

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.510

doi: 10.26907/2541-7746.2022.1.137-147

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО СЕТИ ЛЧМ-ИОНОЗОНДОВ

А.А. Колчев¹, Е.Ю. Зыков¹, Ф.И. Выборнов², А.Г. Чернов³,
В.В. Шумаев³

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

²Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород,
603950, Россия

³ООО «СИТКОМ», г. Йошкар-Ола, 424000, Россия

Аннотация

Представлены результаты наблюдений перемещающихся ионосферных возмущений по данным работы сети ЛЧМ-станций наклонного зондирования ионосферы в декабре 2019 г. Для наблюдений использовались однотипные ЛЧМ-станции, расположенные в п. Васильсурск, а также в городах Йошкар-Ола, Казань и Нижний Новгород. Станции образовывали шесть трасс синхронного зондирования протяженностью от 120 до 320 км. Регистрация амплитудно-частотных и дистанционно-частотных характеристик станциями наклонного ЛЧМ-зондирования производилась ежеминутно.

На основе полученных данных предложена методика определения параметров перемещающихся ионосферных возмущений с использованием сети из трех ЛЧМ-ионозондов. Наличие в составе ионозонда как приемника, так и передатчика позволило при использовании трех ионозондов получить данные по шести радиотрассам, в результате чего появилась возможность сделать оценки параметров возмущений только по экспериментальным данным, без привлечения модельных представлений.

Актуальность работы обусловлена тем, что в расчетах ионосферного распространения радиоволн широко используется прогностическая справочная модель ионосферы IRI, однако вариации ионосферы могут сводить на нет эффективность такого прогнозирования в реальных условиях.

Ключевые слова: ионозонд, сигнал с линейной частотной модуляцией, перемещающиеся ионосферные возмущения

Введение

Ионизированная плазма оказывает существенное влияние на проходящие через ионосферу сигналы, передаваемые спутниками или наземными радиоэлектронными системами. Вариации электронной концентрации влияют на эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения, вызывая девиацию углов прихода, увеличение временного интервала задержки сигнала, уширение доплеровского спектра, замирание сигнала и ошибки позиционирования.

Одним из проявлений вариаций электронной концентрации являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИБ). Исследованиям ПИБ различными методами (сеть ионозондов, доплеровские измерения, метод GNSS TEC градиентов, пространственно-временной анализ сигналов спутников GPS, коротковолновая интерферометрия и др.) посвящено большое количество работ (см. например, [1–5]).

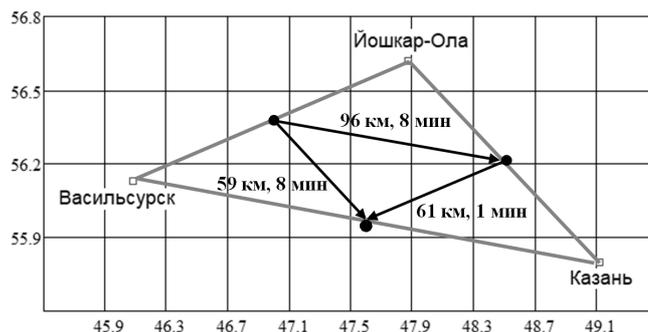


Рис. 1. Геометрия радиотрасс

Наличие большого числа методов говорит о сложности качественной оценки параметров ПИВ.

В работе [6] предложен метод восстановления направления движения в пространстве фронта ионосферного возмущения при его регистрации тремя ионозондами (два наклонных ЛЧМ-ионозонда и один вертикальный ионозонд) с использованием методов компьютерного моделирования. Однако при использовании трех ионозондов имеется возможность оценки параметров ПИВ без использования моделирования распространения радиоволн.

Целью настоящей работы является разработка метода оценки параметров ПИВ по данным зондирования ионосферы на трех слабонаклонных радиотрассах.

