

## Мониторинг ионосферы Земли методом совмещенного зондирования

С.В.Литвинов<sup>1</sup>, И.А. Глинкин<sup>2</sup>, В.О. Скрипачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет»  
119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78.

E-mail: [Litvinov\\_S@mirea.ru](mailto:Litvinov_S@mirea.ru)

<sup>2</sup> АО «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи»

127083, город Москва, ул. 8 Марта, д. 10 стр. 5

E-mail: [IGlinkin@niidar.ru](mailto:IGlinkin@niidar.ru)

*В статье приводится описание строения ионосферы и наземных методов ее исследования: вертикальное и наклонное зондирование. Анализируются эти методы и получаемые выходные данные - ионограммы. Рассматривается совмещение методов вертикального и наклонного зондирования ионосферы и восстановление  $Ne(h)$ -профиля для такого метода. Приводятся результаты работы ионозондов «Парус-А» в режиме совмещенного зондирования. Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, наклонное зондирование, распространение радиоволн, ионозонд.*

## Monitoring of the Earth's ionosphere by the method of combined sounding

S.V.Litvinov<sup>1</sup>, I.A.Glinkin<sup>2</sup>, V.O.Skripachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MIREA - Russian Technological University.

<sup>2</sup> Distant Radiocommunication Scientific Research Institute.

*The article describes the structure of the ionosphere and ground-based methods of its research: vertical and oblique sounding. Analyzed these methods and the obtained output data - ionograms. Combination of methods of vertical and oblique sounding of ionosphere and restoration of  $Ne(h)$ -profile for such method are considered. The results of operation of the Parus-A ionosondes in the mode of combined sounding are presented.*

*Keywords: ionosphere, vertical sounding, oblique sounding, radio wave propagation, ionosonde.*

### Введение

Ионосфера, представляющая из себя часть верхней атмосферы Земли, ионизирующую солнечным излучением, влияет на распространение радиосигналов от сверхнизких частот (< 3 кГц), до сверхвысоких частот (30 ГГц). Для частот ниже 30 МГц ионосфера является важной частью распространения радиоволн, в то время как для частот выше 30 МГц ионосфера представляет из себя источник помех. Так, ионосфера оказывает негативное влияние на распространение радиоволн в ночное время суток в диапазонах низких и средних частот (от 30 кГц до 3 МГц), а также является источником сбоев в работе систем связи Земля-космос, в т.ч. навигационных систем [1].

Природа ионосферы тесно связана с солнечным излучением и состоянием геосфер Земли, что делает ее крайне изменчивой, при этом предсказать уровень влияния на системы связи, порой, является трудновыполнимой задачей. Изменение ионосферы возможно отслеживать с применением средств как космического, так и наземного базирования [2]. Основной аппаратурой для определения параметров с Земли является



На графике показаны три основных слоя (пики электронной плотности) - слои D, E и F. Слой F, самый верхний слой, разделяется на два в зависимости от географических координат и времени года - на слои F1 и F2.

Критические частоты определяются асимптотами, а действующие высоты ионосферных слоев определяются нижними точками каждой кривой между критическими частотами. Асимптоты возникают как следствие групповой задержки радиоволн, прогрессивно замедляющиеся с увеличением глубины ионизации. На критической частоте падающая радиоволна от ионозонда достигает максимальной резонансной частоты слоя, при превышении критической частоты радиоволна не отражается от слоя и распространяется дальше до тех пор пока не встретит ионосферный слой с более высокой плотностью электронов и, соответственно более высокой критической частотой. Превысив критическую частоту последнего слоя ионосферы, радиоволна уходит в космическое пространство.

На ионограмме присутствуют красный и зеленый следы. Зеленый трек не является дополнительным слоем ионосферы, это результат деления передаваемого радиосигнала из-за взаимодействия с магнитным полем Земли. Обыкновенная компонента - т.н. O-след (красный трек на ионограмме), отраженные эхо-сигналы от компонента излученного радиосигнала, направленного параллельно магнитному полю Земли. Необыкновенная компонента - т.н. X-след (зеленый трек на ионограмме), является отраженной компонентной излученной радиоволны, перпендикулярной направлению магнитного поля.

