

МНОГОЧАСТОТНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА ДЛИННЫХ И СВЕРХДЛИННЫХ РАДИОТРАССАХ

¹П.В. Петько, ²А.В. Зализовский, ¹В.И. Куркин, ²Ю.М. Ямпольский, ³И.Н. Поддельский

MULTIFREQUENCY PROBING THE IONOSPHERE ON LONG AND EXTRA-LONG RADIO PATH

¹P.V. Petko, ²A.V. Zalizovsky, ¹V.I. Kurkin, ²Yu.M. Yampolsky, ³I.N. Poddelskiy

Приведены результаты эксперимента по зондированию ионосферы на трассах Иркутск – ИС «Вернадский» (Антарктида), Магадан – НИС «Вернадский». Анализируются интервалы регистрации и частотно-временные зависимости относительных уровней сигналов на трассах протяженностью до 22000 км в зависимости от геомагнитных условий и ориентации радиотрасс. На основании сопоставления результатов моделирования характеристик радиосигналов с экспериментальными данными выявлены причины различных условий распространения на указанных радиотрассах.

This paper presents results of the experiment of probe the ionosphere on radio paths Irkutsk – Research station "Vernadsky" (Antarctica), Magadan – Research station "Vernadsky". Registrations intervals and time-frequency features of the signals are analyzed on the radio paths extent to 22000 km depending on geomagnetic conditions and orientation of the radio paths. On the basis of comparing results of the features radio signals modeling with experimental data are disclosed reasons of the difference of the propagation conditions on mentioned radio paths.

Радиозондирование в КВ-диапазоне до настоящего времени представляет один из наиболее информативных методов в исследованиях ионосферы, краткосрочного прогнозирования (частотного обеспечения) радиосвязи, а также в загоризонтной радиолокации. Характеристики КВ-радиосигналов являются чувствительными индикаторами космической погоды [1].

Наиболее перспективными в исследованиях ионосферы являются сложные сигналы с большой базой, в частности, сигналы с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ-сигналы) [2]. Использование таких сигналов в экспериментах на Российской сети ЛЧМ-ионозондов для радиотрасс различной протяженности, включая кругосветные, позволило диагностировать крупномасштабные структуры ионосферы [3, 4]. Исследование тонкой структуры и динамики характеристик ионосферы базируется, как правило, на доплеровских измерениях [5–8], проводимых на фиксированных частотах. Представляет интерес создание системы зондирования ионосферы в КВ-диапазоне, объединяющей достоинства доплеровского зондирования на фиксированных частотах и зондирование сложными сигналами по всему КВ-диапазону.

В данной работе приводятся результаты эксперимента по многочастотному зондированию ионосферы на сверхдлинных трассах Иркутск–Антарктида и Магадан–Антарктида на фиксированных частотах с использованием модернизированных передающих пунктов ЛЧМ-ионозондов.

Необходимо отметить следующие особенности эксперимента: размещение передающих пунктов вблизи антипода приемного пункта в Антарктиде; прямые и обратные трассы распространения сигналов охватывают широкий диапазон областей ионосферы, находящейся в различных долготных секторах. Целью данного эксперимента является исследование особенностей распространения радиоволн на сверхдлинных трассах и возможности глобальной диагностики ионосферы по данным наклонного зондирования на сверхдлинных трассах.

Для проведения эксперимента по многочастотному импульсному зондированию в качестве передающих пунктов использовались ионозонды, разработанные на основе Иркутского и Магаданского передающих ЛЧМ-зондов ИСЗФ СО РАН [9], что позволило обеспечить высокие метрологические характеристики излучаемых сигналов. Приемный пункт, расположенный в Антарктиде на НИС «Вернадский» (рис. 1), оборудован антенной с круговой диаграммой направленности; чувствительность приемника составляет 0.8 мкВ в полосе 300 Гц, точность временной синхронизации с UTC 1 мкс. Характеристики передающих пунктов и радиотрасс приведены в таблице.

Эксперимент по зондированию ионосферы на сверхдлинных трассах проводился в два этапа:

- последовательное излучение двенадцати частот с целью уточнения расчетного диапазона рабочих частот и временных интервалов зондирования (18 июня 2006 г.).

- основные наблюдения с излучением шести частот в двухминутном режиме излучения и последующей паузой такой же длительности (4–7 июля 2006 г.).

