УДК 621.371.3+537.87
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-469
ORCID 0009-0009-1821-8431

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПИВ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А.В. Софьин, А.В. Ойнац

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, sofyin@iszf.irk.ru

DETERMINATION OF TID'S DYNAMIC PARAMETERS BASED ON IONOSPHERIC OBLIQUE SOUNDING DATA

A.V. Sofyin, A.V. Oinats

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, sofyin@iszf.irk.ru

Аннотация. Предлагается способ анализа данных наклонного зондирования (НЗ) ионосферы с целью исследования динамических параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). В основе способа лежит применение периодограмм Ломба—Скаргла к набору данных НЗ, последовательно зарегистрированных на заданной трассе. Это позволяет в автоматизированном режиме определять временные интервалы появления ПИВ, их периоды и некоторые другие характеристики. Апробация разработанного алгоритма проводится на примере данных, полученных на сети ЛЧМ-ионозондов ИСЗФ СО РАН.

Ключевые слова: автоматическая обработка данных, периодограмма Ломба—Скаргла, анализ временных рядов, ионосфера, наклонное зондирование ионосферы.

Abstract. This paper proposes a method for analyzing ionospheric oblique sounding (OS) data to study the dynamic parameters of traveling ionospheric disturbances (TIDs). The proposed method is based on the application of Lomb—Scargle periodograms to a set of OS data sequentially recorded along a given path. This allows for the automated determination of TID occurrence time intervals, their periods, and certain other characteristics. The developed algorithm is being tested using data obtained from the ISTP SB RAS chirp ionosonde network.

Keywords: Automatic data processing, Lomb—Scargle periodogram, time series analysis, ionosphere, oblique sounding of the ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетнюю историю исследований искажений ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы, вызванных влиянием среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ) [Hocke, Schlegel, 1996; Cooper, Cummack, 1986], проблема идентификации источников СМ ПИВ по экспериментальным ионогрммам НЗ остается актуальной. В настоящее время проводятся эксперименты на системах радиотрасс в разных регионах с высоким временным разрешением для регистрации эффектов, вызванных СМ ПИВ НЗ [Reinisch et al., 2018; Heitmann et al., 2018; Вертоградов и др., 2008; Kurkin et al., 2024]. В связи с этим накапливается значительный объем данных, требующих обработки и последующей интерпретации, что при выполнении в ручном режиме требует существенных временных затрат. Поэтому представляет интерес разработка алгоритма автоматической обработки большого объема ионограмм НЗ. Поскольку в отдельные моменты времени данные ионограмм НЗ могут отсутствовать, для построения периодограмм целесообразно использовать метод Ломба—Скаргла, предназначенный для анализа нерегулярно дискретизированных временных рядов.

Целью данной работы является разработка алгоритма автоматизированной обработки ионограмм НЗ, позволяющего строить периодограммы и определять такие параметры ПИВ, как временные интервалы появления возмущений, их периоды и некоторые другие характеристики.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ

Разработка и апробация алгоритма проводилась на основе экспериментальных данных, полученных с помощью многофункционального ЛЧМ-ионозонда «Ионозонд-МС», в качестве примера были выбраны данные радиотрассы Магадан—Торы. Основная идея алгоритма состоит в том, чтобы сопоставить каждой отдельной ионограмме зависимость частоты от группового пути сигнала. Для каждого значения группового пути была выбрана наибольшая частота с ненулевой амплитудой сигнала, как показано на рис. 1. С целью исключения влияния помех каждая ионограмма была предварительно обработана двумерным медианным фильтром третьего порядка с окном 3 на 3.

Далее полученный набор зависимостей частоты от группового пути был объединен в *f*-карту [Yusupov et al., 2020], в которой по горизонтальной оси откладывалось время, по вертикальной — значения группового пути, а цветом отображалась частота сигнала. На рис. 2 показано, что для отдельных значений группового пути наблюдаются колебания частоты F-слоя. Кроме того, данные колебания характеризуются наличием наклона, что может быть связано с параметрами ПИВ, в частности со скоростью движения. На дальности 3170 км в окрестностях времени 03:00 UT 01.07 и 03:00 UT 02.07 присутствует E-слой. При фиксированном значении группового пути была построена зависимость частоты сигнала от времени. Из рис. 3 видно, что с 20:00 UT 01.07 до 06:00 UT 02.07 наблюдаются выраженные колебания частоты, что может свидетельствовать о наличии волнового возмущения в ионосфере.