1. Геометрия и техника эксперимента

Эксперименты по квазивертикальному зондированию ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) начали проводиться в Казанском федеральном университете с 2019 г. [7, 8]

В описываемых экспериментах экспериментальная сеть состояла из трех оснащенных ЛЧМ-ионозондами пунктов, в которых проходил прием и излучение сигнала: Йошкар-Ола ($56^{\circ}37' N$, $47^{\circ}52' E$), Казань ($55^{\circ}48' N$, $49^{\circ}07' E$), Васильсурск ($56^{\circ}08' N$; $46^{\circ}05' E$). Геометрия радиотрасс приведена на рис. 1. Красными точками обозначены середины радиотрасс. Эти трассы можно определить как квазивертикальные – происходит наклонное падение волны на слой, но распространение верхним лучом (мода Педерсена) не наблюдается.

Все три пункта оснащены аппаратурой наклонного зондирования сигналами с ЛЧМ фирмы SITCOM [9, 10]. Излучение и прием осуществлялись в двух направлениях, поэтому общее число радиотрасс равно шести. Эксперимент с использованием описанной аппаратуры проходил 19.12.2019 г. в трехминутном режиме: в нулевую минуту часа излучение ЛЧМ-сигнала осуществлялось в п. Йошкар-Ола, в первую минуту – в п. Казань, во вторую минуту – в п. Васильсурск. Далее цикл повторялся. Пункты, которые не работали в режиме излучения, работали в режиме приема. Зондирование ионосферы осуществлялось в диапазоне частот от 3 до 8.5 МГц со скоростью перестройки частоты 110 кГц/с.

2. Методика измерений

Наличие в рассматриваемой схеме эксперимента большого числа передатчиков и приемников позволяет оценивать параметры движения неоднородностей только на основе экспериментальных данных. Рассмотрим алгоритм обработки данных

на примере использования результатов наблюдений на трех радиотрассах: Казань – Йошкар-Ола (длина 120 км, азимут 319.5°), Васильсурск – Йошкар-Ола (длина 123 км, азимут 64°), Казань – Васильсурск (длина 192 км, азимут 281°).

Изменения ионограмм в районе критических частот F -области ионосферы, близкие по времени, на радиотрассах Васильсурск – Йошкар-Ола и Казань – Йошкар-Ола показаны на рис. 2, *a* и *б* соответственно. Из рисунка видно, что изменения ионограмм на различающихся трассах происходит аналогично, однако имеется временной сдвиг между похожими ионограммами.

В качестве численной меры величины следа возмущения на ионограмме нами была взята энергия сигнала, приходящаяся на этот след и деленная на среднюю мощность шума по ионограмме (суммировались амплитудные значения пикселей, соответствующих следу возмущения, и сумма делилась на среднее значение амплитуд пикселей, соответствующих шуму). На верхних ионограммах (рис. 2, *a* и *б*) следы возмущений выделены окружностями. Изменение нормированных значений энергии сигнала возмущения $A_{\text{норм}}$ с течением времени t на радиотрассах Васильсурск – Йошкар-Ола и Казань – Йошкар-Ола изображено на рис. 3 (анализировалось время с 9:30 до 10:30 UTC). По горизонтальной оси откладывалось время в часах, а по вертикальной – нормированная на максимальное значение энергии сигнала возмущения. Между точками осуществлялась интерполяция. На рис. 3, *a* приведены результаты для трасс Казань – Йошкар-Ола (сплошная линия) и Васильсурск – Йошкар-Ола (пунктирная линия).

Из рисунка видно, что в период с 9:30 до 10:30 UTC на этих радиотрассах наблюдалось два возмущения. Возмущения в этот же отрезок времени наблюдаются на трассах Йошкар-Ола – Казань (рис. 3, *б*, сплошная линия) и Васильсурск – Казань (рис. 3, *б*, пунктирная линия) и на трассах Йошкар-Ола – Васильсурск (рис. 3, *в*, сплошная линия) и Казань – Васильсурск (рис. 3, *в*, пунктирная линия).

Для оценки временного запаздывания между зависимостями строились функции взаимной корреляции и находились их максимумы. Положение максимума принималось за временное запаздывание проявления возмущения между соответствующими радиотрассами.

