

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫХ ЛЧМ-СТАНЦИЙ  
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

**Ф. И. Выборнов<sup>1,4</sup>, Н. В. Бахметьева<sup>1</sup>, Е. Ю. Зыков<sup>2</sup>, А. А. Колчев<sup>2</sup>  
А. В. Першин<sup>1</sup>, А. Г. Чернов<sup>3</sup>, В. В. Шумаев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> НИРФИ Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия

E-mail: vybornov@nirfi.unn.ru; nv\_bakhm@nirfi.unn.ru

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

E-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru; kolchevaa@mail.ru

<sup>3</sup> «SITCOM» LLC, Йошкар-Ола, Россия

E-mail: shvvladimir@mail.ru, chalexr@mail.ru

<sup>4</sup> Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

E-mail: kaf\_phys@vsuwt.ru

**Аннотация.** Представлены результаты наблюдений перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) по данным работы сети ЛЧМ-станций наклонного зондирования ионосферы в декабре 2019 года. Для наблюдений использовались однотипные ЛЧМ-станции, расположенные в пос. Васильсурск, Йошкар-Оле, Казани и Нижнем Новгороде. Станции образовывали шесть трасс синхронного зондирования протяженностью от 120 до 320 км. Регистрация амплитудно-частотных и дистанционно-частотных характеристик станциями ЛЧМ наклонного зондирования производилась ежесекундно. Дополнительно использовались две станции вертикального зондирования ионосферы в пос. Васильсурск и Казани. На основе полученных данных были сделаны оценки пространственных размеров и скорости ПИВ, определено их направление.

**Ключевые слова:** ионосфера, перемещающиеся ионосферные возмущения, ЛЧМ-станции наклонного зондирования, станции вертикального зондирования.

**APPLICATION OF SPATIALLY SEPARATED CHIRP STATIONS  
FOR RECORDING MOVING IONOSPHERIC DISTURBANCE**

**F. I. Vybornov, N. V. Bakhmetieva, E. Yu. Zykov, A. A. Kolchev  
A. V. Pershin, A. G. Chernov, V. V. Shumaev**

**Abstract.** The results of the operation of the network of chirp stations for oblique sounding of the ionosphere on December, 2019 during the passage of traveling ionospheric disturbances (TIDs) are presented. For observations, 4 stations of the same type were used (located in Vasilsursk, Yoshkar-Ola, Kazan, Nizhny Novgorod (Russia)), which formed 6 synchronous sounding paths with lengths from 120 to 320 km. The stations operated in a one-minute mode of recording amplitude-frequency and distance-frequency characteristics.

*Additionally, two vertical sounding stations of the ionosphere (Vasilsursk and Kazan) were used. On the basis of the data obtained, estimates were made of the spatial dimensions and velocity of the TID, and their direction was determined.*

**Keywords:** ionosphere, traveling ionospheric disturbances, oblique sounding chirp stations, vertical sounding stations.

## Введение

Типичными ионосферными возмущениями, наблюдаемыми на средних широтах, являются среднemasштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с характерными размерами 100—500 км и периодами от единиц до нескольких десятков минут. Анализу поведения ПИВ, их морфологии, связи с другими геофизическими явлениями посвящено большое количество статей, диссертаций и монографий. Детальный анализ появляемости серпообразных ПИВ за несколько циклов солнечной активности на средних широтах по данным станции Зименки (Нижний Новгород) выполнен в [1].

Наиболее распространенный способ изучения ПИВ — снятие высотно-частотных характеристик на ионосферных станциях. В последние годы для исследования ПИВ используются самые разнообразные методы (сеть синхронно работающих КВ-ионозондов DPS4D, доплеровские измерения, метод GNSS TEC градиентов, пространственно-временной анализ сигналов спутников GPS, коротковолновая интерферометрия и др.), которые активно применялись в рамках единой европейской программы *TechTide Project* (<http://techtide.eu>) для детального исследования параметров перемещающихся ионосферных возмущений.

