

## РЕГИСТРАЦИЯ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СИСТЕМОЙ СИНХРОННО РАБОТАЮЩИХ ЛЧМ ИОНОЗОНДОВ

Ф.И. Выборнов<sup>1, 4)</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 ННГУ им. Н.И. Лобачевского

<sup>2)</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

<sup>3)</sup> "SITCOM" LLC, г. Йошкар-Ола

<sup>4)</sup> ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

### **Введение**

Типичными ионосферными возмущениями, наблюдаемыми на средних широтах, являются среднемасштабные 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 серповидных ПИВ за несколько циклов солнечной активности на средних широтах по данным станции Зименки (г. Нижний Новгород) выполнен в [1].

Наиболее распространенным способом изучения ПИВ является 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 применяются в рамках единой Европейской программы TechTide Project [2] 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, замирания 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.

В докладе представлены результаты работы системы синхронно работающих 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 г. Эксперимент проводился сотрудниками Научно-исследовательского радиофизического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Казанского (Приволжского) федерального университета и фирмы “SITCOM” LLC, г. Йошкар-Ола. 19 декабря 2019 г. дополнительно на прием работала ЛЧМ станция ИЗМИР РАН. Геометрия трасс сети диагностики ионосферы ЛЧМ сигналами приведена на рис. 1. Красными точками на рисунке отмечены места расположения ЛЧМ станций (приемо-передающих в п.г.т. Васильсурск, г. Казани и г. Йошкар-Оле; приемной в г. Нижний Новгород). 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 соответственно работающие на прием или передачу.

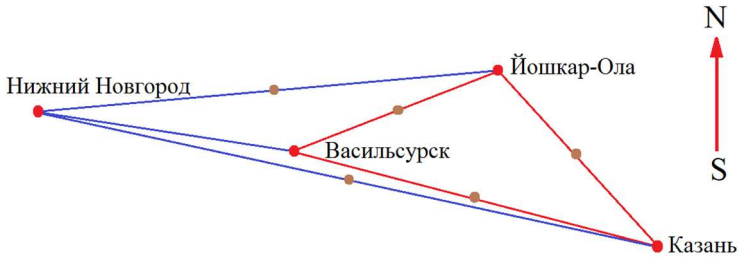


Рис. 1

Табл. 1

№	Места расположений ЛЧМ станций	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, 52,87° E
4	Нижний Новгород (R)	56,32° N; 44,02° E

Параметры трасс зондирования приведены в таблице 2.

ЛЧМ станции работали 18 и 19 декабря 2019 г. 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 минуты. 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 CADI в Васильурске работал в 15 минутном режиме зондирования, а ионозонд “Циклон” вблизи г. Казани работал каждую минуту).

Геофизическая обстановка 18 и 19 декабря 2019 г. была слабо возмущенной. 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 [3]. Максимальные значения магнитного индекса Kp составляли величины 3-4 [4].

Табл. 2

Трасса	Начальный азимут	Конечный азимут	Дальность, км	Координаты средней точки трассы
Васильсурск – Йошкар-Ола	63,00°	64,49°	123	56,38° N; 46,97° E
Васильсурск – Казань	99,69°	102,21°	193	55,97° N; 47,44° E
Васильсурск – Нижний Новгород	280,26°	278,54°	130	56,23° N; 45,15° E
Йошкар-Ола – Казань	193,13°	140,17°	120	56,20° N; 48,5° E
Йошкар-Ола – Нижний Новгород	263,59°	260,38°	240	56,48° N; 45,25° E
Казань Нижний – Новгород	282,44°	278,21°	323	56,00° N; 46,59° E

### *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 CADI. 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 рис. 2 для трассы Васильсурск – Казань 18.12.2019 г. в 09:56 UT. ПИВ наблюдается также на втором скачке ДЧХ, при этом треки отражения оказываются диффузными. На кадре наблюдается серпообразный ПИВ только на обыкновенной компоненте F-слоя ионосферы.

Необходимо отметить, что 18 декабря 2019 г. с 09:13 до 09:17 UT по трассе Йошкар Ола – Казань регистрировался 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.