В табл. 1 приведено временное запаздывание возмущений между трассами (знак “–” означает, что возмущение распространяется по направлению от средней точки трассы 2 до средней точки трассы 1), расстояние между средними точками трасс и азимут направления от средней точки трассы 1 на среднюю точку трассы 2 по направлению движения возмущения.

На рис. 1 отмечены соответствующие расстояния и запаздывания, направление распространения возмущения показано стрелкой.

Если l_{12} – расстояние между точками 1 и 2, α_{12} – азимут из точки 1 на точку 2, t_{12} – время запаздывания возмущения между точками 1 и 2, $|v|$ – модуль вектора скорости возмущения, ϕ – азимут вектора скорости возмущения, то выполняется равенство $|v| \cdot t_{12} = l_{12} \cdot \cos(\alpha_{12} - \phi)$.

Если имеется три точки (1,2,3), то, решая систему уравнений

$$|v| \cdot t_{1i} = l_{1i} \cdot \cos(\alpha_{1i} - \phi), \quad i = 2, 3,$$

можем найти модуль скорости и направление движения возмущения.

Пусть $i = 1$ – индекс средней точки трассы Казань – Йошкар-Ола, $i = 2$ – трассы Васильсурск – Йошкар-Ола, $i = 3$ – трассы Казань – Васильсурск. Тогда возможны три варианта систем уравнений, отличающихся индексами:

- 1) $|v| \cdot t_{1i} = l_{1i} \cdot \cos(\alpha_{1i} - \phi)$, $i = 2, 3$;
- 2) $|v| \cdot t_{2i} = l_{2i} \cdot \cos(\alpha_{2i} - \phi)$, $i = 2, 3$.

