

УДК: 537.87 + 551.511.3

DOI: 10.26907/rwp29.2025.155-158

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОГО ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ДАННЫМ МНОГОПОЗИЦИОННОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА ИСЗФ СО РАН

А.В. Ойнац, А.В. Подлесный, М.В. Цедрик, И.А. Зотова

*Институт солнечно–земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

*E-mail: oinats@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** В работе предлагается методика определения полного волнового вектора перемещающихся ионосферных возмущений по данным вертикального и слабонаклонного зондирования ионосферы на базе многопозиционного ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН. Особенностью методики является получение параметров возмущений без предварительной инверсии ионограмм в вертикальный профиль электронной концентрации. Приводятся результаты апробации методики на экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** перемещающиеся ионосферные возмущения; вертикальное и слабонаклонное ЛЧМ-зондирование ионосферы

## TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF ABSOLUTE WAVE VECTOR OF TRAVELLING IONOSPHERIC DISTURBANCES USING DATA FROM THE ISTP SB RAS MULTIPOINT CHIRP IONOSONDE

A.V. Oinats, A.V. Podlesnyi, M.V. Cedrik, I.A. Zotova

**Abstract.** We present a technique for determining the full wave vector of travelling ionospheric disturbances based on vertical and quasi-vertical ionospheric sounding data using the ISTP SB RAS multipoint chirp ionosonde. The advantage of the method is obtaining disturbance parameters without preliminary inversion of ionograms into a vertical electron density profile. The results of approbation of the technique on observational data are shown.

**Keywords:** travelling ionospheric disturbances; vertical and quasi-vertical chirp sounding of the ionosphere

### Введение

Перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) оказывают существенное влияние на распространение радиоволн различных диапазонов при радиосвязи, радиолокации и радионавигации, поэтому их диагностика и мониторинг являются актуальной задачей. Существующие методы диагностики ПИВ не всегда позволяют получать полный волновой вектор ПИВ, а тем более осуществлять автоматический мониторинг ПИВ в режиме реального времени [1]. Одним из ограничений исследования ПИВ с помощью метода вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы является необходимость проводить одновременные измерения в разнесенных в пространстве точках. Кроме того, автоматическая интерпретация ионограмм ВЗ и их инверсия в вертикальные профили электронной концентрации затруднительны. В данной работе предлагается методика оценки полного волнового вектора ПИВ на основе кросс-корреляционного анализа карт действующей высоты отражения декаметрового сигнала, полученных при вертикальном и слабонаклонном зондировании (ВЗ и СНЗ) ионосферы на базе многопозиционного ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН.

### Описание методики

Многопозиционный ЛЧМ-ионозонд ИСЗФ СО РАН [2] осуществляет мониторинг динамики ионосферы на трех близкорасположенных трассах СНЗ, образующих почти равносторонний треугольник: п. Торы – п. Патроны, г. Усолье–п. Торы, г. Усолье – п. Патроны, а также по данным ВЗ в п. Торы. На каждой трассе ионограммы регистрируются с временным разрешением от 15 секунд, шагом по частоте 20 кГц и разрешением по высоте 1.25 км.

На рис. 1 для примера приведена карта действующих высот, полученная при ВЗ в п. Торы 2 января 2022 г. Для построения карты действующих высот отражения каждая ионограмма проходит предварительную обработку из трёх этапов. На первом этапе проводится фильтрация матрицы относительных амплитуд двумерным медианным фильтром для устранения помех. На втором этапе результат пропускается через клеточный автомат для выделения точек со значимой