### Наклонное зондирование

Принцип работы наклонных ионозондов схожа с работой вертикальных ионозондов, однако геометрия НЗ делает его анализ более сложным. Наклонно распространяющиеся радиоволны не только отражаются, но и преломляются в ионосфере и гораздо больше подвержены влиянию горизонтальных градиентов и вариаций в ионосфере.

Ситуация осложняется еще и тем, что радиосигналы от передатчика могут идти по разным траекториям, прежде чем достичь приемника, что увеличивает количество возможных источников искажения и потери сигнала. Геометрия наклонного зондирования показана на рисунке 2 вместе с двумя альтернативными маршрутами для распространения радиосигналов.

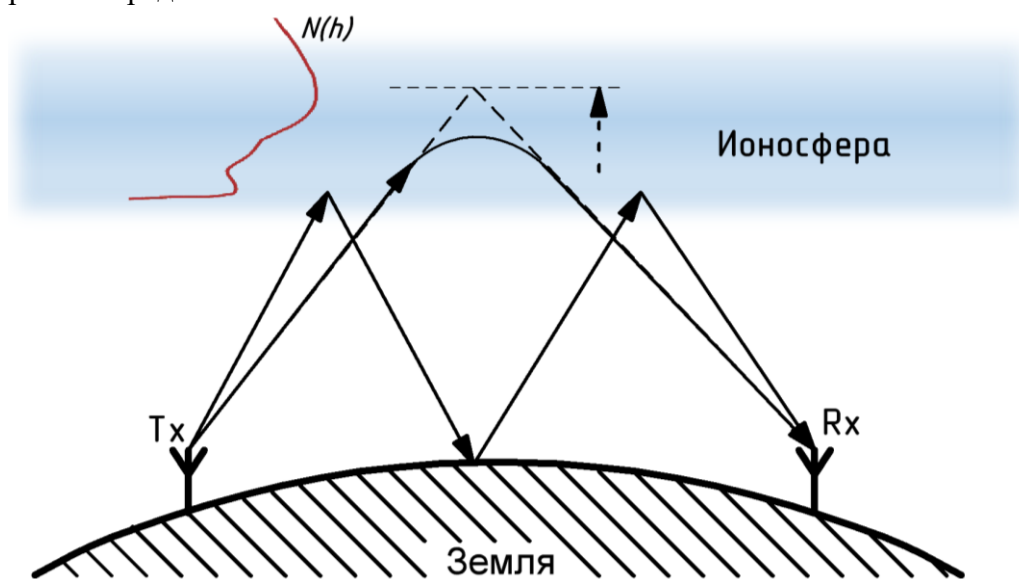


Рис. 2. Эскиз геометрии наклонного зондирования с многоходовыми трассами распространения между передатчиком и приемником

Несмотря на дополнительные сложности в интерпретации наклонного распространения радиоволн, ионозонд НЗ дает несколько важных преимуществ по сравнению с вертикальным зондированием. Во-первых, этот метод позволяет проводить мониторинг ионосферы на больших расстояниях, недоступных в других случаях, например, через океаны. Во-вторых, одна приемная станция может работать по сигналам нескольких удаленных передающих станций, использующих заранее согласованное расписание передач. И, возможно, самое главное - это метод, который позволяет исследовать, как именно распространяются радиосигналы в системах связи, проводя мониторинг реальных трасс распространения. Это простой оперативный инструмент, позволяющий быстро определить частоты, рациональные для передачи сигнала между станциями. На рисунке 3 слева показано распространение радиоволн при наклонном зондировании для отражения от разных слоев ионосферы и типичная ионограмма НЗ (справа).