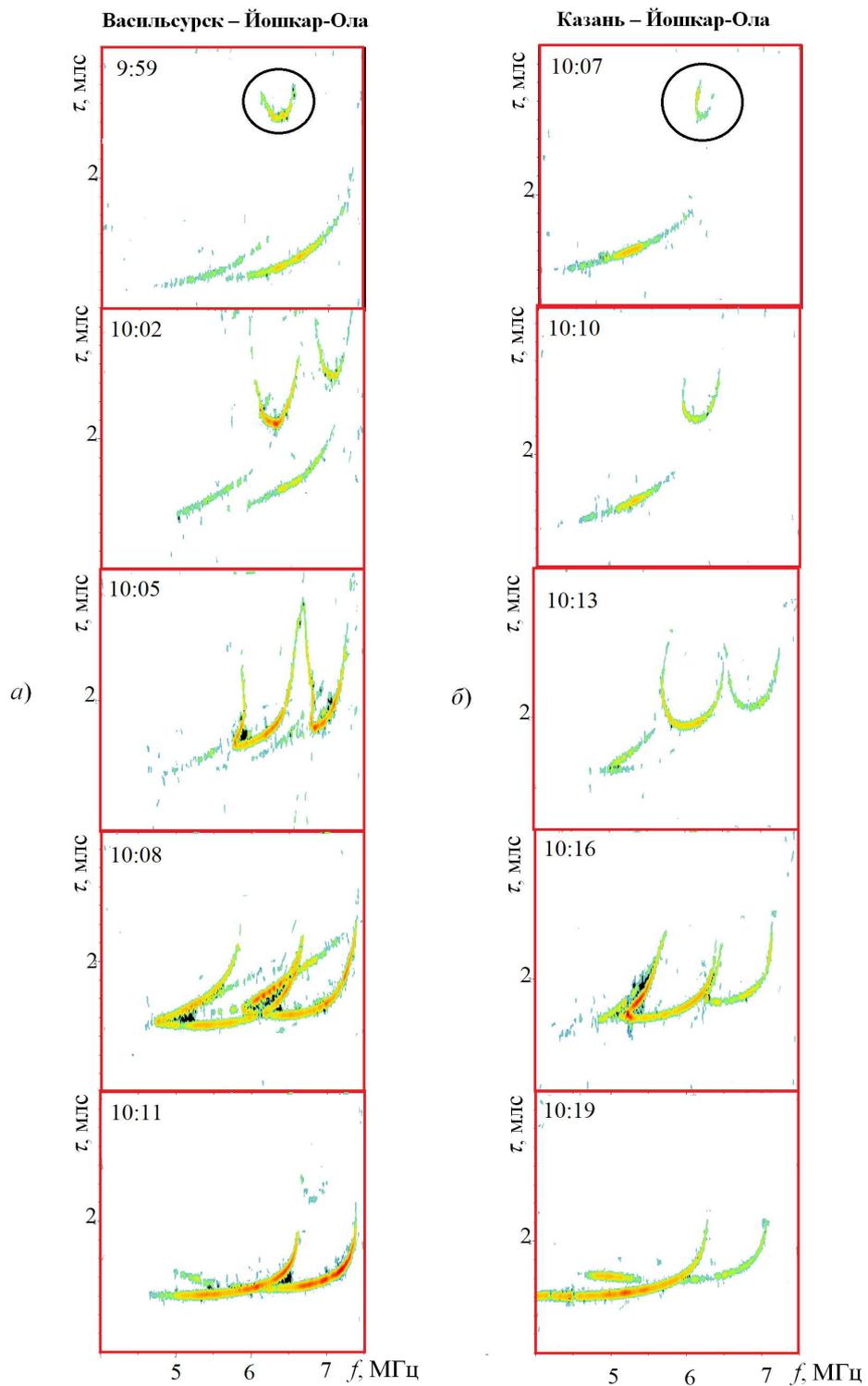


Рис. 2. Изменение вида ионограмм на трассах Васильсурск–Йошкар-Ола (а) и Казань–Йошкар-Ола (б)

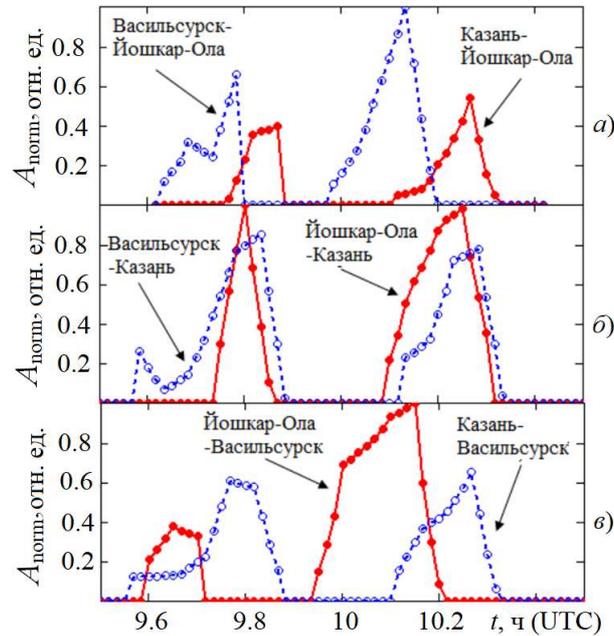


Рис. 3. Изменение нормированных значений энергии сигнала возмущения $A_{\text{норм}}$ с течением времени t

Табл. 1

| Трассы | Расстояние между средними точками трасс 1 и 2 | Временное запаздывание возмущений между трассами 1 и 2 | Азимут направления от средней точки трассы 1 на среднюю точку трассы 2 по направлению движения возмущения |
|---|---|--|---|
| Казань – Йошкар-Ола (1) и Васильсурск – Йошкар-Ола (2) | 96 км | –8 мин | 101° |
| Йошкар-Ола – Казань (1) и Васильсурск – Казань (2) | 61 км | 1 мин | 138.5° |
| Йошкар-Ола – Васильсурск (1) и Казань – Васильсурск (2) | 8 мин | –8 мин | 245° |

Решение первой системы дает для модуля вектора скорости возмущения, азимута вектора скорости значения $|v| = 120$ м/с, $\phi = 154^\circ$, решение второй системы – $|v| = 100$ м/с, $\phi = 161^\circ$, решение третьей системы – $|v| = 115$ м/с, $\phi = 161^\circ$. Среднее значение скорости ионосферного возмущения равно 111.7 м/с со средним квадратическим отклонением 8.5 м/с, среднее значение азимута 158.7° со средним квадратическим отклонением 3.3° .