На первом этапе эксперимента выбор рабочих частот и интервалов зондирования производился с учетом долгосрочного прогноза условий прохождения радиоволн. Значениям номиналов частот в разрядах в сотни, десятки, единицы и десятые доли килогерц присваивались нечетные цифры с целью уменьшения вероятности совпадений с частотами других пользователей. Для увеличения соотношения сигнал/шум частоты выбирались вне диапазонов вещательных станций декаметрового диапазона. По результатам первого этапа эксперимента было выбрано шесть оптимальных частот, на которых наблюдалось наилучшее прохождение сигнала в наибольшем временном интервале. Уменьшение количества зондируемых частот позволило повысить время излучения на одной частоте при сохранении цикличности сеансов, что, в свою очередь, позволило повысить качество обработки принимаемых сигналов.

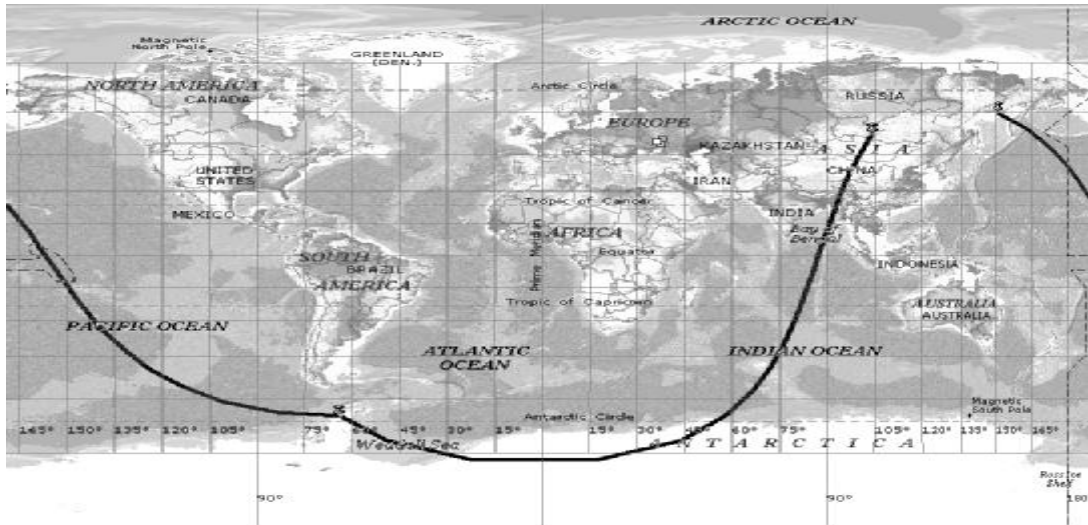


Рис. 1. Радиотрассы. Иркутск – НИС «Вернадский» (Антарктида), Магадан – НИС «Вернадский»

Таблица

Характеристики радиотрасс и передающих пунктов

| Пункты | Дальность, км | Азимут излучения, град | Мощность РПДУ, кВт | Отношение сигнал/шум, дБ | Относительная нестабильность частот | Точность привязки к UTC, мкс | Тип антенны |
|---------|---------------|------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------|
| Иркутск | 18450 | 203 | 2,5 | 80 | $1 \cdot 10^{-9}$ | 1 | ЛПА |
| Магадан | 18150 | 122 | 0,6 | 80 | $1 \cdot 10^{-9}$ | 1 | Ромб гор. |

На втором этапе эксперимента велась регистрация временной зависимости уровня принятого сигнала для каждой из зондируемых трасс и регистрация доплеровских частот. Сравнительный анализ экспериментальных данных за все дни эксперимента показал, что вариации уровня принятых сигналов имеют суточную цикличность с незначительными расхождениями от суток к суткам, что позволяет для проведения качественного анализа усреднить полученные данные по суткам. Следует отметить, что на данном этапе эксперимента при измерениях не проводилось разделение сигналов, распространяющихся по прямой и обратной трассам. Если для трассы Иркутск–Антарктида по теоретическим расчетам обратный сигнал вносит незначительный вклад в общий уровень сигнала, то для трассы Магадан–Антарктида обратный сигнал имеет уровень, сопоставимый с уровнем прямого сигнала. В связи с этим, результаты эксперимента рассматриваются как временные вариации суммы прямого и обратного сигналов. Анализ экспериментальных данных для прямой и обратной трасс носит вероятностный характер и опирается на расчетные значения.