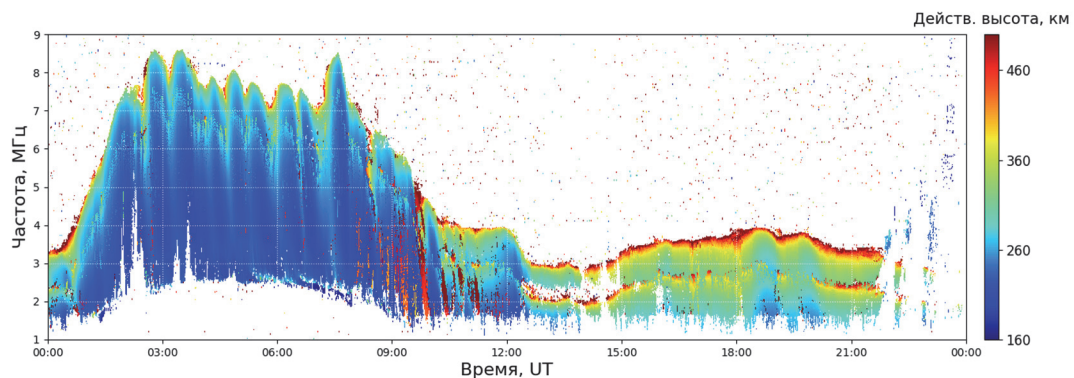


Рис. 1. Карта действующих высот, полученная при ВЗ в п. Торы 2 января 2022

амплитудой. Далее из всех таких точек выделяются точки с наименьшей действующей высотой для каждой рабочей частоты.

На карте (рис. 1) хорошо видны повторяющиеся наклонные полосы, особенно в дневное время - это очевидное проявление прохождения ПИВ. На картах для трасс СНЗ картина повторяется, но она немного сдвинута на некоторую задержку. Для оценки задержек между схожими вариациями сначала с помощью двумерного медианного фильтра из карт вычитается тренд, далее прямоугольным окном делается выборка данных, рассчитываются функции корреляции и среднеквадратичные отклонения (СКО). Задержка соответствует максимуму функции корреляции. СКО могут служить мерой амплитуды возмущения, однако их количественную связь непосредственно с вариациями электронной концентрации еще необходимо установить. Для каждой карты берется по три прямоугольных участка на соседних частотах, чтобы оценить не только горизонтальную структуру ПИВ, но и вертикальную. Кросс-корреляция каждого участка с каждым дает матрицу из  $12 \times 12 = 144$  значений задержек. Каждая такая задержка соответствует средней точке соответствующей трассы, поэтому горизонтальные прямоугольные координаты рассчитываются исходя из географических координат этих точек.

Для оценки истинной высоты отражения проводится расчет высотно-частотной характеристики (ВЧХ) для модельного профиля электронной концентрации, взятого из IRI-2020, адаптированной к текущему моменту времени по параметрам F2-слоя ионосферы. Расчет ВЧХ ведется для случая анизотропной ионосферы с параметрами геомагнитного поля, взятыми из модели IGRF. Далее определяется коэффициент отношения модельных истинной высоты и расчетной действующей для заданной плазменной частоты. Полученный коэффициент используется для пересчета медианной действующей высоты в каждом прямоугольном окне в истинную высоту. Адаптация модели может при этом осуществляться только по значению критической частоты, чтобы частотный диапазон ВЧХ соответствовал тому, который наблюдается на картах. Отметим, что для карт СНЗ наблюдаемые высоты пересчитываются в соответствующие действующие высоты ВЗ методом Смита с учетом реальной длины трассы.

В результате проделанных операций мы получаем задержки наблюдаемых вариаций между 12 точками в пространстве с известными координатами (3x4 по вертикали и горизонтали соответственно). В предположении, что исходное возмущение хорошо описывается моделью плоской волны, составляется система линейных уравнений (СЛУ) на неизвестные компоненты волнового вектора. Из СЛУ исключаются уравнения, соответствующие недостоверным коэффициентам корреляции (по  $r$ -уровню), а также коэффициентам корреляции меньше заданного порога. Порог определяется адаптивно в зависимости от количества «хороших» пар точек, позволяющих восстановить полный волновой вектор. После решения полученной переопределенной СЛУ методом наименьших квадратов, мы получаем оценки полной фазовой скорости ПИВ, азимута и угла наклона волнового вектора к горизонтالي.