Зная вектор скорости возмущения и длительность его воздействия на сигнал на каждой радиотрассе, можно оценить размеры перемещающегося ионосферного возмущения в направлении его движения.

На рис. 4 отдельно показано изменение нормированных значений энергии сиг-

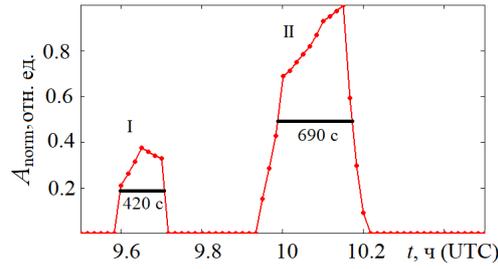
Рис. 4. Изменение $A_{\text{погрн}}$ с течением времени t на радиотрассе Йошкар-Ола – Васильсурск

Табл. 2

| Время, UTC | f_1 , МГц | f_2 , МГц | $\Delta N/N$ | ΔL |
|------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| 10:07 | 5.58 | 5.81 | 8.2 | 25 |
| 10:10 | 5.43 | 5.89 | 17.9 | 54 |
| 10:13 | 5.19 | 5.98 | 33.1 | 99 |

нала возмущения $A_{\text{погрн}}$ с течением времени t на радиотрассе Йошкар-Ола – Васильсурск (время с 9:30 до 10:30 UTC). Черными линиями выделены длительности возмущений на уровне 0.5 от максимального. Этот условный уровень часто используется в различных оценках ширины кривой. В нашем случае его можно интерпретировать как время воздействия основного тела возмущения. Длительность воздействия на уровне 0.5 для возмущения I составила 420 с, а возмущения II – 690 с, что для скорости 111.7 м/с соответствует размерам 47 и 77 км соответственно.

В рамках приближения плоскостройной ионосферы для U -образных треков в слое $F2$ можно оценить вариации концентрации электронов в слое и вертикальный размер неоднородности аналогично тому, как это было сделано в работе [10].

Пусть f_1 и f_2 – наименьшая и наибольшая частоты U -трека и пусть синусы углов излучения на этих частотах отличаются незначительно. Предположим, что в слое с вертикальным масштабом L и электронной концентрацией N имеется неоднородность концентрации ΔN и с вертикальным масштабом ΔL . Так как частота сигнала, отражающегося от слоя, определяется его концентрацией, то можно записать

$$\frac{\Delta N}{N} = \left(\frac{f_2}{f_1} \right) - 1. \quad (1)$$

Как показано в [11], U -образный трек появляется при образовании дополнительного максимума электронной концентрации, что требует выполнения условия

$$\Delta L \leq L \cdot \frac{\Delta N}{N}. \quad (2)$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов по формулам (1) и (2), в работе [11] предполагалось, что $L = 300$.

Средняя скорость изменения концентрации составила 6.2% на 10 км, а средняя скорость изменения вертикального размера – 18.4 км на 10 км.

Надо отметить, что для треков возмущений на рис. 2, а получаются такие же значения. Полученные данные позволили построить зависимости $\Delta N/N$ (сплошная красная линия) и ΔL (пунктирная синяя линия) от расстояния вдоль направления движения возмущения (см. рис. 5). При построении этого рисунка учитывалось, что скорость перемещающегося возмущения 111.7 м/с.