Численное моделирование проводилось с помощью программного комплекса, разработанного в ИСЗФ СО РАН на основе метода нормальных волн [10], с использованием международной справочной модели ионосферы IRI-2000 [11]. На рис. 2 представлены расчетные значения и усредненные по суткам экспериментальные данные временных вариаций отношения сигнал/шум принимаемых сигналов для трасс Иркутск–Антарктида и Магадан–

Антарктида (на рис. 2, а представлены данные численного моделирования временных вариаций относительного уровня сигнала на оптимальных рабочих частотах).

По результатам эксперимента прохождение сигналов наблюдалось с 10 до 20 UT для трассы Иркутск–Антарктида и с 8 до 20 UT для трассы Магадан–Антарктида (рис.2, б), что хорошо согласуется с расчетными значениями оптимальных интервалов зондирования, полученными в ходе численного моделирования характеристик распространения сигналов (рис.2, а). Как для Иркутской, так и для Магаданской трасс в часы, когда не наблюдалось прохождение сигнала, распределение критической частоты f_0F2 вдоль трасс имеет наибольший градиент, а так же наименьшее значение критических частот в области полярных широт (рис. 3).

Из рис. 4 видно, что для времени, когда не наблюдается прохождение сигнала (08 UT) прямая трасса Иркутск–Антарктида проходит в освещенной области экваториальных широт, где значения критических частот имеют наибольшее значение. В эти часы наиболее сильно развита экваториальная аномалия (рис. 3, а для 08 UT). В области полярных широт, где трасса не освещена, критические частоты имеют наименьшее значение. Такое распределение критических частот (значительный продольный градиент f_0F2 вдоль трассы) приводит к увеличению числа скачков и, как следствие, к наибольшему затуханию сигнала. Обратная трасса Иркутск–Антарктида в 08 UT проходит преимущественно в неосвещенной области ионосферы. Критические

частоты вблизи места расположения приемника имеют очень низкие значения (рис. 3, б для 08 UT).

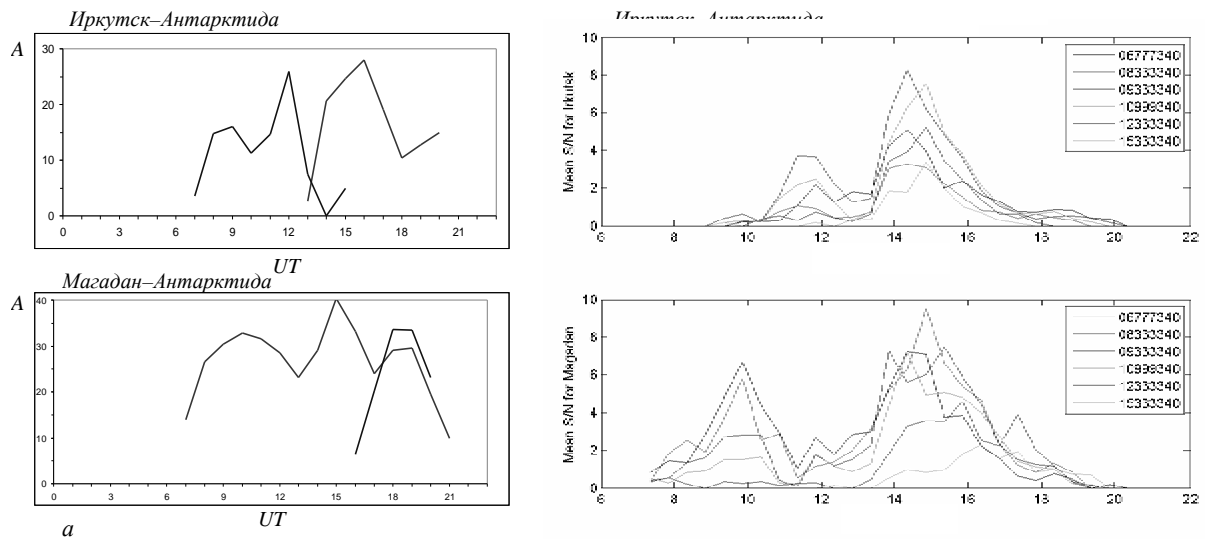


Рис. 2. Временные вариации относительных уровней сигналов для трасс Иркутск–Антарктида и Магадан–Антарктида: а – расчетные характеристики сигналов; б – экспериментальные характеристики сигналов.