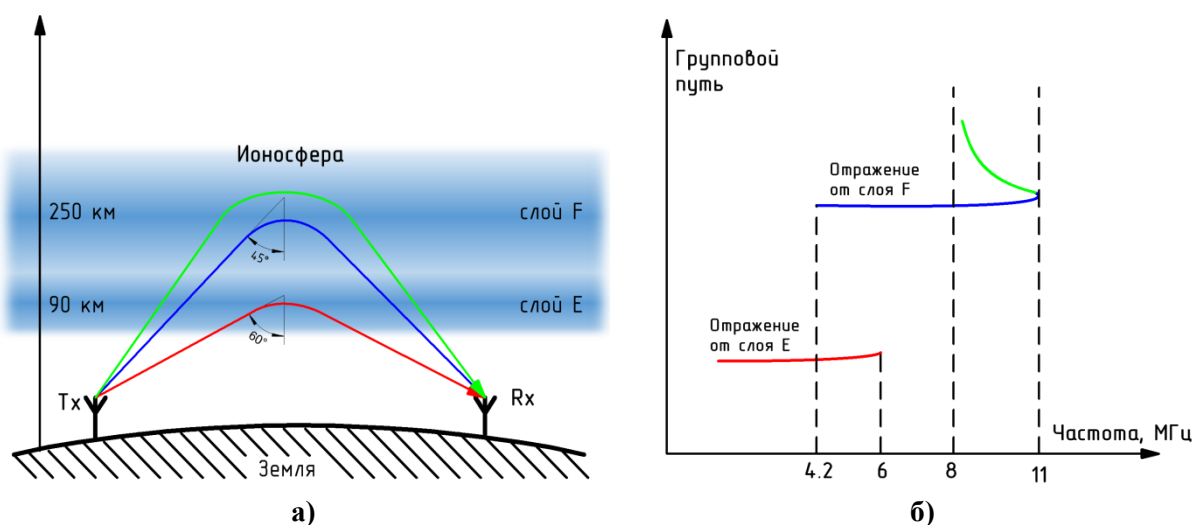


Рис. 3. Эскиз геометрии наклонного зондирования с отражением от различных слоев ионосферы (а) и типичная ионограмма НЗ (б)

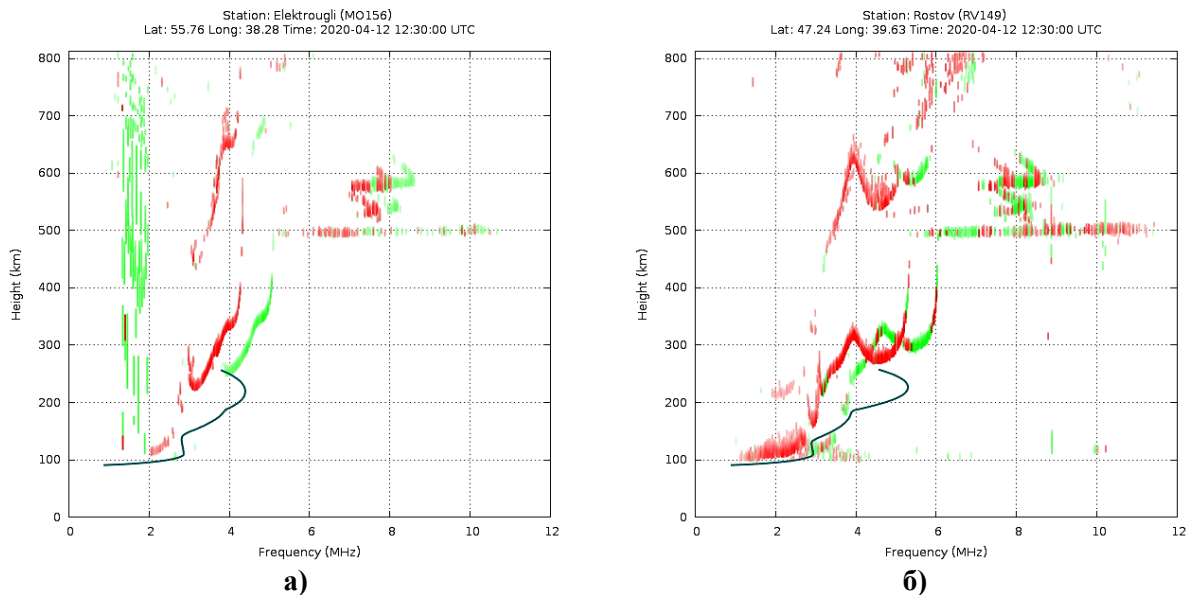
Ионограмма наклонного зондирования четко показывает доступные диапазоны связи и пробелы, где радиосвязь не может быть установлена. Однако, поскольку ионосфера изменяется во времени, которое может составлять менее минуты, информация, доступная пользователю связи на доступных частотах, требует постоянного обновления. Основная цель наклонного зондирования заключается в попытке понять факторы, влияющие на распространение радиоволн, что в конечном итоге позволит уменьшить ненадежность связи, вызванную естественной изменчивостью ионосферы.