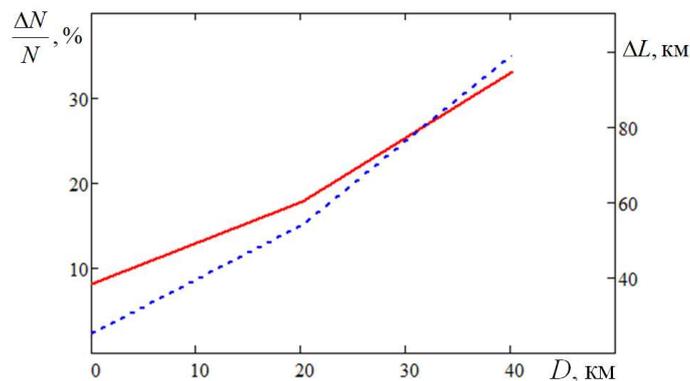


Рис. 5. Зависимости $\Delta N/N$ (сплошная линия) и ΔL (пунктирная линия) от расстояния вдоль направления движения возмущения

Заключение

Предложена и экспериментально апробирована методика оценки параметров ПИВ при использовании трех приемо-передающих пунктов, оборудованных ЛЧМ-ионозондами. Методика реализуется путем создания на этих пунктах трех радиотрасс квазивертикального зондирования.

В качестве численной меры проявления величины возмущения ионосферы на ионограммах предложено считать отношение энергии следа возмущения на ионограмме к средней мощности шума. Задержка между прохождением ПИВ средних точек радиотрасс оценивалась как разность максимумов взаимокорреляционных функций.

Работоспособность методики подтверждается тем, что при выборе трех различных вариантов радиотрасс получены близкие численные результаты величины и направления вектора скорости ПИВ.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00343) (Е.Ю. Зыков).

Результаты работы станции наклонного ЛЧМ-зондирования п. Васильсурск получены в рамках научного проекта Российского научного фонда № 20-17-00050 (Ф.И. Выборнов).

Литература

1. *Афраймович Э.Л.* Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. – М.: Наука, – 1982. – 199 с.
2. *Дробжес В.И., Куделин Г.М., Нургожсин В.И. и др.* Волновые возмущения в ионосфере: По результатам исследований в Алма-Ате / Отв. ред. Т.Б. Омаров. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 178 с.
3. *Денисенко П.Ф., Сказик А.И.* Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным спутникового зондирования // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, № 5. – С. 33–35.

4. *Ларюнин О.А., Куркин В.И., Подлесный А.В.* Использование данных двух близко расположенных ионозондов при диагностике перемещающихся ионосферных возмущений // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 10–17.
5. *Ойнац А.В., Куркин В.И., Нишитани Н., Сайто А.* Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным радаров SuperDARN // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2013. – Т. 18, № 8. – С. 30–39.
6. *Михайлов С.Я., Грозов В.П., Чистякова Л.В.* Реконструкция динамики ионосферных возмущений по данным квазивертикального и вертикального зондирования ионосферы // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 377–388.
7. *Егошин И.А., Зыков Е.Ю., Колчев А.А., Чернов А.Г., Шумаев В.В.* Эффект взаимности при квазивертикальном зондировании ионосферы // *Труды Воен.-косм. акад. им. А.Ф. Можайского.* – 2020. – Вып. 674. – С. 34–38.
8. *Выборнов Ф.И., Зыков Е.Ю., Колчев А.А., Першин А.В., Чернов А.Г., Шумаев В.В.* Регистрация перемещающихся ионосферных возмущений системой синхронно работающих ЛЧМ ионозондов // *Труды XXIV науч. конф. по радиофизике, посвя. 75-летию радиофиз. фак.* – Н. Новгород: ННГУ, 2020. – С. 160–164.
9. *Домрачев Н.А., Колчев А.А., Недопекин А.Е., Толмачев С.В., Чернов А.Г., Шумаев В.В.* Автоматизированная аппаратура зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ в сети полярных геофизических станций // *Труды Междунар. науч. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2013».* – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 582–588.
10. *Kolchev A.A., Egoshin I.A.* Use of hazard function for signal detection on ionograms // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* – 2018. – V. 15, No 6. – P. 803–807. – doi: 10.1109/LGRS.2018.2817394.
11. *Митяков Н.А., Комраков Г.П., Сазонов Ю.А.* Использование антенны стенда «Сура» для повышения эффективной мощности ионозонда // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2008. – Т. 51, № 10. – С. 830–836.