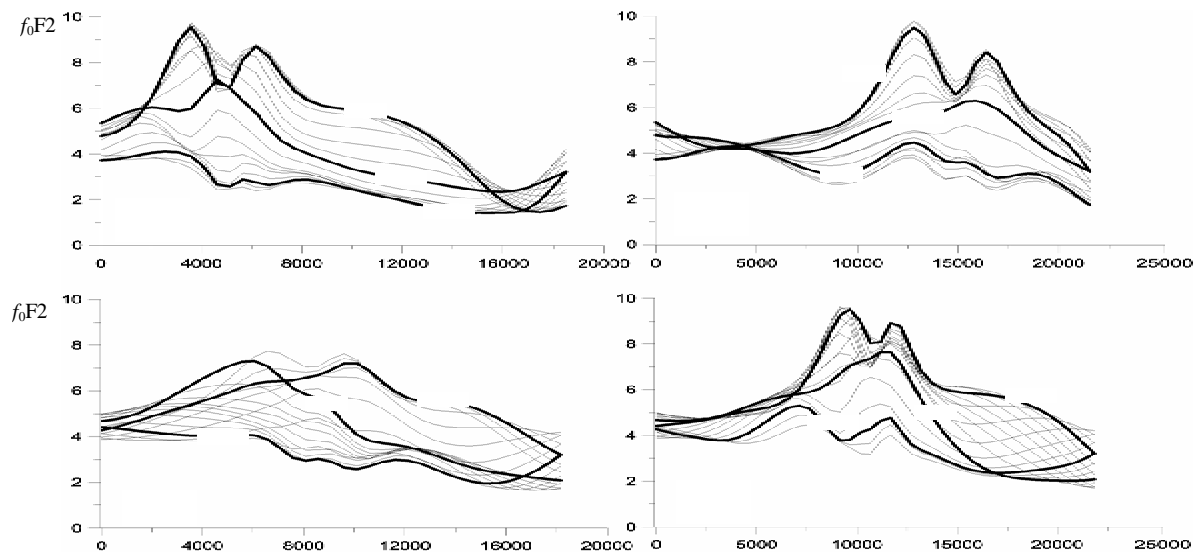


Рис. 3. Распределение расчетных значений критических частот f_0F_2 вдоль трасс Иркутск–Антарктида, Магадан–Антарктида.

Это ограничивает диапазон рабочих частот малыми значениями. Как известно, степень затухания прямо пропорциональна отношению квадратов критической и рабочей частот [12], что объясняет сильное поглощение сигнала на участках трассы, где критические частоты максимальны. Для времени 20 UT прохождение сигнала также не наблюдается. Прямая трасса Иркутск–Антарктида проходит в полностью неосвещенных областях ионосферы при низких значениях критических частот в высоких (южных) широтах прямой трассы. В это время обратная трасса проходит в полностью освещенных областях ионосферы, которые характеризуются значительными продольными градиентами f_0F_2 .

Для трассы Магадан–Антарктида наблюдается похожая ситуация: в часы, когда прохождение сигнала не наблюдается, вдоль трасс имеются значи-

тельные градиенты критических частот, вызванные неравномерностью освещенности трассы и экваториальной аномалией, а также низкие значения критических частот вдоль ночных трасс.

В часы, когда наблюдалось прохождение сигнала, в измерениях четко прослеживаются два максимума относительных уровней сигнала, что качественно согласуется с результатами численного моделирования для обеих трасс (рис 2, а; 3, б). Для трассы Иркутск–Антарктида первый максимум приходится на 12 UT, в это время по расчетным данным вдоль обратной трассы наблюдается наименьший градиент при достаточно высоких критических частотах, что соответствует условиям для прохождение сигнала с наименьшими затуханиями. Вдоль прямой трассы все еще наблюдается значительный градиент f_0F_2 . Второй максимум относительного уровня при-