Для оценки абсолютного значения волнового вектора в каждом прямоугольном окне рассчитывается периодограмма Ломба-Скаргла. Из периодограммы выбираются не более трех пиков с наибольшими амплитудами. Дополнительно оцениваются ширина и выраженность

пиков. Соответствующий итоговой СЛУ набор периодов и их характеристик (амплитуда, ширина и выраженность) кластеризуется методом К-средних. Количество кластеров подбирается адаптивно в зависимости от среднего коэффициента силуэта. Из получившихся кластеров выбирается тот, который состоит из наибольшего количества точек и при этом имеет наибольшие амплитуду и выраженность. Центр этого кластера далее используется, в качестве оценки периода наблюдаемых вариаций.

По окончании представленного выше анализа для заданного момента времени и некоторой высоты (определяемой частотой зондирования) получаем полный волновой вектор ПИВ. Далее анализ повторяется, но уже для нового момента времени и/или новой высоты.

### Результаты апробации методики на данных наблюдений

Тестирование методики, проведенное на данных моделирования, показало удовлетворительное согласие в параметрах исходных и восстановленных возмущений (подробнее см. И.А. Зотова, А.В. Ойнац, «Численное моделирование эффектов перемещающихся ионосферных возмущений по данным вертикального и слабонаклонного зондирования ионосферы на многопозиционном ЛЧМ-ионозонде ИСЗФ СО РАН» – текущий сборник).

Для апробации на данных наблюдений был выбран массив данных, полученных 2 января 2022 года. В указанный день зондирование на трассах СНЗ велось с временным разрешением 1 минута, сеансы ВЗ в п. Торы проводились каждые 15 секунд. В этой связи для дальнейшего анализа данные ВЗ были прорежены, чтобы соответствовать данным СНЗ. Карта действующих высот в зависимости от времени и частоты зондирования показана на рис. 1. На карте цветом показаны только отражения с действующими высотами больше 160 км. Высоты менее 160 км соответствуют отражениям от E/Es слоя и исключаются из рассмотрения. Белый цвет на карте – это либо отсутствие сигнала от F2-слоя, либо его экранировка E/Es-слоем.

Расчеты параметров ПИВ проводились для окна длительностью 1.5 часа и шириной 0.4 МГц. С учетом трех точек по высоте ширина области по частоте составляла 1.2 МГц, что эквивалентно примерно 10 км. Шаг по времени и по частоте составлял 15 минут и 0.8 МГц соответственно. Размеры медианного фильтра для вычитания тренда выбраны 1.5 часа по длительности и 180 кГц по частоте. В рассматриваемом случае для оценки истинной высоты адаптация модели IRI-2020 проводилась по значениям критической частоты и высоты максимума F2 слоя, полученным по данным DPS-4 в г. Иркутск.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения основных параметров, рассчитанные для указанной даты. Как видно из рис. 2а-в, основное направление распространения обнаруженных ПИВ – юго-юго-восток (азимут 150-180°). И это направление соответствует дневному времени. В ночное время наблюдаются любые направления, но преобладают запад и северо-запад (азимуты 270-330°). Угол наклона волнового вектора к горизонтالي (рис. 2г-е) имеет два максимума: от -90° до -55° и от 75° до 85°. Как и в случае с азимутами, эти максимумы в основном соответствуют дневному времени, а в ночное угол наклона распределен достаточно равномерно, за исключением интервала 50-90°. Отметим, что дневные распределения азимутов и углов наклона соответствуют тем, что ожидаются для внутренних гравитационных волн (ВГВ), распространяющихся на высотах ионосферы [3]. Азимуты ВГВ в основном следуют динамике горизонтального нейтрального ветра. Фазовая скорость ВГВ, распространяющихся вверх, направлена перпендикулярно групповой скорости вниз. Некоторое количество возмущений, распространяющихся вниз (положительные углы наклона), может объясняться прохождением ВГВ, отраженных от вышележащих слоев атмосферы.

Наблюдаемые периоды ПИВ (рис. 2ж) лежат в интервале 5-55 минут с максимумом ~20 минут. Скорость (фазовая, рис. 2з) в основном лежит в интервале от 0 до 150 м/с с максимумом ~37 м/с. Хотя наблюдаются и большие скорости, вплоть до 500 м/с, что примерно соответствует скорости звука на высотах ионосферы. Длина волны (не показаны на рис. 2) в основном не превосходит 200 км, что соответствует средним масштабным возмущениям.

