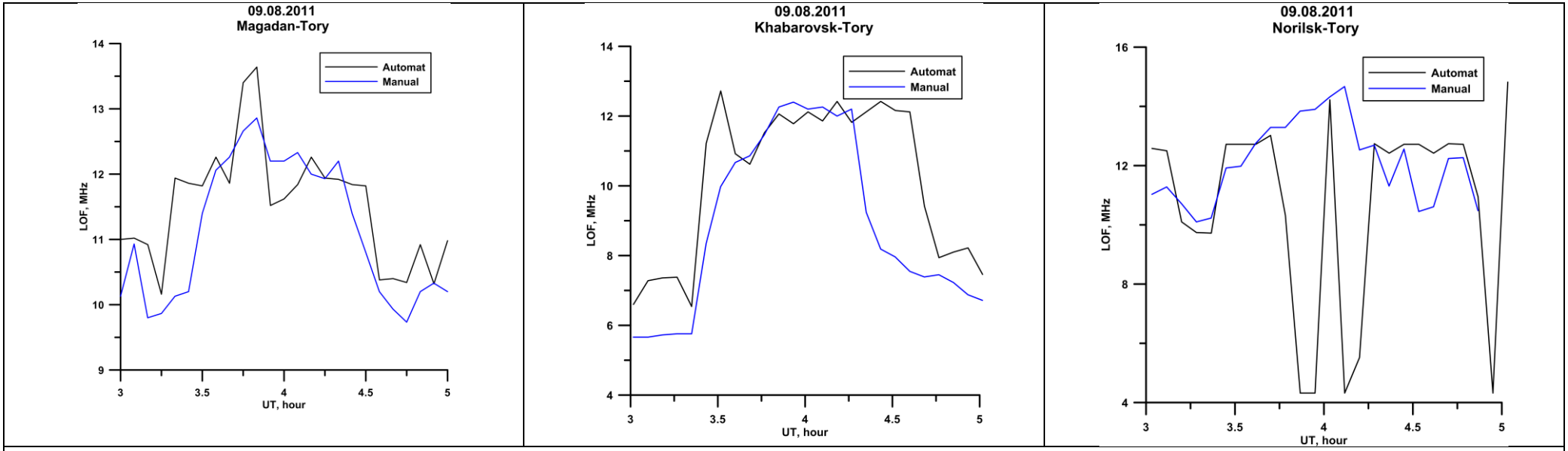


Рис.5 – Временной ход ННЧ для 09.08.2011 г.

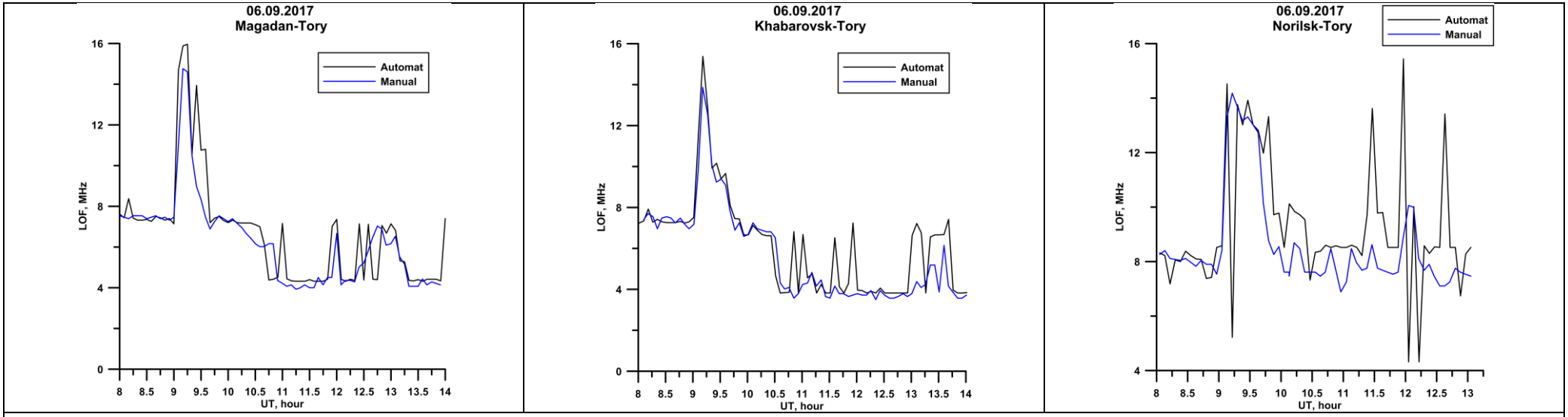


Рис.6 – Временной ход ННЧ для 06.09.2017 г.