Следующим этапом исследования стало вычисление периодограмм Ломба—Скаргла для фиксированного момента времени при разных значениях группового пути. Для анализа был выбран момент времени 01:00 UT 02.07, при этом размер окна преобразования составил 6 ч. Как показано на рис. 4, в диапазоне групповых путей 3240– 3330 км наблюдается ярко выраженный период T = 220 мин. Кроме того, видно локальное увеличение амплитуды в области 3170 км, что соответствует наличию E-слоя, (см. рис. 2). Представляет интерес апробация данного алгоритма на таких событиях, как солнечные вспышки в ноябре–декабре 2023 г. [Пономарчук, Золотухина, 2023].

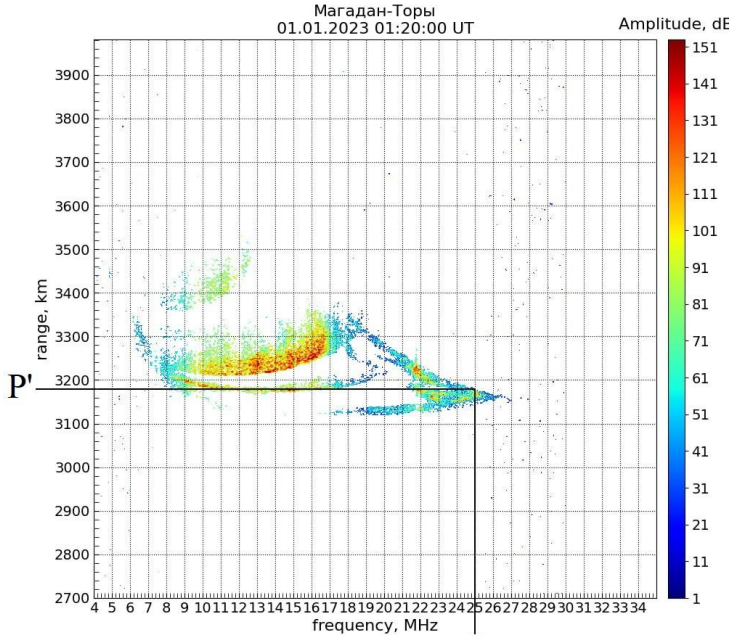

Рис. 1. Экспериментальная ионограмма трассы Магадан—Торы

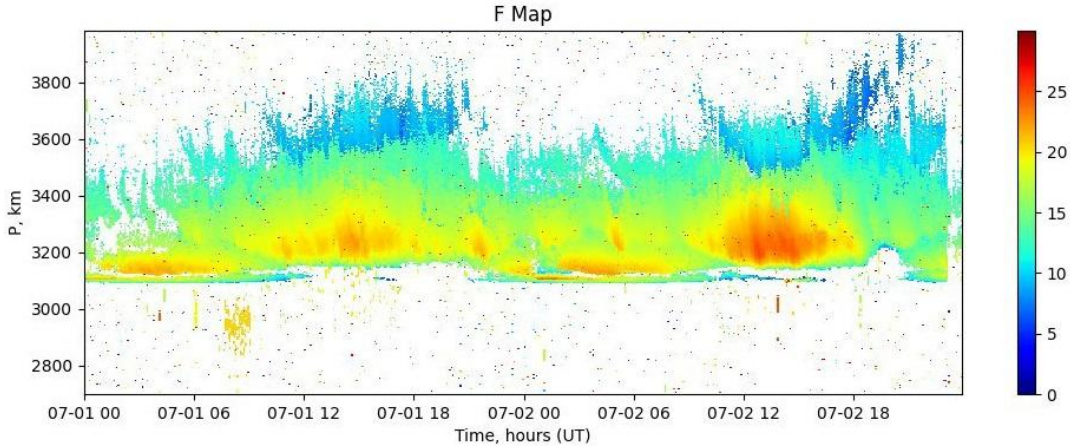

Рис. 2. Пример *f*-карты для трассы Магадан—Торы 01–02.07.2023

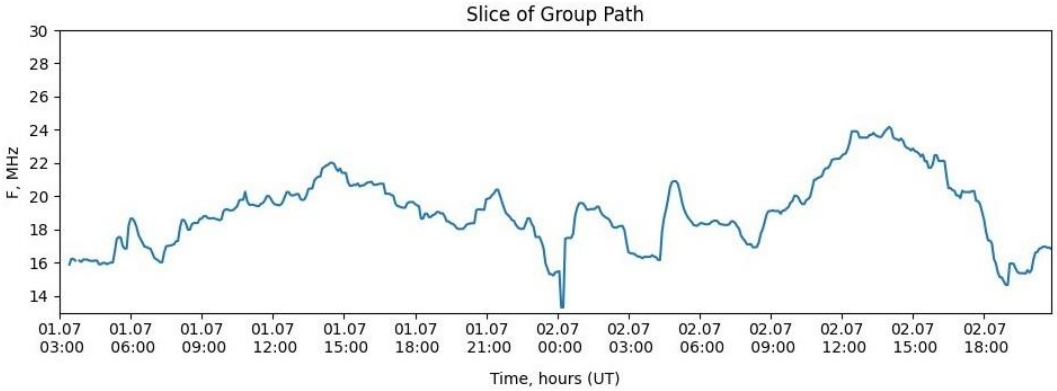

Рис. 3. Ход частоты на групповом пути P′ = 3250 км

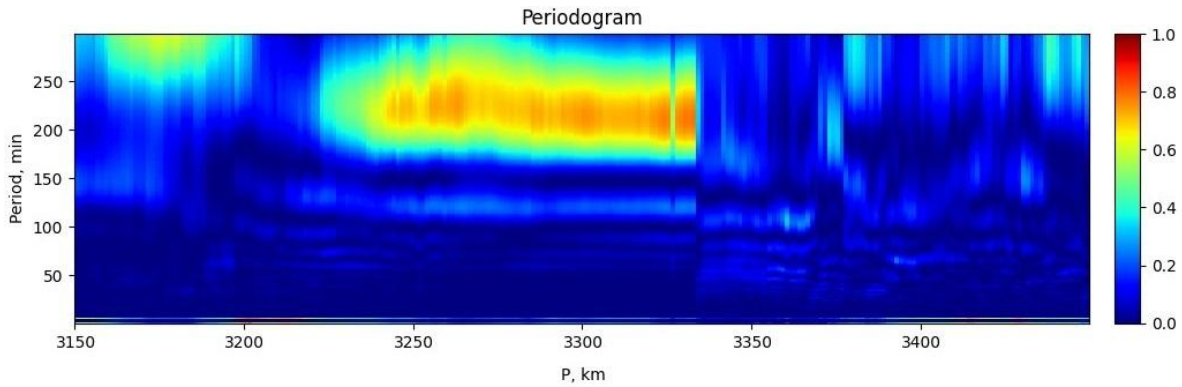

Рис. 4. Периодограммы для момента времени 01:00 UT 02.07 и разных значений группового пути

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данных, полученных с помощью ЛЧМ-ионозонда «Ионозонд-МС», была показана работа алгоритма автоматизированной обработки ионограмм наклонного зондирования. Разработанная программа позволяет в краткие сроки обрабатывать большие массивы данных и извлекать из них параметры ПИВ. С использованием данного алгоритма было выявлено волновое возмущение и определен его период.

В дальнейшем предполагается расширение алгоритма, поскольку остается открытым вопрос о природе наблюдаемых наклонов возмущений на *f*-картах и их связи с другими параметрами возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН (https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/).

