

УДК: 087.2 + 537.87

DOI: 10.26907/rwp29.2025.209-212

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СМПИВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ РАЗНЕСЕННОЙ ТРЕХТОЧЕЧНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЛЧМ-СИГНАЛОВ СЛАБО НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Е.А. Трофимов, А.В. Ойнац, М.В. Толстиков, М.В. Цедрик, Н.А. Громик,
С.Н. Пономарчук, В.П. Грозов

*Институт Солнечно-Земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291
E-mail: trofimov@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе представлена методика определения характеристик СМПИВ на основе данных слабонаклонного зондирования ионосферы ЛЧМ-сигналом. Приводятся результаты тестирования методики на основе модельных возмущений электронной концентрации, а также апробации на данных наблюдений за 2 января 2022 года.

Ключевые слова: ионосфера, СМПИВ, ионозонд

DETERMINATION OF TID CHARACTERISTICS ON THE BASIS OF SPECTRAL ANALYSIS OF DATA OF THREE-POINT SPACED REGISTRATION OF LFM SIGNALS OF WEAKLY INCLINED IONOSPHERIC SOUNDING

Е.А. Trofimov, A.V. Oinats, M.V. Tolstikov, M.V. Cedrik, N.A. Gromik, S.N. Ponomarchuk,
V.P. Grozov

Abstract. The paper presents a methodology for determining the characteristics of TID based on the data of quasi-vertical ionospheric sounding by chirp signal. The results of testing the technique on the basis of model perturbations of the electron concentration, as well as approbation on the observational data for 2 January 2022 are presented.

Keywords: ionosphere, MSTID, ionosonde

Введение

Ионосфера является открытой динамической средой, поэтому в ней происходят разнообразные по физической природе процессы. Такие процессы обусловлены воздействием различных факторов, таких как: солнечное излучение, солнечный ветер, метеорологические процессы в нижней атмосфере, воздействие человека на окружающую среду. Основные параметры ионосферной плазмы (степень ионизации, химический состав и температура заряженных и нейтральных компонентов) изменяются в различных временных и пространственных масштабах. В отдельную группу принято выделять флуктуации, которые могут распространяться на значительные расстояния без изменения своей формы – перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ).

В ИСЗФ СО РАН на регулярной основе проводится мониторинг ионосферы на базе трех близко расположенных радиотрасс слабонаклонного зондирования ЛЧМ-сигналом (СНЗ). Трассы образуют почти равносторонний треугольник с вершинами в п. Торы (приемо-передающий ЛЧМ-ионозонд), п. Патроны (ЛЧМ-приемник) и г. Усолье-Сибирское (ЛЧМ-передатчик). Зондирование проводится с высоким временным разрешением (15-60 секунд). Разработанный программный комплекс вторичной обработки, интерпретации и инверсии ионограмм СНЗ позволяет в автоматическом режиме получать высотные профили электронной концентрации, которые соответствуют средним точкам указанных радиотрасс. В данной работе предлагается методика определения пространственно-временной структуры и характеристик распространения перемещающихся ионосферных возмущений, основанная на спектральном анализе временной динамики получаемых высотных профилей электронной концентрации.

Методика обработки и определения параметров СМПИВ

Основные этапы обработки изображены на блок-схеме (рис. 1).

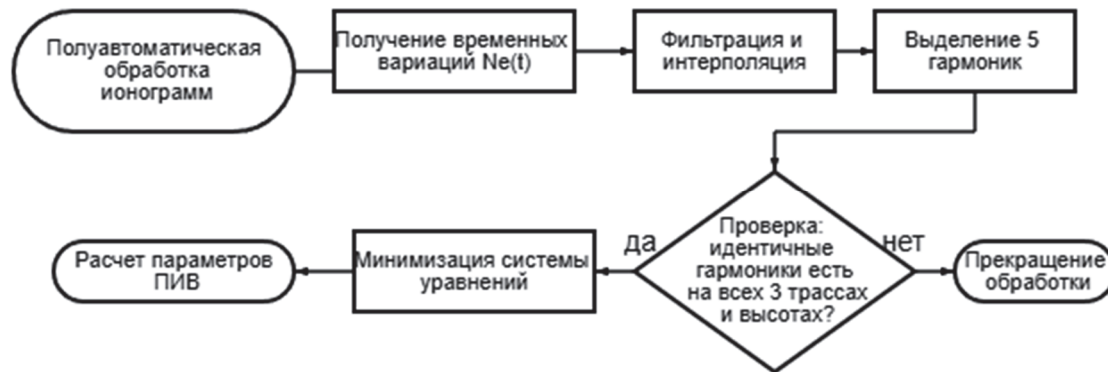


Рис. 1. Основные этапы обработки ионограмм и определения параметров СМПИВ.