Актуальность исследования ПИВ объясняется тем, что их появление снижает эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения, вызывая девиацию углов прихода, увеличение временного интервала задержки сигнала, уширение доплеровского спектра, замирание сигнала и ошибки позиционирования. В этой связи важную роль играют результаты наблюдений ПИВ методом наклонного зондирования.

При наличии ПИВ возникают сложности с интерпретацией результатов наблюдений. В расчетах ионосферного распространения радиоволн широко используется прогностическая справочная модель ионосферы IRI. Однако вариации ионосферы день ото дня, ее зависимость от гелиогеофизических условий, наличие плохо прогнозируемых перемещающихся ионосферных возмущений различных масштабов могут сводить на нет эффективность такого прогнозирования в реальных условиях.

Ниже представлены результаты работы системы синхронно действующих приемо-передающих ЛЧМ-ионозондов (Васильсурск, Йошкар-Ола, Казань, Нижний Новгород) при слабонаклонном зондировании ионосферы во время прохождения перемещающихся ионосферных возмущений.

### Описание эксперимента

Измерения проводились 18 и 19 декабря 2019 года в дневное время, когда вероятность наблюдения ПИВ является наибольшей [1]. Эксперимент проводился сотрудниками Научно-исследовательского радиофизического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета и фирмы «SITCOM» LLC, Йошкар-Ола. Дополнительно на прием 19 декабря 2019 года работала ЛЧМ-станция ИЗМИР РАН. Геометрия трасс сети диагностики ионосферы ЛЧМ-сигналами приведена на рисунке 1.

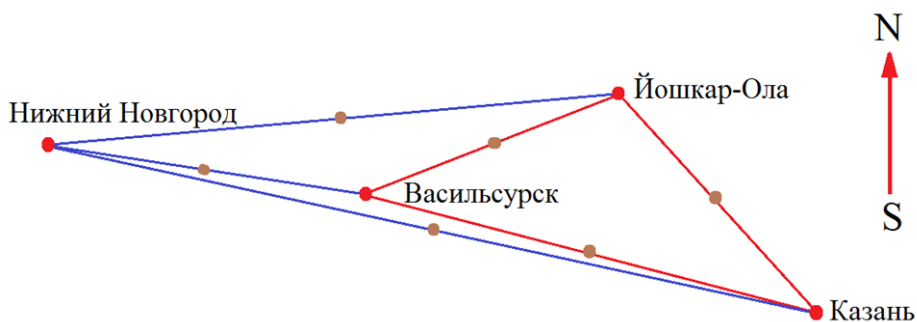


Рис. 1. Геометрия исследуемых трасс

Красными точками на рисунке отмечены места расположения ЛЧМ-станций (приемо-передающих станций в Васильсурске, Казани и Йошкар-Оле; приемной — в Нижнем Новгороде). Красными линиями отмечены трассы, где ЛЧМ-станции работали на прием и передачу, синими — только на прием. Средние точки трасс зондирования отмечены коричневым цветом. Координаты ЛЧМ-станций приведены в таблице 1. Символами *R* или *T* отмечены ЛЧМ-станции, работающие на прием или передачу соответственно.

Таблица 1

#### Координаты ЛЧМ-станций

Место расположения ЛЧМ-станции	Координаты
1. Васильсурск (R, T)	56.13° N; 46.08° E
2. Казань (R, T)	55.8° N; 49.12° E
3. Йошкар-Ола (R, T)	56.62° N; 47.87° E
4. Нижний Новгород (R)	56.32° N; 44.02° E

Параметры трасс зондирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

### Параметры трасс зондирования

Трасса	Начальный азимут	Дальность, км	Координаты средней точки трассы
Васильсурск — Йошкар-Ола	63,00°	123	56.38° N; 46.97° E
Васильсурск — Казань	99,69°	193	55.97° N; 47.44° E
Васильсурск — Нижний Новгород	280,26°	130	56.23° N; 45.15° E
Йошкар-Ола — Казань	139,13°	120	56.20° N; 48.5° E
Йошкар-Ола — Нижний Новгород	263,59°	240	56.48° N; 45.25° E
Казань — Нижний Новгород	282,44°	323	56.00° N; 46.59° E