19 декабря 2019 г. отмечались сильные ионосферные возмущения. Многократно регистрировались серпообразные ПИВ на всех трассах зондирования. При критических частотах F-слоя ионосферы около 6 МГц, занимаемый частотный диапазон ПИВ достигал 0,8 МГц. Структура ПИВ напоминала ранее рассмотренную в работе [5], где методом численного моделирования ионограмм квази-вертикального зондирования ионосферы в условиях ПИВ на основе сопоставления экспериментальных и расчетных ДЧХ определены направленно-скоростные характеристики среднemasштабных ПИВ, обеспечивающих хорошее соответствие временной эволюции отклика широкополосного сигнала на прохождении 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,

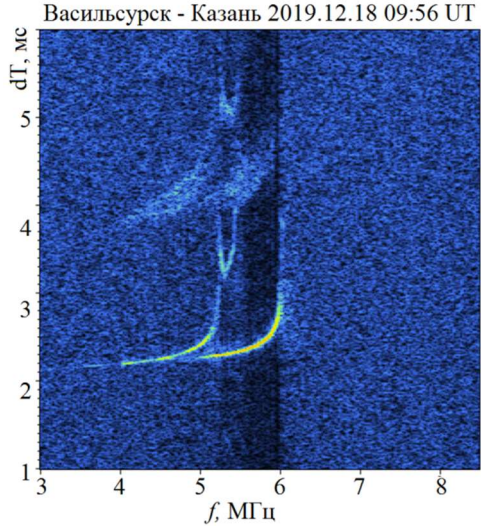


Рис. 2

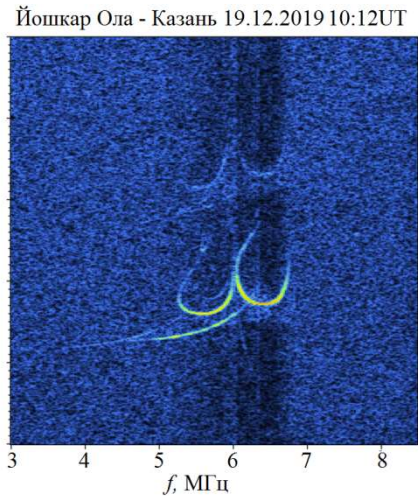
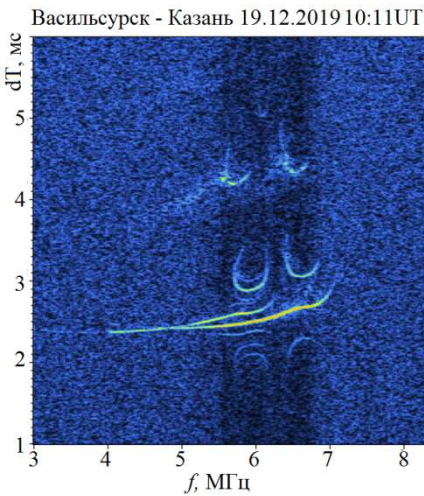


Рис. 3

предложенный в работе [6]. Выполненные оценки позволяют утверждать, что наблюдаемый ПИВ распространялся в восточном направлении с горизонтальной скоростью  $\sim 170$  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 4 ионозонда одной конструкции (1 приемный и 3 приемо-передающих) с длинами трасс от 120 до 320 км. Дополнительно использовались 2 ионозонда вертикального зондирования в Васильурске и Казани.

18 и 19 декабря 2019 года система синхронно работала с 11:00 до 13:30 МСК с минутным интервалом зондирования. 19.12.2019 г. дополнительно использовался приемный ЛЧМ ионозонд в г. Москве.

Зарегистрировано прохождение ПИВов разных типов: серпообразных, спускающихся только у О или Х треков F- слоя; одновременных, располагающихся левее или правее основных треков.

Обнаружено, что возможно существование серпообразных ПИВ, регистрирующихся только на одной трассе (т.е. с горизонтальными масштабами  $< 100$  км) на первом или кратном отражении.

Получены ДЧХ ПИВов одновременно на разных трассах работающими ЛЧМ станциями и ионосферными станциями вертикально зондирования, что позволило реализовать алгоритм [6] для слабонаклонных трасс и получить не противоречивые оценки направления и скорости распространения ПИВ, ранее приводимые в статье [5] для трассы Васильурск – Нижний Новгород.

Работа Е.Ю. Зыкова выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №19-02-00343).

Работа Ф.И. Выборнова и А.В. Першина выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00050).

- [1] Выборнов Ф.И., Митякова Э.Е., Рахлин А.В. и др. // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 12. С. 1455.
- [2] <http://tech-tide.eu,-20.05.2020> г.
- [3] <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp,-20.05.2020> г.
- [4] <https://tesis.lebedev.ru,-20.05.2020> г.
- [5] Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Выборнов Ф.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 6. С. 462.
- [6] Михайлов С.Я., Грозов В.П., Чистякова Л.В. // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 5. С. 377.