Поэтапный процесс определения параметров можно описать следующим образом:

- 1) полуавтоматическая вторичная обработка и интерпретация ионограмм, инверсия высотных профилей электронной концентрации;
- 2) получение временных вариаций электронной концентрации для 3-х заданных высот;
- 3) фильтрация выбросов и интерполяция к единой временной сетке;
- 4) быстрое преобразование Фурье (БПФ) вариаций электронной концентрации для выборки длительностью 2-6 часов со сглаживающим окном Блэкмана;
- 5) выделение из БПФ амплитуды и фазы 5-ти гармоник с максимальной амплитудой;
- 6) проверка, что идентичные гармоники (из п. 5) присутствуют на всех 3-х трассах и 3-х высотах;
- 7) в случае выполнения п. 6 – минимизация системы линейных уравнений для разностей фаз плоской волны для средних высот: расчет горизонтальных компонент волнового вектора k_x и k_y ;
- 8) расчет по разности фаз вертикальной компоненты волнового вектора k_z ;
- 9) по полученному набору частот f_i и волновых векторов \vec{k}_i расчет остальных параметров ПИВ (азимут, угол наклона фронта, длина волны).

Вторичная обработка и интерпретация ионограмм СНЗ проводится по ранее разработанному алгоритму [1]. Инверсия профиля электронной концентрации проводится по методу, описанному в [2]. Полученные при инверсии профили привязываются к соответствующим средним точкам трасс СНЗ.

При автоматической интерпретации ионограмм СНЗ и инверсии профилей электронной концентрации (п. 1) зачастую возникают ошибки, вызванные различными факторами: сложная структура самой ионограммы (наличие экранирующих слоев, искажения и наличие нерегулярных треков), слабая амплитуда сигнала, помехи в точке приема, несовершенство алгоритма интерпретации. Это приводит к тому, что в вариациях электронной концентрации (п. 2) возникают нереалистичные выбросы и скачки. В связи с этим, перед проведением спектральной обработки проводится фильтрация выделенных вариаций, заполнение возникающих пробелов и приведение времени к единой эквидистантной сетке (п. 3).

На рис. 2 для примера показаны вариации электронной концентрации на высоте 250 км за 02.01.2022 в средней точке трассы Торы-Патроны. Отметим, что «пустые» участки на графике вариаций связаны с экранировкой трека от F2 слоя ионосферы треком Es. Такие участки из дальнейшей обработки исключаются.

Спектральная обработка (п. 4) может проводиться для выборки 2-6 часов с минимальным шагом, соответствующим интервалам времени регистрации ионограмм. Для определения

параметров ПИВ использовался фазоразностный метод [3]. В основе метода лежит выделение из всего спектра вариаций электронной концентрации одной главной гармоники и оценка разности фаз в разных точках пространства (п. 5)

$$\phi = \vec{k}\vec{r} - \omega t + \phi_0. \quad (1)$$

где ϕ – фаза ПИВ, \vec{k} – полный волновой вектор, \vec{r} – радиус вектор, ω – циклическая частота, t – время, ϕ_0 – начальная фаза волны.

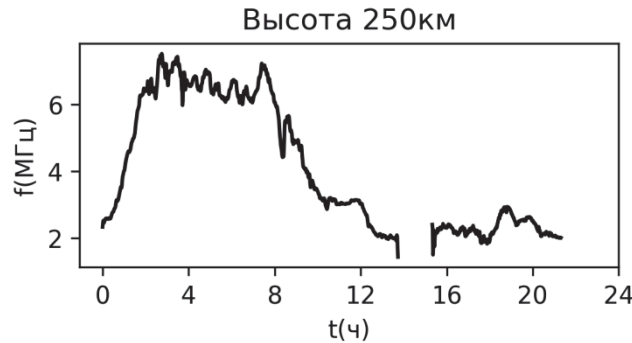


Рис. 2. Вариации электронной концентрации на высоте 250 км по данным СНЗ Торы-Патроны 02.01.2022

Важно отметить, что частота гармоники должна в точности совпасть для всех точек пространства, где проводятся измерения (п. 6). На рисунке 3 для примера представлены вариации электронной концентрации для 3 трасс в период с 0 до 6 UT 02.01.2022 (рис. 3а) и их спектры (рис. 3б). На рис. 3б видно, что для всех трех спектров имеется максимум на частоте ~ 0.278 МГц. Таким образом, это свидетельствует о возможности дальнейшей минимизации системы уравнений на разности фаз для получения параметров возмущения (п. 7–9).

