

## АМПЛИТУДНЫЕ КАРТЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ КОМПОНЕНТ СИГНАЛОВ ЛЧМ-ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

М.В. Цедрик

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
mark7cedrick@gmail.com

## IONOSPHERE CHIRP-SOUNDING SIGNALS POLARIZATION COMPONENTS AMPLITUDE MAPS

M.V. Cedrik

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
mark7cedrick@gmail.com

**Аннотация.** В работе кратко описывается сеть многопозиционного приема сигналов ЛЧМ-зондирования ионосферы, развернутая на базе ИСЗФ СО РАН и состоящая из ионозондов «Ионозонд МС». Данные, получаемые сетью, представлены в формате амплитудных карт обыкновенной моды отраженного от ионосферы сигнала.

**Ключевые слова:** амплитудная карта, А-карта, слабонаклонное зондирование, ЛЧМ-зондирование, вертикальное зондирование ионосферы.

**Abstract.** This paper briefly describes ionosphere Chirp-sounding signals reception multi-position network, deployed on the basis of the ISZF SB RAS and consisting of ionosondes “Ionosonde MS”. The data obtained with the network is presented in the format of amplitude maps of the ordinary mode of the signal reflected from the ionosphere.

**Keywords:** A-map, near-vertical sounding, Chirp-sounding, vertical incidence ionosphere sounding.

### ВВЕДЕНИЕ

Для исследования характеристик мелкомасштабных и среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с высоким пространственным и временным разрешением применяется разнесенный прием отраженных от ионосферы сигналов слабонаклонного зондирования (СНЗ) в учащенном режиме [Medvedev et al., 2013; Vybornov et al., 2022].

В условиях работы с данными ионосферного зондирования, получаемыми в учащенном режиме на нескольких приемных пунктах, возникает необходимость в использовании способов представления данных, позволяющих в пределах одного графика отобразить динамику изменения ионосферных характеристик и проявления возмущений на длительном временном интервале, поскольку такой подход позволяет существенно ускорить предварительный анализ получаемых данных.

Одним из таких способов представления данных являются амплитудные карты (А-карты), построенные на основе максимумов амплитуд отраженного сигнала [Акчурун и др., 2013; Куркин и др., 2014; Цедрик и др., 2019].

Для упрощения задачи автоматической обработки и интерпретации данных радиозондирования ионосферы применяется разделение магнитоионных компонент зондирующего сигнала [Harris, Pederick 2017]. На ионозонде «Ионозонд МС» [Подлесный и др., 2013] реализовано аппаратное разделение поляризационных компонент сигнала при помощи приема на поляриметрические системы ортогональных антенн.

В связи с реализацией алгоритма аппаратного разделения поляризационных компонент сигнала, прошедшего ионосферный радиоканал, появляется возможность построения и анализа амплитудных карт

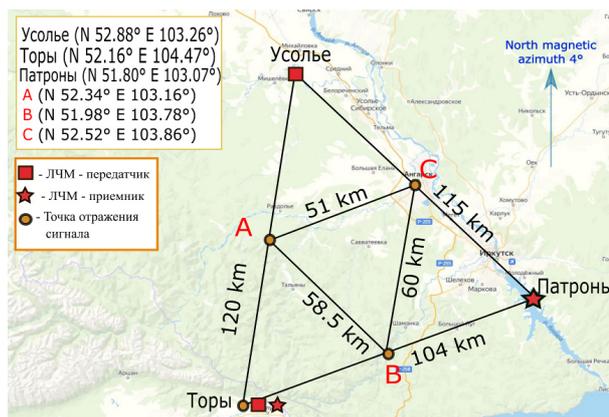


Рис. 1. Схема расположения пунктов и средних точек радиотрасс СНЗ: А — Усолье—Торы, В — Торы—Патроны, С — Усолье—Патроны

сигналов обыкновенной и необыкновенной мод по отдельности.

### СЕТЬ СЛАБОНАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В 2021 г. существующая сеть ЛЧМ-ионозондов ИСЗФ СО РАН была дополнена еще одним приемным пунктом в п. Патроны. Таким образом, была организована сеть разнесенного приема сигналов слабонаклонного зондирования ионосферы (СНЗ), геометрия которой показана на рис. 1.

В эксперименте используются два ЛЧМ-передатчика и два приемника. Вместе они образуют три слабонаклонные трассы радиозондирования и реализуют вертикальное зондирование (ВЗ) в с. Торы.

Из-за конструктивных особенностей и различия используемых трасс распространения зондирующего сигнала режимы работы двух используемых передатчиков различаются, что отражено в таблице. Мощности передатчиков составляют 10 Вт.