### Совмещенное вертикальное и наклонное зондирование ионосферы

Преимущественно, ионозонды регистрируют ионограммы ВЗ. При синхронизации передачи и приема сигналов ионозондов возможно проводить НЗ. Для регистрации ионограмм НЗ один ионозонд (Rx) запускают в режиме «радиотишины», т.е. с выключенным передатчиком, чтобы он принимал сигналы от удаленной передающей станции (Tx). При этом передающая станция (Tx) принимает только отраженные сигналы ВЗ и не регистрирует сигналы НЗ, которые могли бы запутать автоматическое распознавание ионограммы ВЗ. Известны работы по совмещенному зондированию ионосферы [4,5]. Т.е. на обоих ионозондах не отключается передатчик и они

одновременно регистрируют результаты вертикального и наклонного зондирования на совмещенной ионограмме.

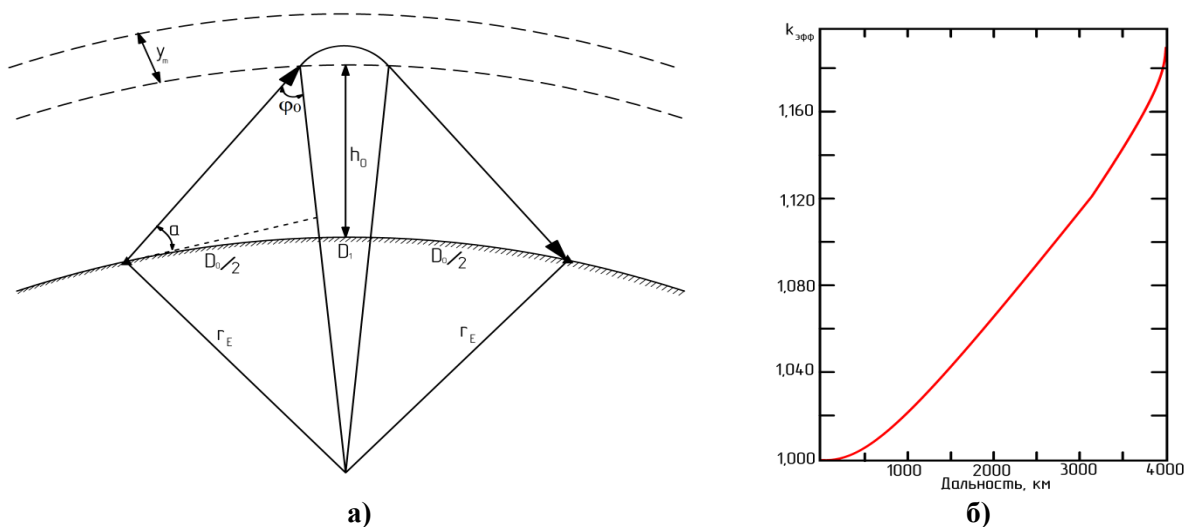
На рисунке 4 показан пример такой совмещенной ионограммы, полученной на ионосферной станции в Ростове-на-Дону и близ города Электроугли (Московская область). Треки на частотах до 5 МГц - следы ВЗ, полученные на каждой станции от собственного передатчика. Треки на частотах от 6 до 11 МГц - это сигналы НЗ, полученные от удаленных станций.