Поступила в редакцию
13.07.2021

Колчев Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоастрономии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: kolchevaa@mail.ru

Зыков Евгений Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоастрономии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

Выборнов Фёдор Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики

Волжский государственный университет водного транспорта
ул. Нестерова, д. 5, г. Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

Чернов Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник отдела
ООО «СИТКОМ»
ул. Вознесенская, д. 74, г. Йошкар-Ола, 424000, Россия
E-mail: *chalexr@mail.ru*

Шумаев Владимир Васильевич, кандидат технических наук, руководитель отдела
ООО «СИТКОМ»
ул. Вознесенская, д. 74, г. Йошкар-Ола, 424000, Россия
E-mail: *shvvladimir@mail.ru*

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2022, vol. 164, no. 1, pp. 137–147

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2541-7746.2022.1.137-147

**Estimation of the Parameters
of Traveling Ionospheric Disturbances Using
a Chirp-Ionosondes Network**

A.A. Kolchev^{a}, E.Yu. Zykov^{a**}, F.I. Vybornov^{b***},
A.G. Chernov^{c****}, V.V. Shumaev^{c*****}*

^a*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^b*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^c*LLC “SITKOM”, Yoshkar-Ola, 424000 Russia*

E-mail: **kolchevaa@mail.ru, **Evgeniy.Zykov@kpfu.ru, ***vybornov@nirfi.unn.ru,
****chalexr@mail.ru, *****shvvladimir@mail.ru*

Received July 13, 2021

Abstract

In this article, the results of our observations of traveling ionospheric disturbances are discussed using the data from a network of chirp stations for oblique ionospheric sounding in December 2019. All observations were made with the same type of chirp stations located in the village of Vasilsursk, as well as in the cities of Yoshkar-Ola, Kazan, and Nizhny Novgorod. The stations formed six synchronous sounding paths with a length from 120 to 320 km. The amplitude-frequency and distance-frequency characteristics were registered per minute by the stations of oblique chirp sounding.

Based on the data obtained, a method for determining the parameters of traveling ionospheric disturbances using the network of three chirp ionosondes was proposed. Since the ionosonde had both a receiver and a transmitter, it was possible to get data on six radio paths while using three ionosondes and, thus, to estimate the disturbance parameters only from the experimental data, without resorting to any model concepts.

From a practical perspective, our research is highly relevant: the international reference ionosphere (IRI) prognostic model is widely used to calculate the ionospheric propagation of radio waves, but variations in the ionosphere can nullify the effectiveness of such forecasting under real conditions.

Keywords: ionosonde, chirp signal, traveling ionospheric disturbances

Acknowledgments. This study was supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (“PRIORITY-2030”) and by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-02-00343) (E.Yu. Zykov).

The data from the chirp station for oblique ionospheric sounding of the village of Vasilsursk were obtained as part of project no. 20-17-00050 of the Russian Science Foundation (F.I. Vybornov).

Figure Captions

- Fig. 1. Geometry of the radio paths.
 Fig. 2. Changes in the ionograms for the paths of Vasilsursk–Yoshkar-Ola (*a*) and Kazan–Yoshkar-Ola (*b*).
 Fig. 3. Changes in the normalized energy values of the disturbance signal A_{norm} with time t .
 Fig. 4. Changes in A_{norm} with time t for the path of Yoshkar-Ola–Vasilsursk.
 Fig. 5. Dependencies of $\Delta N/N$ (solid line) and ΔL (dashed line) on the distance along the direction of the disturbance traveling.