Авторы выражают благодарность Подлесному А.В, Цедрику М.В. и Иванову Д.В. за предоставление непрерывных экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вертоградов Г.Г., Денисенко П.Ф., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П., Мониторинг среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т.13, № 5. С. 35–44.

Пономарчук С. Н., Золотухина Н. А., Возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, № 4. С. 91–105.

Kurkin V.I., Podlesny A.V., Tsedrik M.V., Soph'in A.V. Seasonal and daily features of the characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in Asian Russia in years of moderate solar activity // Geomagnetism and Aeronomy. 2024. V. 64, N 3. P. 369–375.

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14, N 9. P. 917–940. DOI: 10.1007/s00585-996-0917-6.

Cooper J., Cummack C.H., The analysis of travelling ionospheric disturbance with nonlinear ionospheric response // J. Atm. Terr. Phys. 1986. V. 48, N 1. P. 61–64.

Reinisch, B., Galkin I., Belehaki A., et al., Pilot ionosonde network for identification of traveling ionospheric disturbances // Radio Sci. 2018. V. 53. P. 365–378. DOI: 10.1002/2017RS006263.

Heitmann A.J., Cervera M.A., Gardiner-Garden R.S., et al. Observations and modelling of travelling ionospheric disturbance signature from an Australian network of oblique angle-of-arrival sounders // Radio Sci. 2018. V. 53. P. 1089–1107.

Yusupov K.M. et al. Amplitude variations of the reflected signal during vertical sounding of the ionosphere at middle latitudes // Solar-Terr. Phys. 2020. V. 6, iss. 3. P. 72–80.