**Рис. 4. Данные совмещенного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. Ростов-на-Дону (а) и ст. Электроугли (б) 12 апреля 2020 г. 12.30 UTC**

### Восстановление $N_e(h)$ -профиля ионосферы

Взаимосвязь между ионограммами вертикального и наклонного зондирования ионосферы определяется аналитическими соотношениями. Теорема Брайта и Тьюва определяет что время распространения радиоволны с групповой скоростью по искривленному участку траектории в ионосфере равно времени распространению радиоволны со скоростью света по воображаемому треугольнику (рисунок 5, слева). [6]



**Рис. 5. Схема наклонного зондирования (а) и зависимость эмпирического поправочного коэффициента от дальности (б)**

$\alpha$  - вертикальный угол прихода;

$D_0$  - дальность радиотрассы вдоль земной поверхности;

$\varphi_0$  - угол между волновым вектором и нормалью к изолинии концентрации электронов ионосферы на действующей высоте отражения.

По теореме Мартина [7], известной также как теорема секанса, связь между частотами наклонного зондирования  $f_{нз}$  и вертикального  $f_{вз}$  зондирования определяется по формуле:

$$f_{нз} = f_{вз} * \sec \varphi_0 \quad (1)$$

При вводе поправочного коэффициента  $k_{эфф}$ , учитывающего кривизну Земли и ионосферы соотношение примет вид:

$$f_{нз} = k_{эфф} * f_{вз} * \sec \varphi_0 \quad (2)$$

Эмпирический поправочный коэффициент  $k_{эфф}$  является функцией истинной и действующей высот, дальности и т.д. и не имеет общего аналитического представления. Область допустимых значений  $k_{эфф}$  в зависимости от дальности  $D_0$  лежит в пределах от 1,0 до 1,2 - (рисунок 5, справа)

Действующая высота  $h'$  отражения вертикально падающей на ионосферу радиоволны с частотой  $f_{вз}$  и групповой путь  $P'$  связаны соотношением:

$$h' = -r_e * (1 - \cos \alpha_1) + \sqrt{\frac{[P'(f_{нз})]^2}{4} - (r_e * \sin \alpha_1)^2} \quad (3)$$

где  $r_e$  - радиус Земли;

$\alpha_1 = D_0 / (2r_e)$ ;

$P'(f_{нз})$  - групповой путь радиоволны с частотой  $f_{нз}$ , падающей наклонно.

Значение  $\cos \varphi_0$  определяется из соотношения:

$$\cos \varphi_0 = \frac{\left[ \frac{P'(f_{нз})}{2} \right]^2 + 2r_e h' + h'^2}{P'(f_{нз})(r_e + h')} \quad (4)$$

Применяя формулы (1), (2) и (3), ионограмму НЗ пересчитывают в эквивалентную ионограмму ВЗ, а также в высотный профиль электронной концентрации. Приведенная методика не учитывает эффект магнитоионного расщепления и влияния горизонтальной неоднородности ионосферы, что является ее существенным недостатком.

Аналогично, решая обратную задачу наклонного зондирования для изотропной сферически-слоистой одномерной ионосферы с асимптотическим учетом влияния магнитоионного расщепления, проводится оценка высотного  $Ne(h)$ -профиля ионосферы.

$$P'(f_{нз}) = 2 \int_{r_e}^{r_m} \frac{r dr}{\sqrt{r^2 n^2 - r_e^2 (\cos \beta_0^m)^2}} \quad (5)$$

$$D_0 = 2 \int_{r_e}^{r_m} \frac{r_e^2 \cos \beta_0^m dr}{r * \sqrt{r^2 n^2 - r_e^2 (\cos \beta_0^m)^2}} \quad (6)$$

Где для каждой зондирующей частоты  $f_m$  определены:

$r_m$  - высота отражения, отсчитываемая от центра Земли,

$\beta_0^m$  - вертикальный угол прихода.