ЛЧМ-станции работали 18 и 19 декабря 2019 года с 11:30 до 13:30 МСК по специальной программе. На передачу начинали работать ЛЧМ-станции: Йошкар-Ола с 11:30, Казань с 11:31, Васильсурск с 11:32 МСК; далее продолжалась их циклическая работа с периодом 3 мин. Скорость перестройки частоты составляла 110 кГц/с; начальная частота зондирования 3 МГц, конечная 9 МГц. На прием ЛЧМ-станция в Нижнем Новгороде работала с 11:30 до 13:30 МСК ежеминутно. В Йошкар-Оле, Казани, Васильсурске прием осуществлялся во всех циклах, где ЛЧМ-станции не излучали.

Дополнительно работали два ионозонда вертикального зондирования (ионозонд САD1 в Васильсурске работал в 15-минутном режиме зондирования, а ионозонд «Циклон» вблизи Казани — каждую минуту).

Геофизическая обстановка 18 и 19 декабря 2019 года была слабозмущенной. Максимальные значения Dst-индекса 17 нТл наблюдались 18 декабря в 03:00 UT, минимальные –25 нТл в 18:00 UT 18 декабря и –28 нТл в 03:00 UT 19 декабря (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Максимальные значения магнитного индекса Kp составляли величины 3—4 (<https://tesis.lebedev.ru>).

### Результаты наблюдений

В результате работы четырех ионозондов получены записи дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) в режиме слабонаклонного зондирования ионосферы вдоль разных направлений. Критические частоты ионосферы определялись по данным ионозонда САD1. Наблюдались серпообразные ПИВ разной конфигурации. Начало возмущений сопровождалось петлеобразным искажением ионограммы в районе критических частот F-области ионосферы, затем происходил перегиб, который смещался в низкочастотную часть ионограммы вдоль O- или X-трека — это так называемые серпообразные возмущения. Пример серпообразного ПИВ на ДЧХ приведен на рисунке 2 для трассы Васильсурск — Казань 18.12.2019 года в 09:56 UT. ПИВ наблюдается также на втором скачке ДЧХ, при этом треки отражения оказываются диффузными.

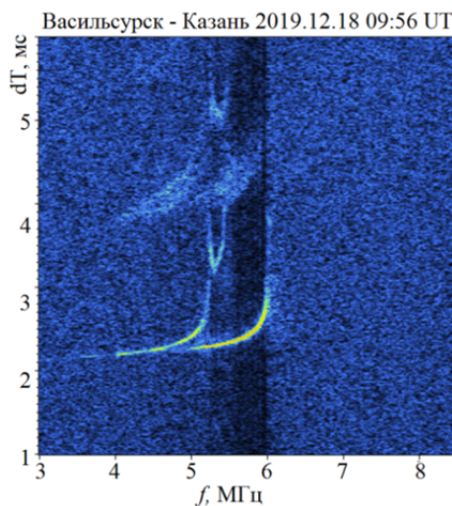


Рис. 2. Пример серпообразного ПИВ

Необходимо отметить, что 18 декабря 2019 года с 09:13 до 09:17 UT на трассе Йошкар Ола — Казань отмечен ПИВ, который не был зарегистрирован на других трассах. Учитывая расстояние между средними точками трасс, можно предположить, что характерные горизонтальные размеры такого возмущения в ионосфере не превышали 100 км. Сильные ионосферные возмущения отмечались 19 декабря 2019 года. Многократно регистрировались серпообразные ПИВ на всех трассах зондирования (рис. 3).