Высоты, на которых регистрировались ПИВ (рис. 2и), 160-260 км, соответствуют F2 области ионосферы. При этом в дневное время высоты в основном меньше 200 км, а в ночное время ПИВ регистрировались выше 200 км.

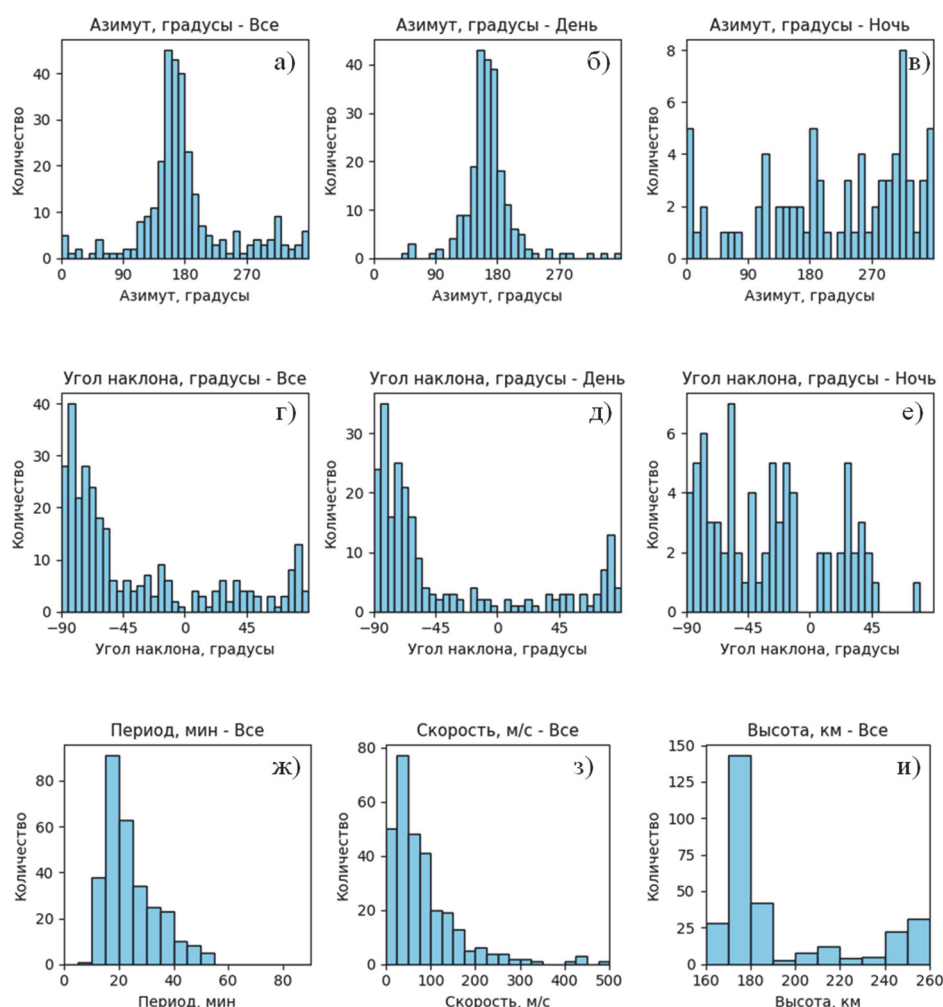


Рис. 2. Параметры ПИВ для 2 января 2022: азимут (а-в), угол наклона (г-е), период (ж), скорость (з), высота регистрации (и)

### Заключение

В работе представлена методика оценки полного волнового вектора ПИВ по данным близкорасположенных пунктов ВЗ и трасс СНЗ ионосферы. В основе методики лежит кросс-корреляционный анализ карт действующей высоты. Тестирование и апробация на данных наблюдений показали, что методика вполне работоспособна и в перспективе может быть использована для обработки данных наблюдений в автоматическом режиме.

### 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. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Oinats A.V., Alsatkin S.S., Zhrebtsov G.A., Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2017. – Vol. 122. – P. 7567–7580. doi:10.1002/2017JA024103.
2. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В., Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С. 24–31.
3. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. – 1960. – Vol. 38. – P. 1441–1481.