References

1. Afraimovich E.L. *Interferentsionnye metody radiozondirovaniya ionosfery* [Interference Methods of Ionospheric Radio Sounding]. Moscow, Nauka, 1982. 199 p. (In Russian)
2. Drobzhev V.I., Kudelin G.M., Nugrozhin V.I. et al. *Volnovye vozmushcheniya v ionosfere: Po rezul'tatam issledovaniy v Alma-Ata* [Wave Disturbances in the Ionosphere: Based on the Surveys in Almaty]. Omarov T.B. (Ed.). Almaty, Nauka, 1975. 178 p. (In Russian)
3. Denisenko P.F., Skazik A.I. Determining the parameters of traveling ionospheric disturbances using satellite remote sensing data. *Elektromagn. Volny Elektron. Sist.*, 2007, vol. 12, no. 5, pp. 33–35. (In Russian)
4. Laryunin O.A., Kurkin V.I., Podlesnyi A.V. Using data from two closely spaced ionosondes in diagnostics of traveling ionospheric disturbances. *Elektromagn. Volny Elektron. Sist.*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 10–17. (In Russian)
5. Oinats A.V., Kurkin V.I., Nishitani N., Saito A. On the determination of traveling ionospheric disturbances parameters using SuperDARN radar data. *Elektromagn. Volny Elektron. Sist.*, 2013, vol. 18, no. 8, pp. 30–39. (In Russian)
6. Mikhailov S.Ya., Grozov V.P., Chistyakova L.V. Retrieval of the ionospheric disturbance dynamics based on quasi-vertical and vertical ionospheric sounding. *Radiophys. Quantum Electron.*, 2016, vol. 59, no. 5, pp. 341–351. doi: 10.1007/s11141-016-9703-9.
7. Egoshin I.A., Zykov E.Yu., Kolchev A.A., Chernov A.G., Shumaev V.V. Nonreciprocity effect in quasi-vertical sounding of the ionosphere. *Tr. Voen.-Kosm. Akad. im. A.F. Mozhaiskogo*, 2020, no. 674, pp. 34–38. (In Russian)
8. Vybornov F.I., Zykov E.Yu., Kolchev A.A., Pershin A.V., Chernov A.G., Shumaev V.V. Registration of traveling ionospheric disturbances by a system of synchronously operating chirp ionosondes. *Trudy XXIV nauch. konf. po radiofizike, posv.75-letiyu radiofiz. fak.* [Proc. XXIV Sci. Conf. on Radiophysics Dedicated to the 75th Anniversary of the Faculty of Radiophysics]. Nizhny Novgorod, NNGU, 2020, pp. 160–164. (In Russian)
9. Domrachev N.A., Kolchev A.A., Nedopekin A.E., Tolmachev S.V., Chernov A.G., Shumaev V.V. Automated equipment for ionosphere sounding by chirp signals in a network of polar geophysical stations. *Trudy Mezhdunar. nauch. konf. “Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln IREM-2013”* [Proc. Int. Sci. Conf. “Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEW-2013”]. Taganrog, Izd. YuFU, 2013, pp. 582–588. (In Russian)

10. Kolchev A.A., Egoshin I.A. Use of hazard function for signal detection on ionograms. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2018, vol. 15, no. 6, pp. 803–807. doi: 10.1109/LGRS.2018.2817394.
11. Mityakov N.A., Komrakov G.P., Sazonov Yu.A. Using the “Sura” facility antenna for increasing the effective ionosonde power. *Radiophys. Quantum Electron.*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 750–755. doi: 10.1007/s11141-009-9077-3.

Для цитирования: Колчев А.А., Зыков Е.Ю., Выборнов Ф.И., Чернов А.Г., Шумаев В.В. Оценка параметров перемещающихся ионосферных возмущений по сети ЛЧМ-ионозондов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2022. – Т. 164, кн. 1. – С. 137–147. – doi: 10.26907/2541-7746.2022.1.137-147.

For citation: Kolchev A.A., Zykov E.Yu., Vybornov F.I., Chernov A.G., Shumaev V.V. Estimation of the parameters of traveling ionospheric disturbances using a chirp-ionosondes network. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2022, vol. 164, no. 1, pp. 137–147. doi: 10.26907/2541-7746.2022.1.137-147. (In Russian)