Трассы радиозондирования и параметры режимов зондирования

| Трасса         | Начальная частота, МГц | Конечная частота, МГц | Скорость Перестройки частоты, кГц/с | Скважность, с | Протяженность, км |
|----------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------|
| Усолье—Торы    | 1.5                    | 15                    | 600                                 | 60            | 120               |
| Усолье—Патроны | 1.5                    | 15                    | 600                                 | 60            | 115               |
| Торы—Патроны   | 1                      | 14                    | 1000                                | 15            | 104               |
| Торы—Торы      | 1                      | 14                    | 1000                                | 15            | ВЗ                |

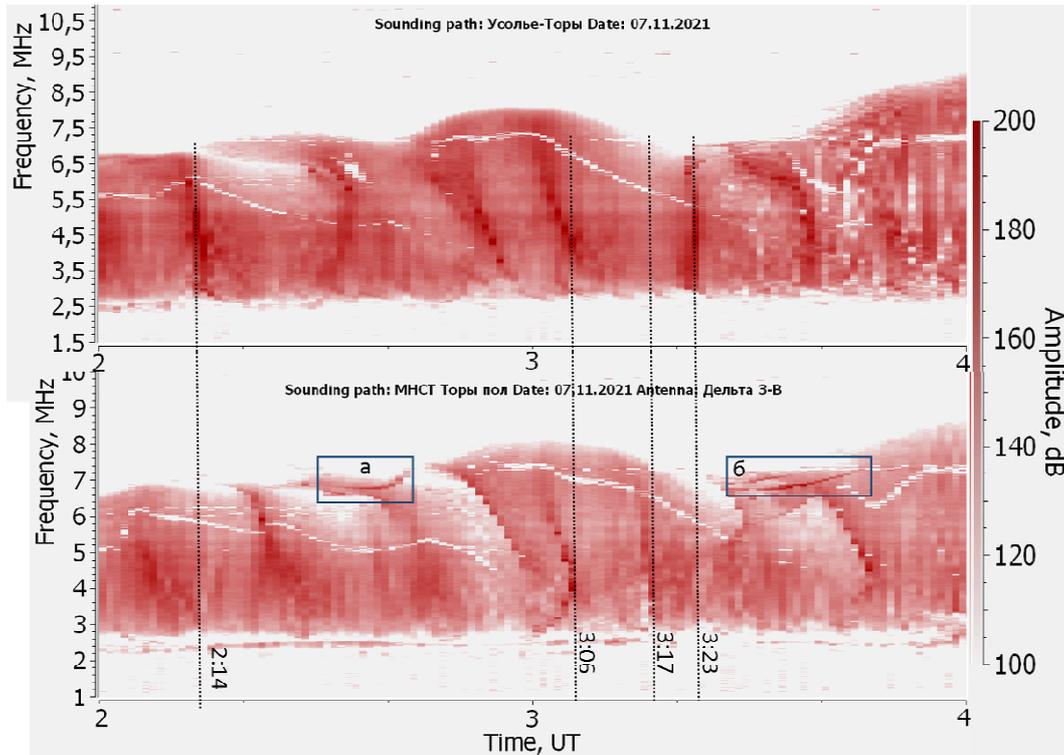


Рис. 2. Сравнение фрагментов А-карт обыкновенной моды сигнала для трасс Усолье—Торы (вверху) и Торы ВЗ (внизу)

### АМПЛИТУДНЫЕ КАРТЫ СИГНАЛОВ, РАЗДЕЛЕННЫХ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Поскольку скважность сеансов зондирования на разных радиотрассах различна, перед построением А-карт данные радиотрасс с большей скважностью сеансов были для удобства сравнения унифицированы с данными радиотрасс с более редкими сеансами зондирования путем прореживания.

На рис. 2 представлены А-карты двухчасового временного интервала для дня с возмущенными ионосферными условиями (значение индекса  $K_p=4$ ). Можно видеть, что даже для точек отражения сигнала, находящихся в 60 км друг от друга, есть разница как во времени проявления ПИВ, так и введении их следов на А-карте.

Особого внимания заслуживают следы возмущений, выделенные рамками а и б. Они являют собой не что иное, как след ПИВ, удаляющегося от точки отражения зондирующего сигнала. На последовательных ионограммах такая особенность, как правило, выглядит как серповидное искажение трека, движущееся вверх. В рамке б можно наблюдать следы сразу двух удаляющихся ПИВ, что случается довольно редко.

На рис. 3 показаны двухчасовые фрагменты А-карт для трасс Усолье—Патроны и Торы—Патроны, также входящих в систему многопозиционного приема сигналов СНЗ. Как и на рис. 2, здесь можно видеть, что сигнал передатчика в Усолье выглядит более мощным, что объясняется его меньшей скоростью перестройки частоты и, следовательно, большим временем накопления. Видно, что аналогично с рис. 2 даже в точках, расположенных в 60 км друг от друга, возмущения наблюдаются по-разному, а также имеют разную горизонтальную скорость. Не всегда ПИВ, проявившееся в одной точке, проявляется и в другой. В ходе анализа массива данных отслеживались времена появления схожих по виду следов ПИВ на А-картах для разных трасс, входящих в сеть. Например, в точке А в 2:14 UT было замечено возмущение, которое в 2:18 прошло через точку С, а в 2:22 — точку В. Соответственно, горизонтальная проекция скорости возмущения двигалась на восток.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная сеть многопозиционного приема сигналов СНЗ ионосферы позволяет решать следующие задачи: регистрация ПИВ с высоким пространственным и временным разрешением, их классификация