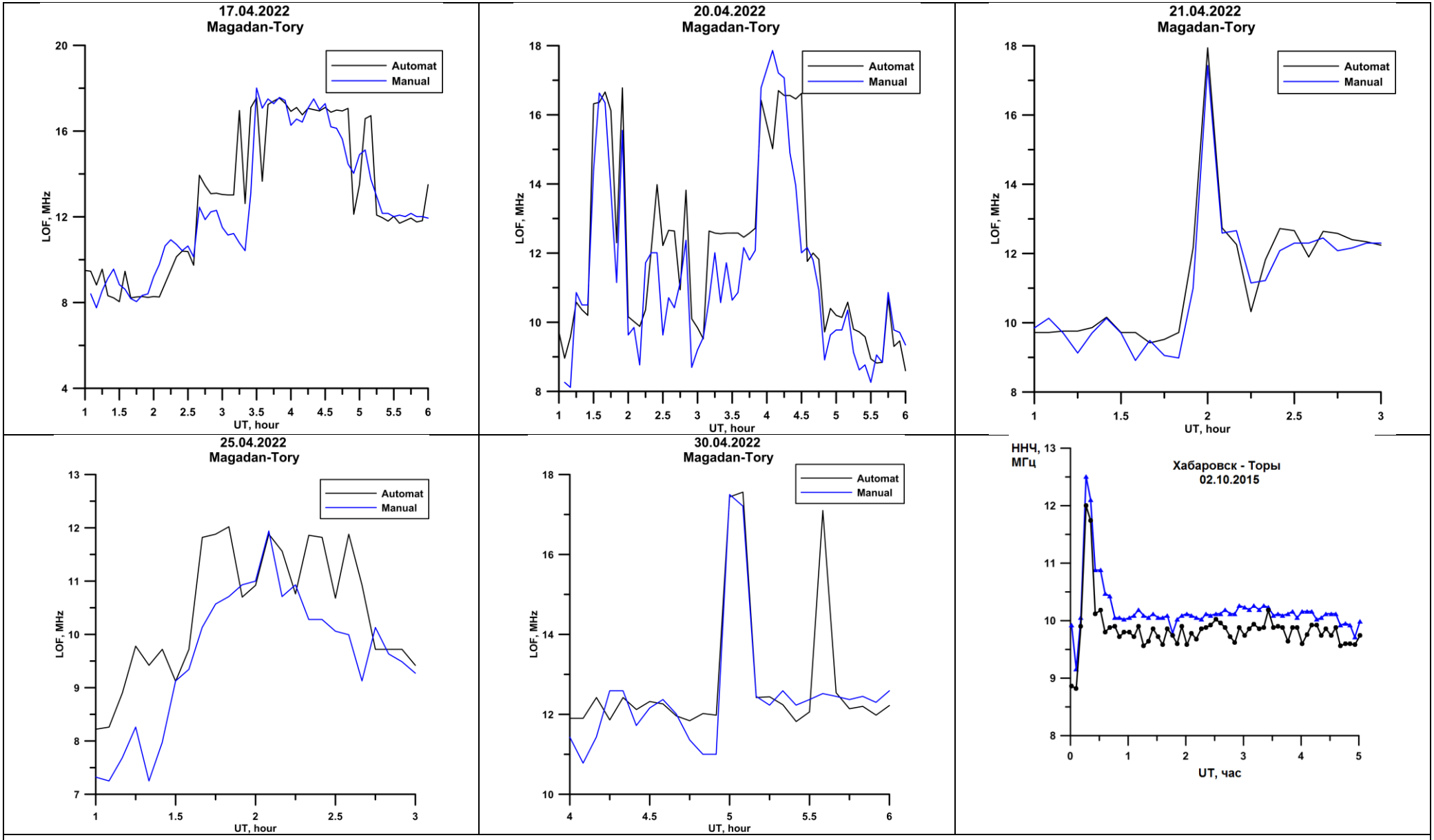


Рис.7 – Временной ход ННЧ для трассы Магадан – Торы для апреля 2022 г. и для трассы Хабаровск-Торы 02.10.2015 г.

На рис. 8 представлена гистограмма относительных отклонений для 14 солнечных вспышек, описанных в разделе 2. Всего было обработано 1092 ионограмм со всех трасс НЗ. Видно, что в 80% случаев относительное отклонение не превышает 10%.

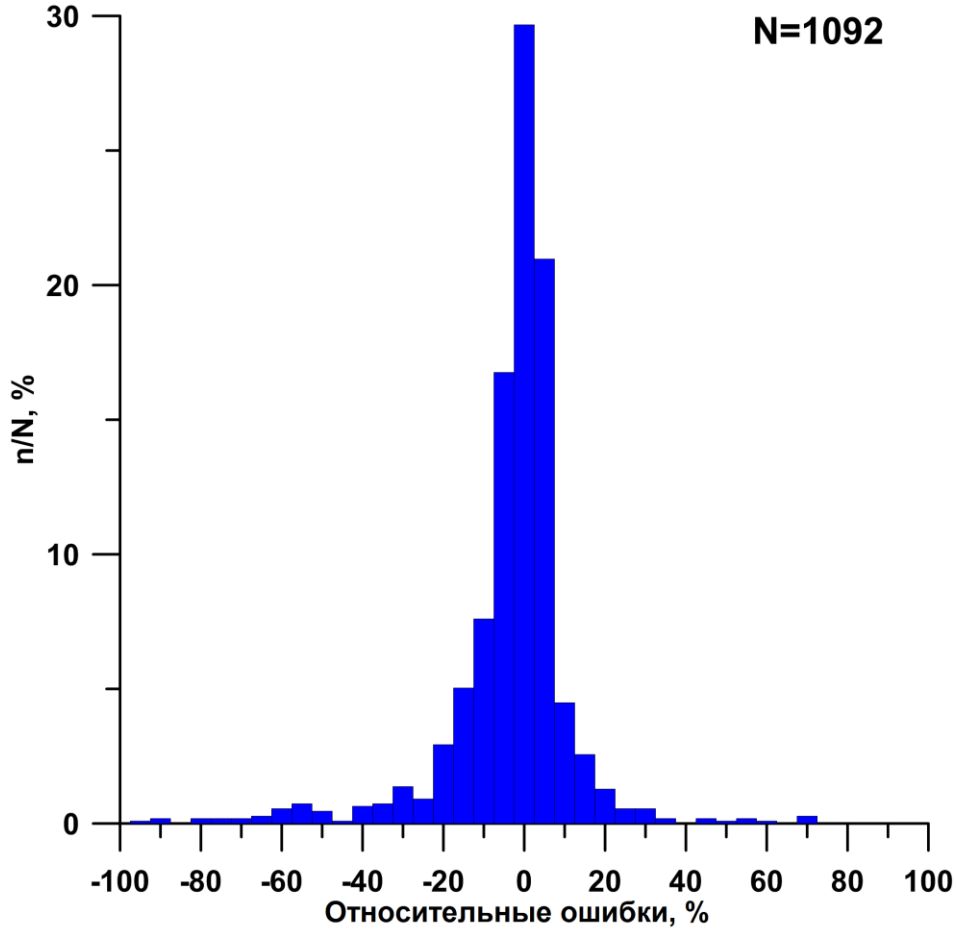


Рис.8 – Гистограмма относительных отклонений ошибок автоматического расчета ННЧ от ручной обработки для 14 солнечных вспышек

Выводы

Таким образом, разработанная методика демонстрирует достаточную точность определения ННЧ и позволяет существенно ускорить обработку экспериментальных данных наклонного зондирования, что является критически важным для быстрого и своевременного анализа откликов верхней атмосферы на всплески рентгеновского излучения Солнца.

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. *Ivanova V.A., Podlesnyi A.V., Rybkina A.A., Poddelsky A.I.* **Automatic processing of lowest observed frequencies using oblique incidence sounding data during solar X-ray flares** // Proc. SPIE. 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. V. 12780. P. 127807D. 2023. DOI: 10.1117/12.2690726.
2. *Иванова В.А., Полех Н.М. , Куркин В.И., Чистякова Л.В., Пежемская М.Д., Брынько И.Г., Орлов А.И., Подлесный А.В., Думбрава З.Ф., Поддельский И.Н.* **Отклик характеристик распространения КВ-радиоволн на вариации рентгеновского излучения //** Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 4. С. 154–160.
3. *Yasyukevich Yu., Astafyeva E., Padokhin A., Ivanova V., Syrovatskii S., Podlesnyi A.* **The 6 September 2017 X-Class Solar Flares and Their Impacts on the Ionosphere, GNSS and HF Radio Wave Propagation** // Space Weather. V. 16. No 8. 2018. P. 1013-1027.DOI: 10.1029/2018SW001932.
4. *Иванова В.А., Подлесный А.В., Поддельский А.И.* **Вариации наинизших наблюдаемых частот во время рентгеновских солнечных вспышек классов M и X в апреле 2022 г.** // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: сборник докладов XXX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2024. E-158 – E-161. DOI: 10.56820/OAO30E24.