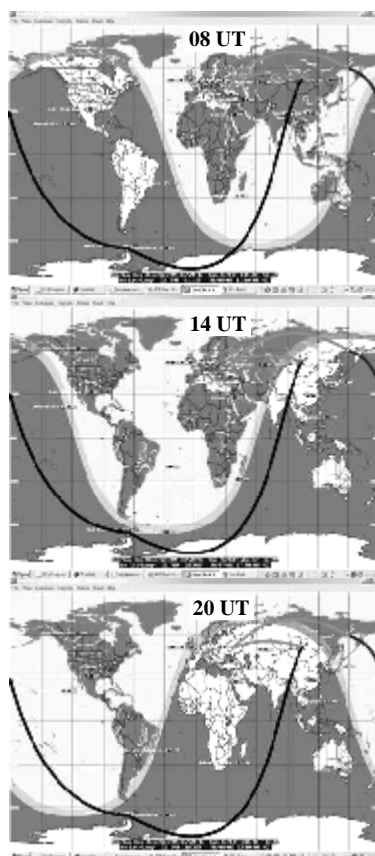


Рис. 4. Освещенность трасс Иркутск–Антарктида, Магадан–Антарктида в 08, 14, 20 UT.

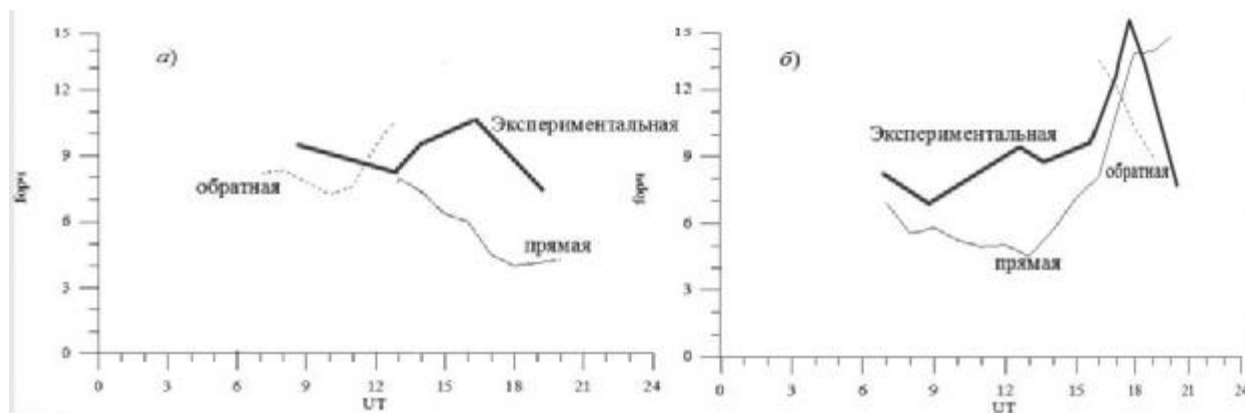


Рис. 5. Временная зависимость оптимальных частот для трасс Иркутск–Антарктида (а) и Магадан–Антарктида (б).

нятых сигналов для трассы Иркутск–Антарктида приходится на 14–15 UT вблизи времени прохождения линии терминатора вдоль прямой трассы (рис. 4). В эти часы происходит ослабление экваториальной аномалии, а также повышение критических частот в области полярных широт (рис. 3, а) за счет освещения. Кроме того, в 14–15 UT на обратной трассе Иркутск–Антарктида по расчетным данным также наблюдаются благоприятные условия для прохождения сигнала (рис. 3, б). Таким образом, можно предположить, что в этом интервале имела место регистрация сигналов по прямой и обратной трассам Иркутск–Антарктида. Провал во временном ходе уровня регистрируемых сигналов на трассе Иркутск–Антарктида обусловлен, по-видимому, переходным периодом. В это время условия распространения по обратной трассе начинают ухудшаться,

а на прямой трассе ионосфера еще не достигла оптимальных для распространения условий. Это предположение полностью подтверждается теоретическими расчетами (рис. 2, а).