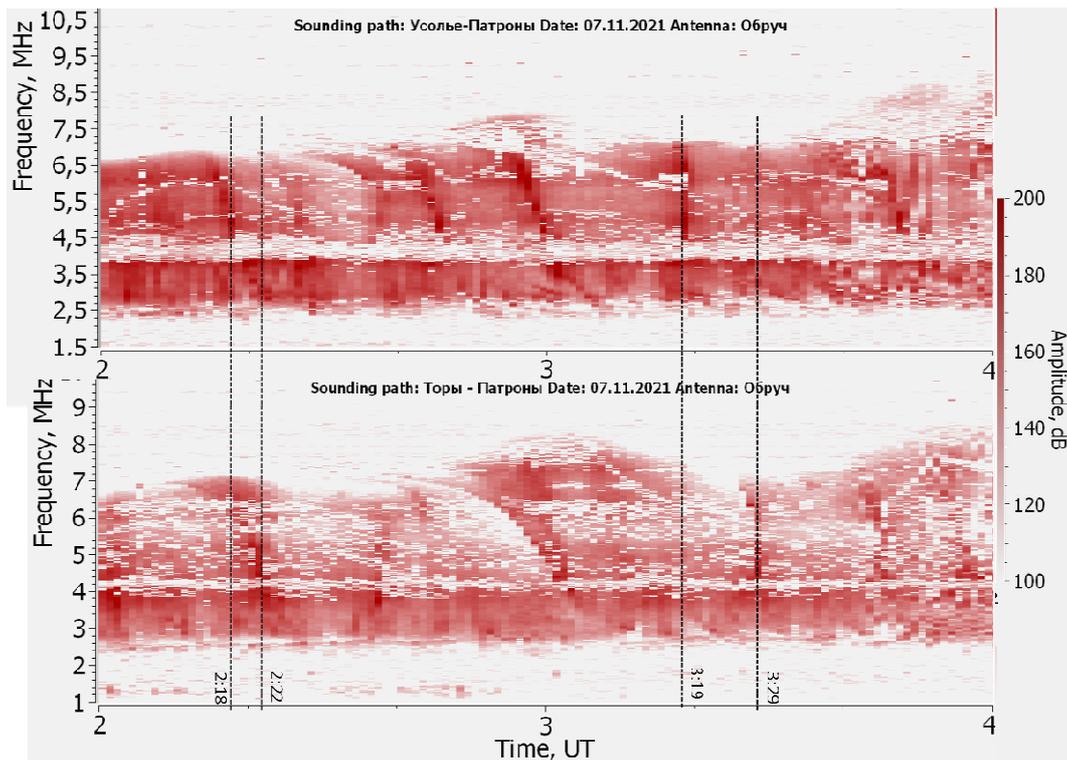


Рис. 3. Сравнение фрагментов А-карт обыкновенной моды сигнала для трасс Усолье—Патроны (вверху) и Торы—Патроны (внизу)

и оценка параметров, таких как горизонтальная проекция скорости и направление движения в режиме непрерывного мониторинга.

На основе полученных данных были построены и проанализированы амплитудные карты разделенных на поляризационные компоненты сигналов, прошедших ионосферный радиоканал.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>]. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-Г/З/Ц3569/278).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акчурин А.Д., Юсупов К.М., Шерстюков О.Н., Ильдиряков В.Р. Выделение быстротекущих и мелкомасштабных неоднородностей на одноминутных ионограммах ионозонда «Циклон». *Гелиогеофизические исследования*. 2013. № 4. С. 101–110.

Куркин В.И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В. Анализ квазиволновых возмущений ионосферы с помощью амплитудных карт по данным ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН. *Распространение радиоволн (РРВ-24): труды конференции*. 2014. С. 1.214–1.215.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 4. С. 24–31.

Цедрик М.В., Подлесный А.В., Науменко А.А., Куркин В.И. Анализ динамических амплитудных характеристик по данным сигналов вертикального ЛЧМ-зондирования // Распространение радиоволн. *Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2 тт.* 2019. С. 110–112.

Harris T.J., Pederick L.H. A robust automatic ionospheric O/X mode separation technique for vertical incidence sounders. *Radio Sci.* 2017. Vol. 52, no. 12. P. 1534–1543.

Medvedev A., Ratovsky K., Tolstikov M., et al. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 105/106. P. 350–357.

Vybornov F., Sheiner O., Kolchev A., et al. On the results of a special experiment on the registration of traveling ionospheric disturbances by a system of synchronously operating chirp ionosondes. *Atmosphere*. 2022 Vol. 13. 84. DOI: [10.3390/atmos13010084](https://doi.org/10.3390/atmos13010084).