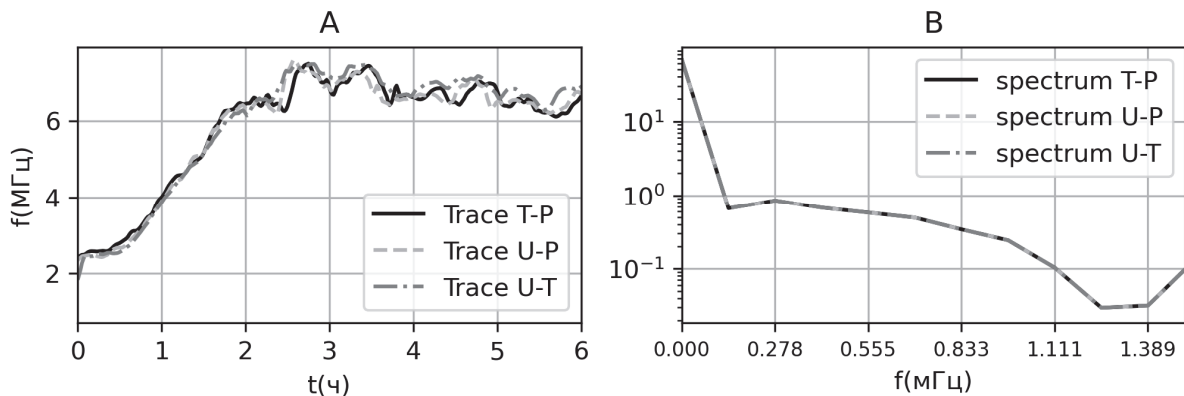


Рис. 3. Вариации электронной концентрации (А) и спектр этих вариаций (Б)

Описанная выше методика обработки и определения параметров СМПИВ была апробирована на тестовых распределениях электронной концентрации с искусственно внесенным возмущением с заданными параметрами. Тест проводился несколько раз с различными значениями параметров. Алгоритм достаточно точно (до сотых долей) определил значения вертикальной и горизонтальной скорости, периода, угла наклона и азимута в каждом тесте, из чего можно сделать вывод о его работоспособности.

Апробация методики на данных наблюдений проведено для набора ионограмм, полученных 2 января 2022 года. Гистограммы рассчитанных параметров СМПИВ представлены на рис. 4. Средние значения определяемых параметров составили: абсолютная скорость ~ 80 м/с, что соответствует скоростям основного источника СМ ПИВ – ВГВ. Однако хорошо видно, что в распределении присутствуют возмущения, распространяющиеся и с существенно большими скоростями (400-500 м/с, хвост на гистограмме со скоростями, характерными для акустических

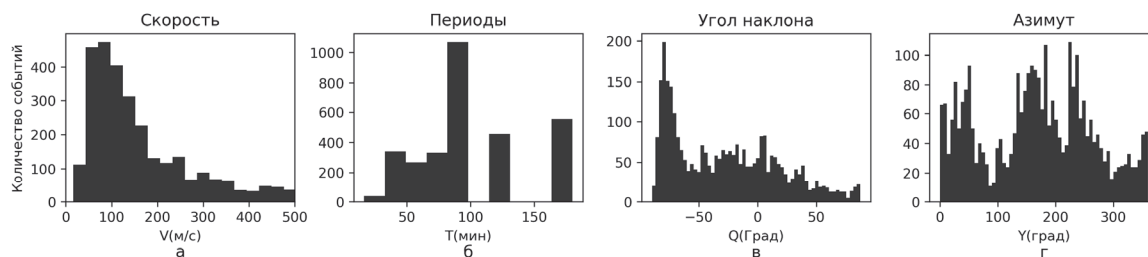


Рис. 4. Параметры возмущений за 02.01.2022: а) полная скорость, б) период, в) угол наклона, г) азимут

волн). Период ~ 90 минут, угол наклона -75° , что так же соответствует ВГВ, так как они распространяются преимущественно сверху вниз. Распределение угла наклона слегка странное, так как ожидается пик в отрицательной части гистограммы и плавный спад до положительной, вместо этого наблюдается второй пик вблизи нуля. Это может быть обусловлено захватом возмущений в ночное время суток. Такие ПИВ не являются следствием взаимодействия ВГВ с ионосферой и их параметры отличны от ожидаемых. Выделяются три преимущественных направления распространения ПИВ: северо-западное (50°) - утро, северо-восточное (170°) - день и юго-восточное (250°) - вечер. Данные направления объясняются (и хорошо соответствуют) суточными вариациями направления распространения горизонтального нейтрального ветра на высотах F2 области ионосферы в средних широтах. Средняя длина волны составила 320 км, что соответствует масштабам СМ ПИВ.

Заключение

Предложена методика определения параметров ПИВ на основе спектрального анализа динамики вертикальных профилей электронной концентрации, полученных по данным слабонаклонного зондирования ЛЧМ-сигналом на ионозонде ИСЗФ СО РАН. Алгоритм предполагает получение профилей электронной концентрации в автоматическом режиме с целью осуществления непрерывного мониторинга параметров ионосферных возмущений. Выявленные методические ограничения не позволили пока реализовать полностью автоматический режим обработки, и в данной работе предложен компромиссный вариант полуавтоматической обработки данных с предварительной фильтрацией выбросов. В дальнейшем планируется оптимизировать процесс расчета параметров и обработать весь массив данных ЛЧМ-ионозонда.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Результаты получены с использованием оборудования ИСЗФ СО РАН, входящего в Центр коллективного пользования «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>).

Список литературы

1. Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V. Technique of ionospheric parameters automatic determination from data of vertical sounding with a continuous chirp signal // Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2023. – 127806Q. DOI: 10.1117/12.2688438.
2. Михайлов С.Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. XLII, № 10. – С. 855–872.
3. Медведев А.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В., Кушнарев Д.С. Метод исследования пространственно-временной структуры волновых возмущений в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49. – № 6. – С. 812–823.