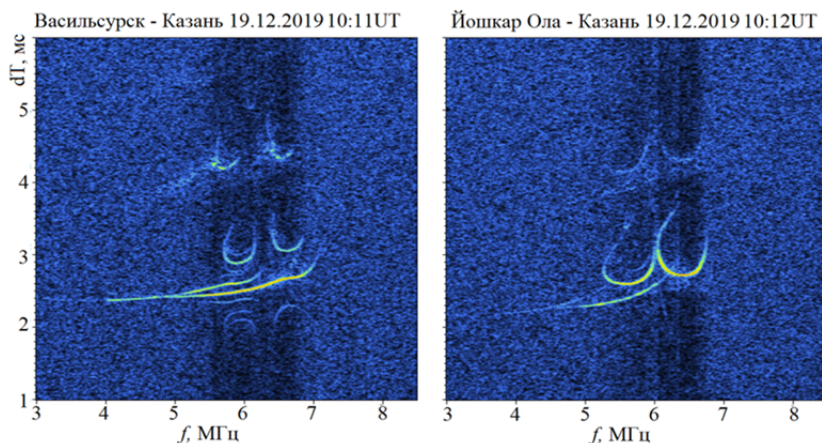


Рис. 3. Серпообразные ПИВ, отмеченные 19.12.2019 года

При критических частотах F-слоя ионосферы около 6 МГц занимаемый частотный диапазон ПИВ достигал 0,8 МГц. Структура ПИВ напоминала ра-

нее рассмотренную в работе [2], где методом численного моделирования ионограмм квазивертикального зондирования ионосферы в условиях ПИВ на основе сопоставления экспериментальных и расчетных ДЧХ определены направленно-скоростные характеристики среднемасштабных ПИВ, обеспечивающих хорошее соответствие временной эволюции отклика широкополосного сигнала на прохождение волнового возмущения на трассе зондирования.

Для определения направления движения в пространстве фронта ионосферного возмущения (в предположении, что он плоский) для случая одновременной регистрации ПИВ на нескольких трассах зондирования использовался метод, предложенный в работе [6]. Выполненные оценки позволяют утверждать, что наблюдаемые ПИВ распространялись преимущественно в восточном направлении с горизонтальной скоростью  $\sim 120\text{—}170$  м/с.

### Выводы

Впервые в Европейской части России реализована сеть синхронно работающих в рамках единой программы наблюдений ЛЧМ-станций слабонаклонного зондирования среднеширотной ионосферы. Было задействовано четыре ионозонда одной конструкции с длинами трасс от 120 до 320 км. Дополнительно использовались два ионозонда вертикального зондирования.

Система синхронно работала 18 и 19 декабря 2019 года с 11:00 до 13:30 МСК с минутным интервалом зондирования. Зарегистрировано прохождение ПИВов разных типов: серпообразных, спускающихся только у  $O$ - или  $X$ -треков  $F$ -слоя; одновременных, располагающихся левее или правее основных треков. Обнаружено, что возможно существование серпообразных ПИВ, регистрирующихся только на одной трассе (то есть с горизонтальными масштабами  $< 100$  км) на первом или кратном отражении.

Получены ДЧХ ПИВов одновременно работающими на разных трассах ЛЧМ-станциями и ионосферными станциями вертикально зондирования, что позволило реализовать алгоритм [3] для слабонаклонных трасс и получить непротиворечивые оценки направления и скорости распространения ПИВ, ранее приводимые в статье [2] для трассы Васильсурск — Нижний Новгород.

*Благодарности.* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00050).

### Список литературы

1. Выборнов Ф. И., Митякова Э. Е., Рахлин А. В. и др. Анализ появляемости перемещающихся ионосферных возмущений типа «серп» на средних широтах // Известия вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 12. С. 1455.
2. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Выборнов Ф. И. и др. Моделирование распространения декаметровых радиоволн в условиях волновых возмущений концентрации электронов // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 6. С. 462.
3. Михайлов С. Я., Грозов В. П., Чистякова Л. В. Реконструкция динамики ионосферных возмущений по данным квазивертикального и вертикального зондирования ионосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 5. С. 377.