Для трассы Магадан–Антарктида первый максимум в суточном ходе отношения сигнал/шум приходится на 10 UT. В это время по расчетным данным наиболее благоприятные условия для прохождения сигнала имеет прямая трасса Магадан–Антарктида, так как при одинаковых значениях критических частот в полярной области прямая трасса характеризуется меньшим продольным градиентом f_0F2 и проходит преимущественно над поверхностью Тихого океана. Это обеспечивает меньшее ослабление сигнала при отражениях. Провал во временном ходе уровня принимаемых сигналов в экспериментальных данных (11:30 UT) соответствует

времени, когда расчетное значение критической частоты в полярной области является наименьшим. Это дает основания предполагать, что на прямой трассе Магадан–Антарктида в период с 9 до 15 UT, когда значения критических частот в средних и экваториальных широтах являются оптимальными и практически не изменяются, в ослаблении сигнала основную роль играет состояние ионосферы в полярной зоне. В районе 18 UT в экспериментальных данных наблюдается незначительный пик относительного уровня сигнала. В это же время по расчетным данным максимальное значение имеет сигнал, распространяющийся по обратной трассе Магадан–Антарктида (рис. 2, б).

Наибольший уровень регистрируемых сигналов для трассы Иркутск–Антарктида наблюдался в диапазоне 8.3–9.3 МГц в период с 9 до 14 UT и в диапазоне 6.7–10.9 МГц в период с 14 до 20 UT. Если в первый период времени экспериментальные данные ОРЧ качественно согласуются с расчетными значениями, то во второй период заметно явное превышение экспериментальных ОРЧ над расчетными примерно на 3 МГц. Следует заметить, что хотя расчетные ОРЧ для трассы Иркутск–Антарктида с 16 до 20 UT несколько занижены, в расчетных и экспериментальных данных прослеживается тенденция к спаду ОРЧ с течением времени, что свидетельствует о правильном представлении об условиях распространения сигнала на сверхдлинных трассах. На трассе Магадан–Антарктида экспериментальные оптимальные частоты практически во всем временном интервале качественно согласуются с расчетными значениями. Исключение составляет временной интервал 11 до 14 UT, где экспериментальные ОРЧ превышают расчетные на 3–4 МГц.

Заключение

Качественный анализ показал, что уровень регистрируемого сигнала в значительной степени зависит от продольного градиента f_0F2 и минимального значения критической частоты, что подтвердилось экспериментальными данными. Выявлены области наибольшего влияния ионосферы на условия распространения сигнала вдоль трассы, для обеих трасс это полярные и приэкваториальные широты. Оптимальные интервалы распространения сигнала и его частотно-амплитудные характеристики могут служить индикатором состояния ионосферы.

Результаты, полученные в ходе эксперимента по зондированию ионосферы на сверхдальних трассах, требуют дополнительных теоретических исследований. В дальнейшем планируется провести анализ доплеровского сдвига частот для выявления динамических характеристик ионосферы.

1. Goodman J.M. Space Weather & Telecommunications. Springer. USA. 2005.

2. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е. и др. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919–952.

3. Куркин В.И., Иванов В.А., Урядов В.П. и др. Космическая погода и распространение декаметровых радиоволн на средних и субполярных широтах // Труды XXI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола, 2005. Т. 1. С. 60–65.

4. Куркин В.И., Носов В.Е., Матюшонок С.М. и др. Особенности распространения кругосветных сигналов на российской сети ЛЧМ-ионозондов в годы высокой и низкой солнечной активности // Известия вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 10. С. 843–854.

5. Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых радиоволн (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. XVIII, № 4. С. 473–500.

6. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982, 198 с.

7. Ковалевская Е.М., Ишкова Л.И., Белей В.С. и др. Эффекты ПИВ в угловых и доплеровских характеристиках радиосигнала на среднеширотной радиолинии в период магнитной суббури // Геомагнетизм и аэронавигация. 1987. № 6. С. 342–351.

8. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / под ред. В.Д. Гусева. Кишинев: Штиинца, 1991. 287 с.

9. Петько П.В., Литовкин Г.И., Орлов А.И. Передающий ЛЧМ-ионозонд с улучшенными характеристиками // XII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 18–20 апреля 2006 г. НПФ «Саквое» ООО. 2006. Т. 2. С. 1083–1090.

10. Куркин В.И., Орлов А.И., Орлов И.И. Схема расчета характеристик импульсного декаметрового радиосигнала на основе численного суммирования нормальных волн // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1986. Вып. 75. С. 159–164.

11. Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2000 // Adv. Space Res. 2001. V. 36, N 2, P. 261–275.

12. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 501 с.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН

²Радиоастрономический институт НАН Украины

³Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН