

Автоматическая интерпретация наинизших наблюдаемых частот в периоды солнечных вспышек

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

⁽¹⁾ Институт солнечно-земной физики СО РАН

⁽²⁾ Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Солнечные вспышки являются одним из наиболее ярких проявлений космической погоды, поэтому анализ их воздействия на ионосферу Земли занимает важное место в исследованиях околоземного космического пространства. Для изучения откликов ионосферы на солнечные вспышки на основе данных наклонного зондирования (НЗ) используется величина наинизшей наблюдаемой частоты (ННЧ). Ранее в ИСЗФ СО РАН была проведена полуавтоматическая интерпретация ННЧ для четырех солнечных вспышек, зарегистрированных летом 2011 г. на трассах НЗ и слабонаклонного зондирования [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, No 4. С. 154–160]. Для двух мощных солнечных вспышек 6 сентября 2017 г. было проведено комплексное исследование ионосферных откликов на основе данных GPS, ГНСС и коротковолнового радиозондирования [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*. 2018. V. 16. No 8. P. 1013-1027. DOI: 10.1029/2018SW001932]. Так как объем экспериментальных данных НЗ, накопленных в ИСЗФ СО РАН, достаточно велик, стоит дальнейшая задача разработки алгоритмов автоматической интерпретации ННЧ.

Программа автоматической интерпретации ННЧ разработана в среде SciLab. Ионограммы анализируются в текстовом режиме (массив данных состоит из трех столбцов – частоты, группового пути, амплитуды).

Рассмотрим в качестве примера невозмущенную и возмущенную во время солнечной вспышки класса X ионограммы, полученные на трассе Хабаровск – Торы 25.02.2014 г. соответственно в 00:41 UT и в 00:51 UT (дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) – приведены на рис. 1). Отображение ионограмм на рис. 1 проведено программой полуавтоматической обработки CIV.

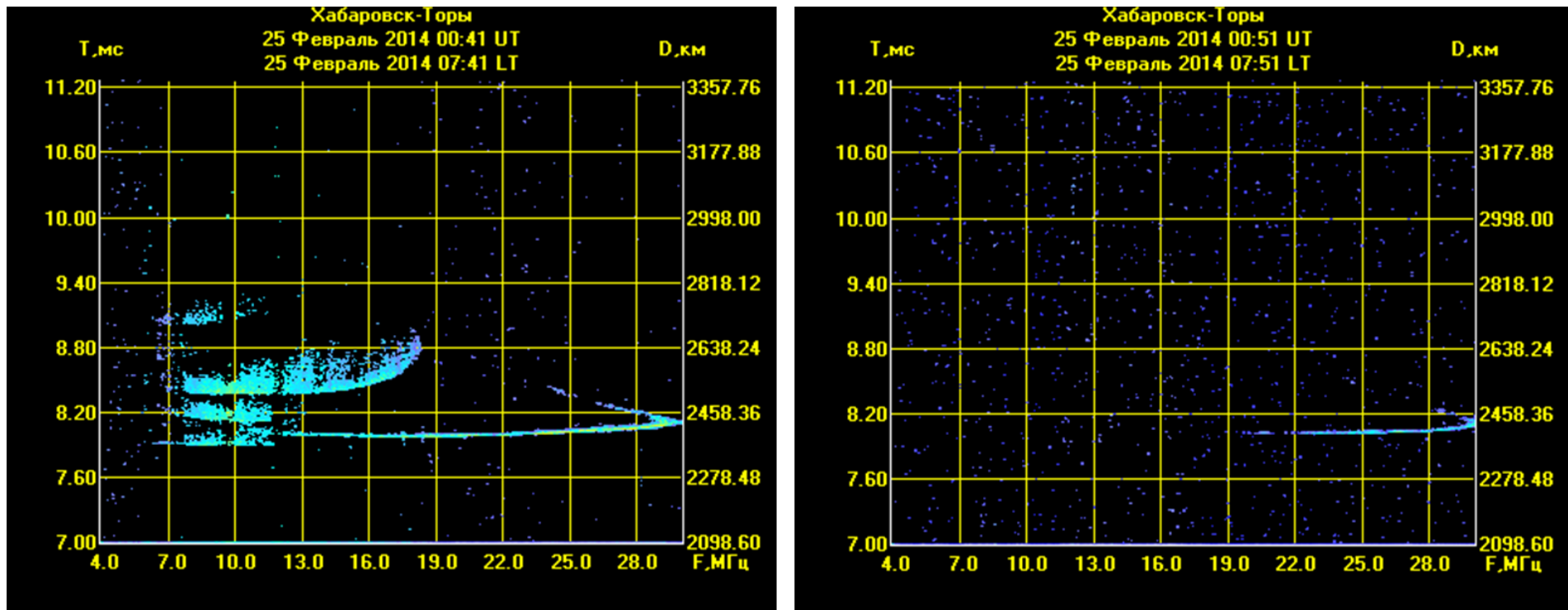


Рис. 1. Примеры анализируемых ионограмм.

Данная работа носит геофизический характер, поэтому в ней не ставилась задача качественной фильтрации ионограмм от помех. В связи с этим в программу включена лишь небольшая опция – отсекация небольших амплитуд по уровню, задаваемому оператором. На рис. 2 приведены примеры ДЧХ и зависимости групповой путь – амплитуда для анализируемой ионограммы, построенных по уровню 20 (слева) и 50 (справа) относительных единиц. Как можно видеть из ДЧХ, построенной для амплитуд по уровню выше 50 отн. ед., для качественных ионограмм с высоким уровнем полезного сигнала обрезание части информации по амплитудам не ведет к снижению точности определения ННЧ (в данном случае это около 6 МГц).

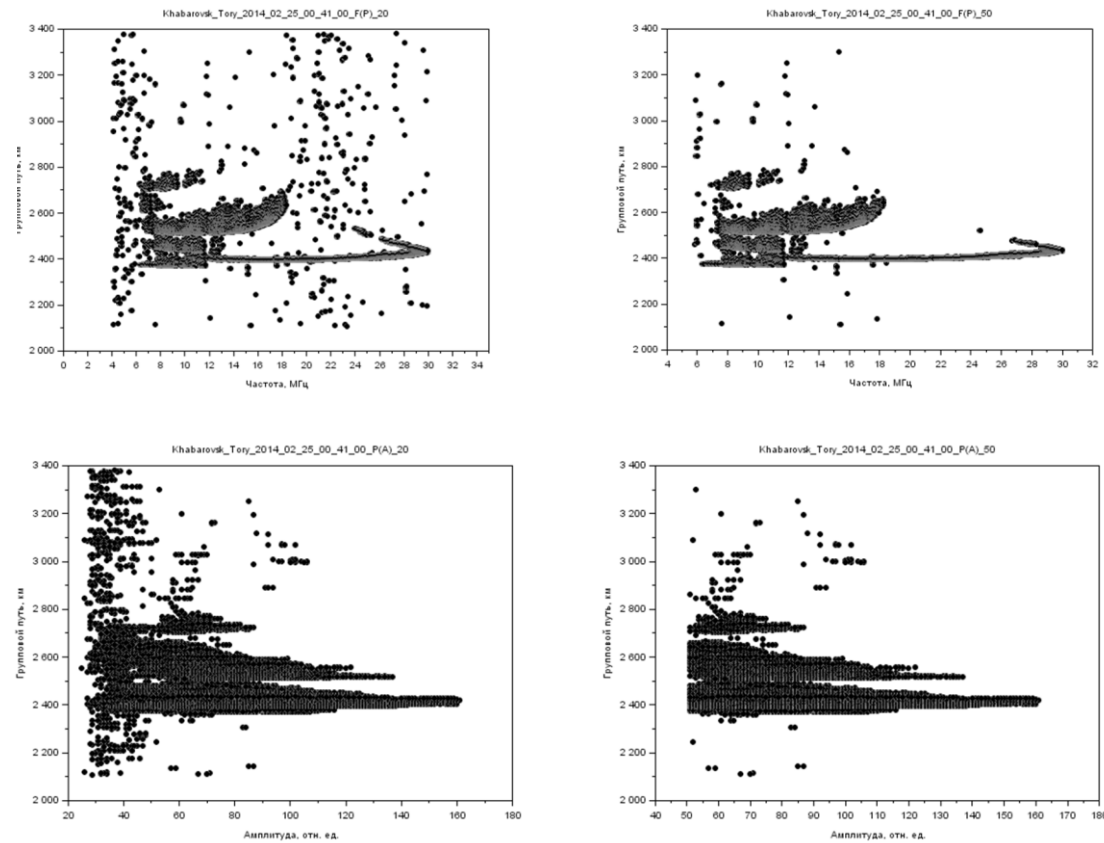


Рис. 2. ДЧХ и зависимость групповой путь-амплитуда по уровням 20 и 50 относительных единиц для 00:41 UT, 25.02.2014 г.

Проанализируем теперь, насколько изменится ситуация во время геофизического эффекта – поглощения радиоволн в условиях максимума рентгеновской вспышки класса X (время максимума вспышки – 00:49 UT). На рис. 3 приведены аналогичные зависимости для момента 00:51 UT. Видно, что в данном случае обрезание амплитуды по уровню выше 50 отн. ед. (Рис. 3, по центру) приводит к неоправданному искажению величины НЧ. С другой стороны, величина НЧ около 19 МГц, которую можно определить при уровне сигнала от 20 отн. ед. (Рис. 3, слева), избыточна, т.к. при полуавтоматической обработке оператор не видит амплитуд столь малых величин, и для данного случая определит НЧ около 20 МГц. Поэтому, вероятно, компромиссным решением для увеличения скорости обработки с одновременным сохранением адекватной информации об определяемой величине может служить уровень 30 отн. ед. (Рис. 3, справа).

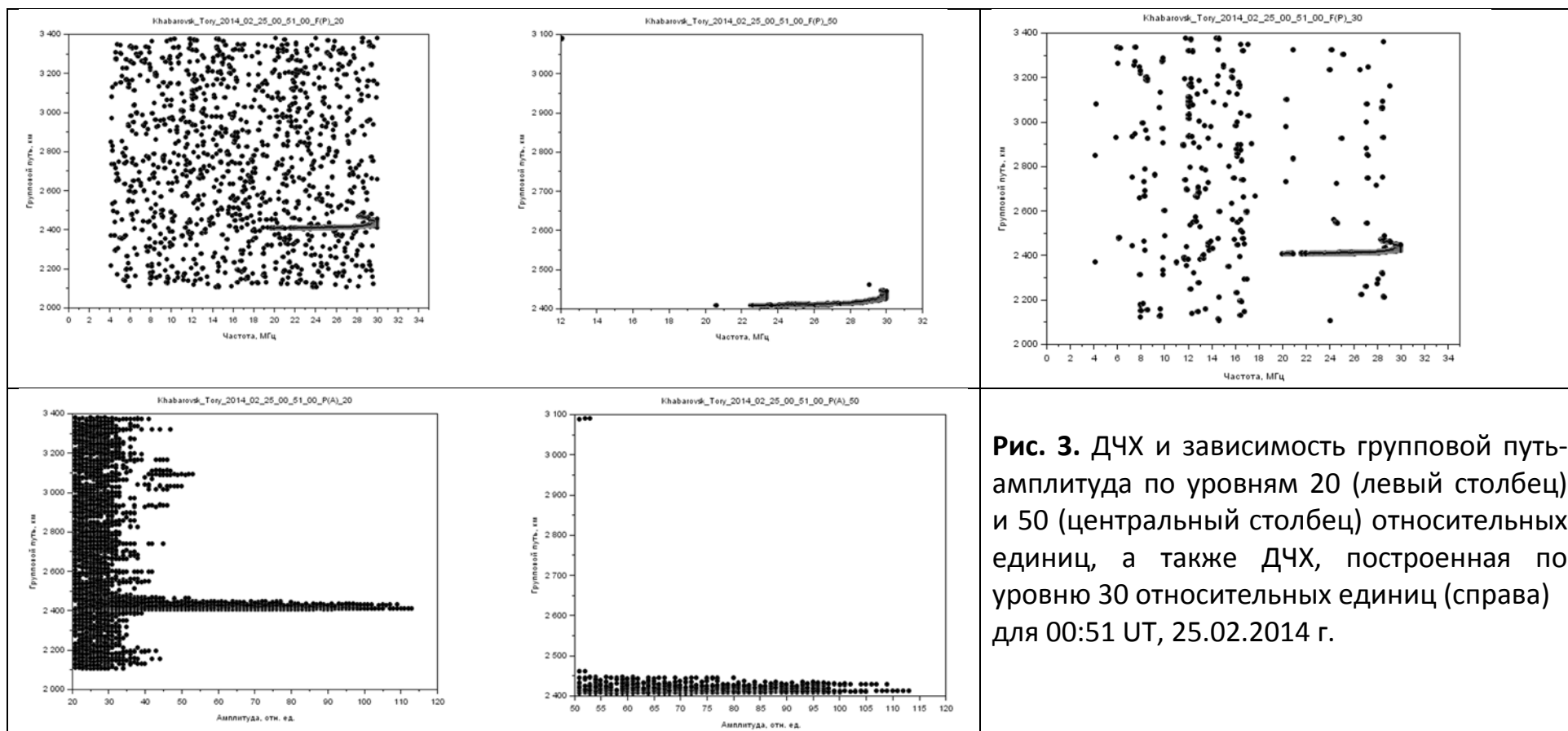


Рис. 3. ДЧХ и зависимость групповой путь-амплитуда по уровням 20 (левый столбец) и 50 (центральный столбец) относительных единиц, а также ДЧХ, построенная по уровню 30 относительных единиц (справа) для 00:51 UT, 25.02.2014 г.

Далее, логичным представляется метод выделения областей с полезным сигналом при помощи суммирования амплитуд, т.к. этот параметр наиболее адекватно отражает кол-во и интенсивность зарегистрированных сигналов на фиксированном участке ДЧХ. Первоначально строим зависимости Сумма амплитуд – Групповой путь ($\Sigma A(P)$). Амплитуды суммируются на интервале от минимального до максимального группового пути на каждом участке в 10 км. На рис. 4 приведены зависимости $\Sigma A(P)$ для 00:41 UT и 00:51 UT, вычисленные по уровню 30 отн. ед. (далее в описании минимальный уровень анализируемого сигнала отмечаться не будет, он по умолчанию будет установлен в 30 отн.ед.).

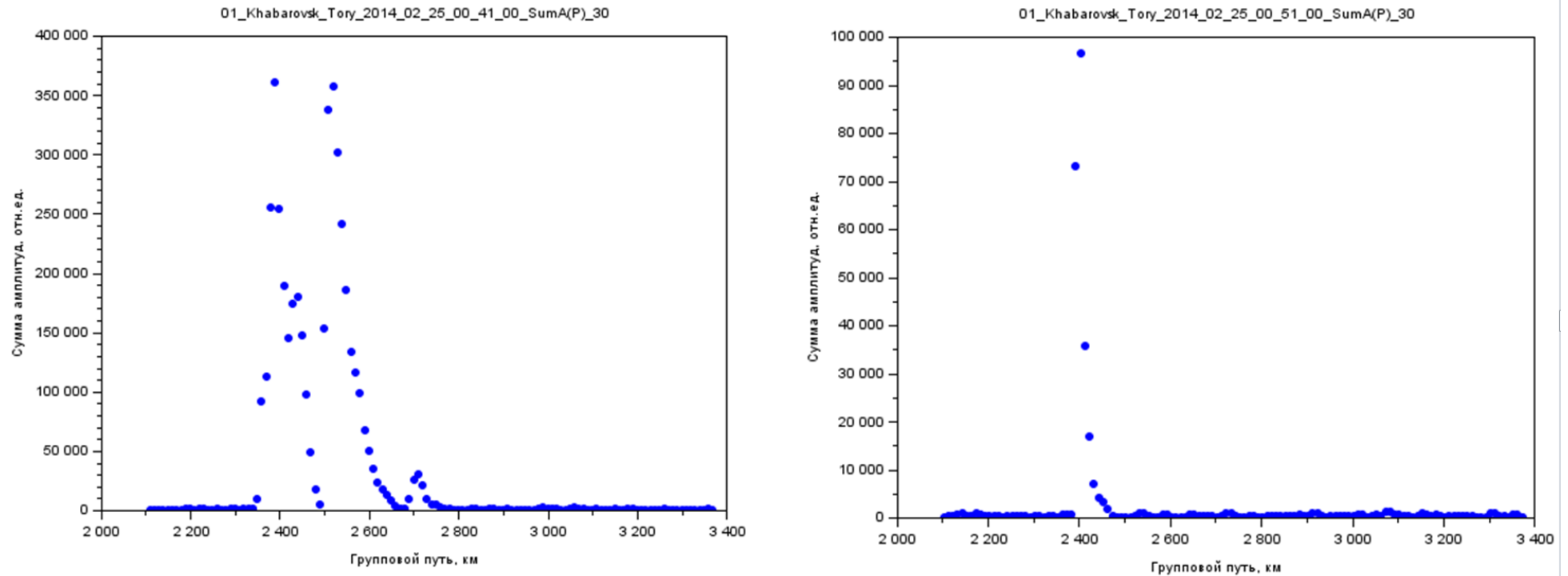
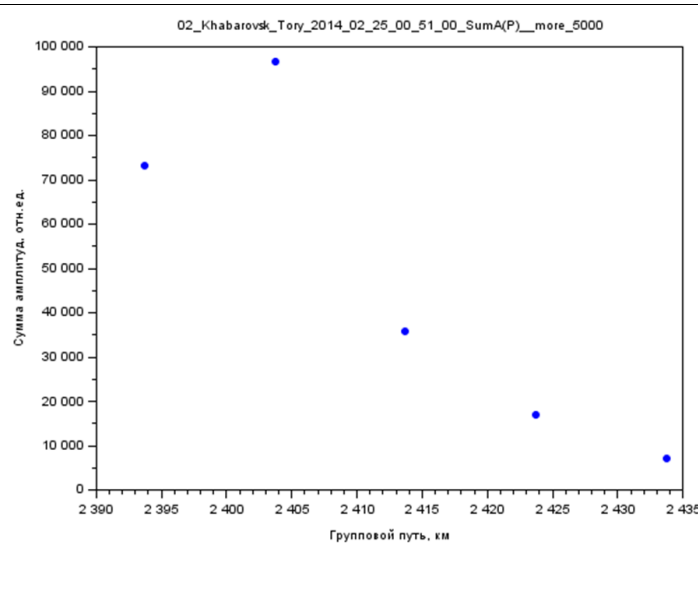
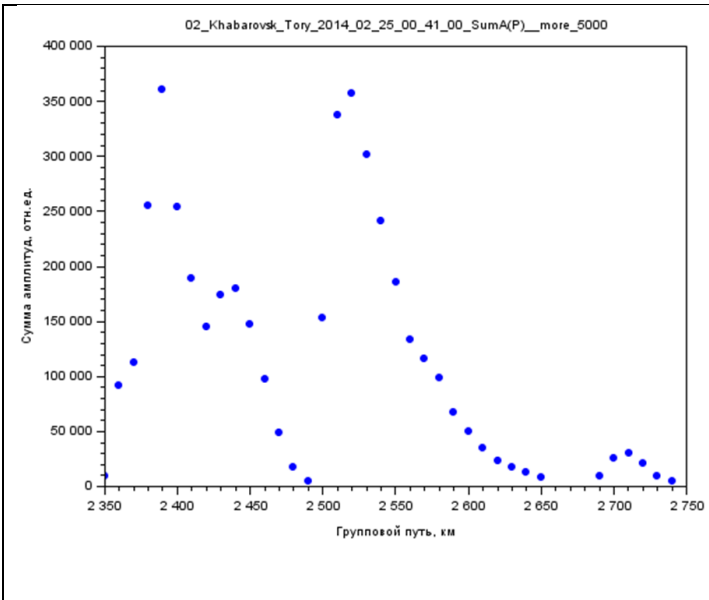
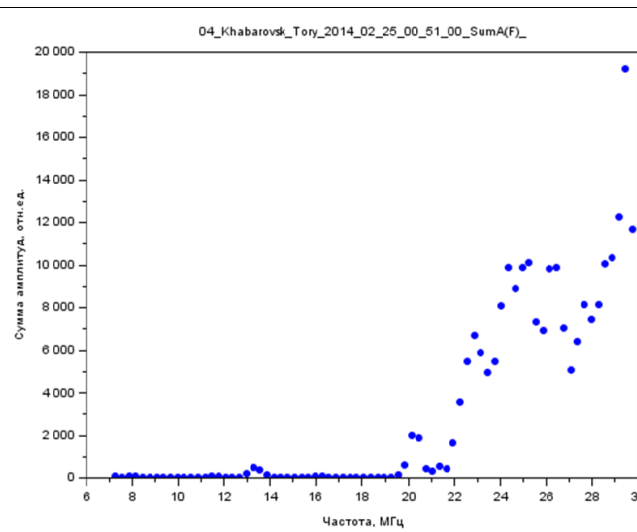
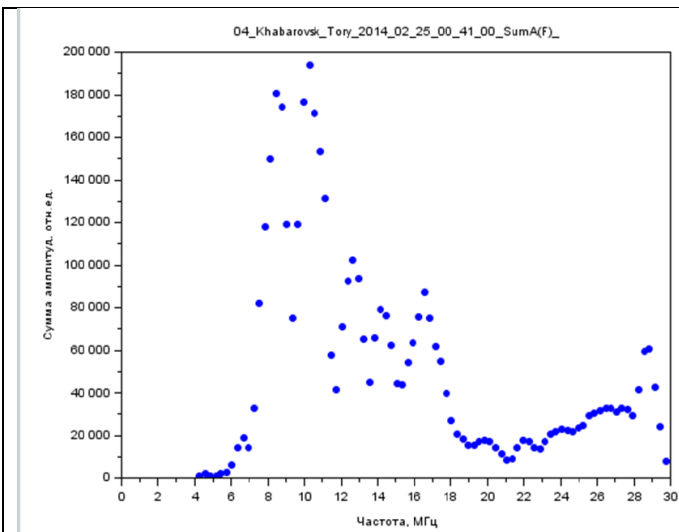


Рис. 4. Зависимости $\Sigma A(P)$, вычисленные по уровню 30 отн. ед. для 00:41 UT и 00:51 UT, 25.02.2014 г.

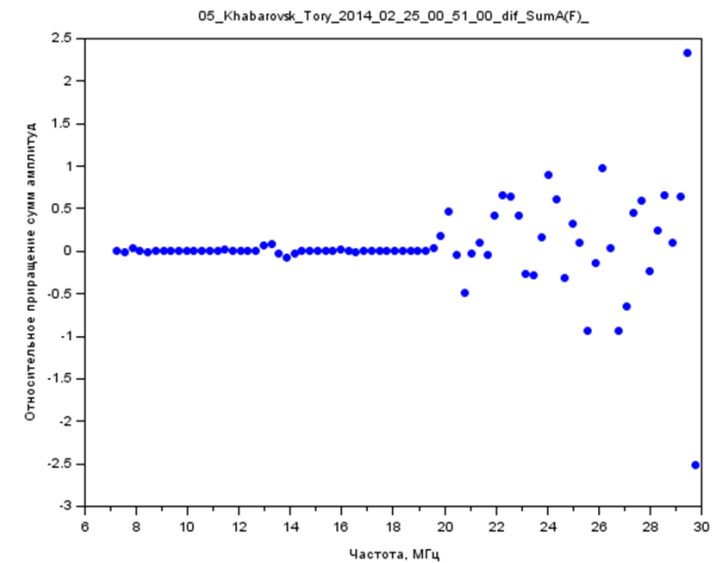
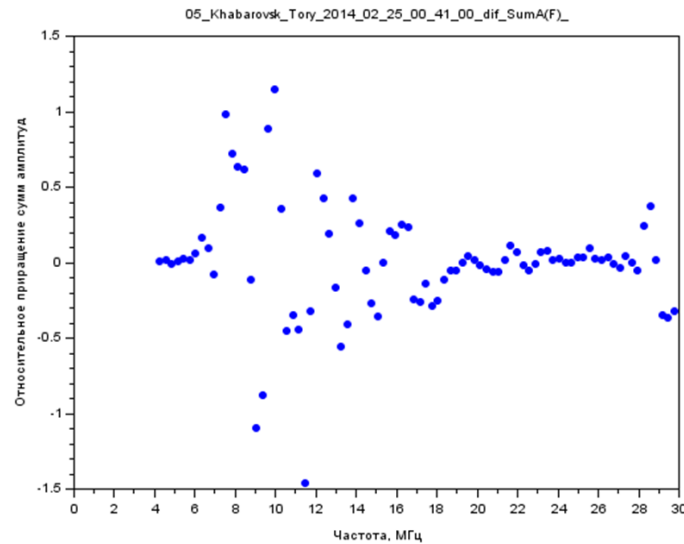


Таким образом, можно достаточно точно выделить по групповым задержкам область с полезным сигналом, выбрав для отсечки сумму амплитуд 5000 отн. ед. (рис. 5). Полезный сигнал для 00:41 UT (слева) находится в диапазоне групповых путей 2350÷2760 км, а для 00:51 UT (справа) – в диапазоне 2394÷2444 км.



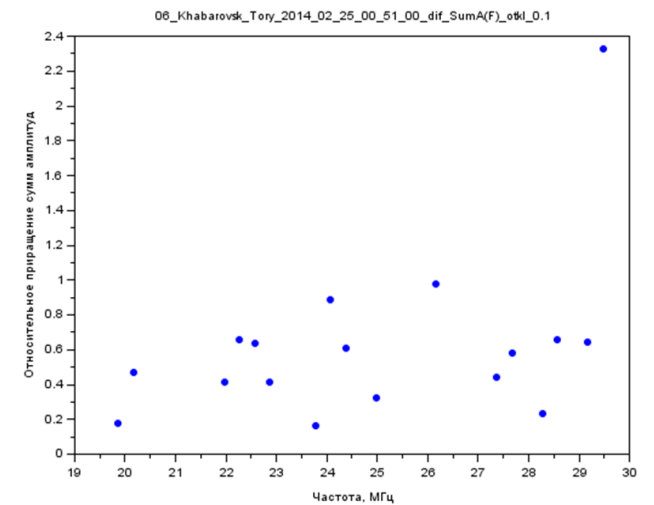
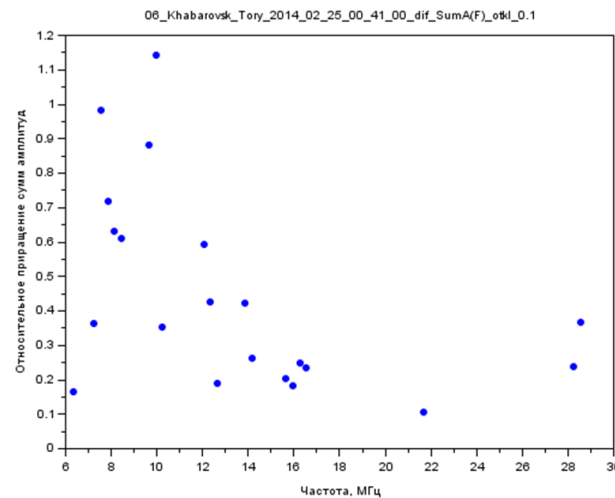
Далее перейдем к анализу сумм амплитуд в зависимости от частоты в выбранном диапазоне групповых путей. На рис. 6 приведены зависимости $\Sigma A(F)$ для 00:41 UT (слева) и 00:51 UT (справа), рассчитанные с шагом 0,3 МГц.

Вычисляем приращение сумм амплитуд на каждом шаге 0,3 МГц, отнесенное к среднему значению сумм амплитуд. На **рис. 7** приведены относительные приращения сумм амплитуд для 00:41 UT (слева) и 00:51 UT (справа).



Наинизшую наблюдаемую частоту снимаем в том случае, когда относительное приращение сумм амплитуд в первый раз со стороны более низких частот превысит 0.1.

На **рис. 8** приведены зависимости относительных приращений сумм амплитуд, превышающих пороговый уровень 0.1. Соответственно, ННЧ = 6.38 МГц в 00:41UT и ННЧ = 19.88 МГц в 00:51UT, что полностью совпадает с результатами ручной обработки. Это наименьшие значения по частоте на рис. 8 для соответствующих моментов времени.



Выводы

В работе описывается программа для автоматической интерпретации наименьшей наблюдаемой частоты в периоды солнечных вспышек, основанная на анализе ионограмм НЗ при помощи суммирования амплитуд для определения области полезного сигнала на ионограмме в зависимости от группового пути и частоты. На первом этапе работы программы проводится фильтрация по уровню 30 отн. ед. Далее строится зависимость суммы амплитуд от группового пути. Амплитуды суммируются на интервале от минимального до максимального группового пути на каждом участке в 10 км. Далее вычисляется приращение сумм амплитуд на каждом шаге 0.3 МГц, отнесенное к среднему значению сумм амплитуд. ННЧ определяется как частота, на которой относительное приращение сумм амплитуд со стороны наиболее низких частот в первый раз превысит уровень 0.1. Работа программы описывается на примере солнечной вспышки 25.02.2014 г.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 18-05-00539 А. Данные ЛЧМ-зондирования ионосферы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" (<http://skp-rf.ru/skp/3056>) в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12.