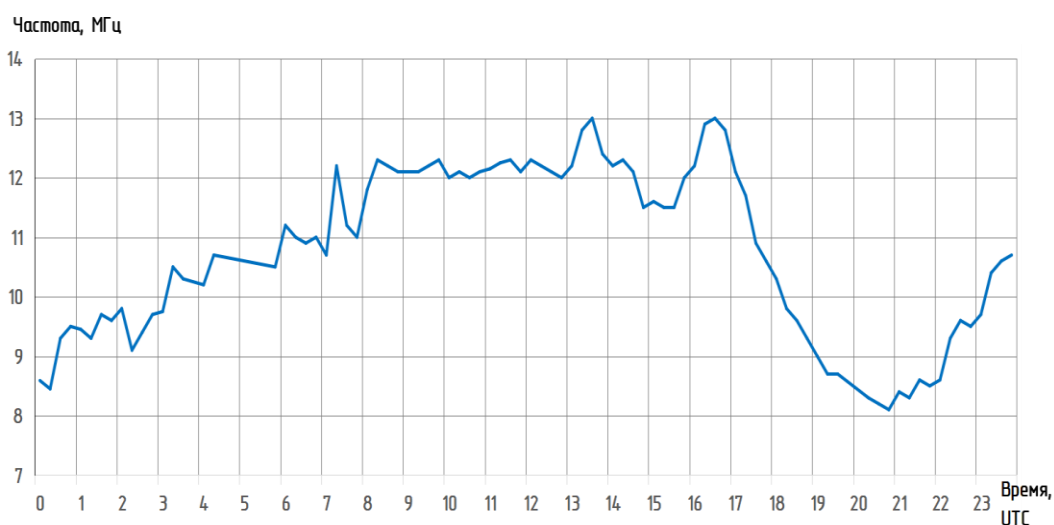
Оценки параметров ионосферы в главном ионосферном максимуме для дневных условий радиотрассы меридионального направления по данным НЗ лежат в некоторой середине параметров в точках передающего и приёмного устройств (терминальных точках).

## Ионосферная сеть

В российской ионосферной государственной наблюдательной сети Росгидромета применяется ионозонд отечественного производства «Парус-А». Он создан по заказу ФГБУ «ИПП» специалистами ИЗМИРАН совместно с предприятием НТЦ «Радикон-М» [8]. Практически с начала запуска работы сети вертикального зондирования велись работы по реализации наклонного зондирования между станциями сети. Первой трассой НЗ в 2013 году стала Москва - Ростов-на-Дону. [9] Затем, после проведенной модернизации, появилась возможность уверенно проводить сеансы НЗ в экспериментальном режиме, при этом не создавая помех целевой функции сети - вертикальному зондированию [10]. Отдельно стоит отметить, что основные эксперименты по совмещенному зондированию проведены в 2017-18 гг., и единичные эксперименты в 2019 и 2020 гг. Это соответствует периоду спада солнечной активности 24 солнечного цикла, минимум которой пришелся на 2020 год.

Также проведению наклонного зондирования способствовали применяемые передающие и приемные антенны. [11] Передающие антенны обладают диаграммой направленности, максимум которой в вертикальной плоскости направлен в зенит. При существенной мощности излучения (~10 кВт в импульсе) даже тех небольших боковых лепестков достаточно для уверенного приема сигналов на удалении больше 1000 км. В ионозондах серии «Парус-А» для приема отраженных сигналов применяется антенна типа «поляризованный диполь», диаграмма направленности которого обладает ориентацией по углу места и ярко выраженными экстремумами в азимутальной плоскости.

Имеющееся количество и географическое расположение ионозондов «Парус-А» позволило провести различные эксперименты по наклонному зондированию ионосферы. Первые эксперименты имели единичный характер и проводились для проверки возможности наклонного зондирования на отечественных ионозондах. В продолжение опытов на нескольких трассах проводились т.н. суточные прогоны - проведение сеансов НЗ в течение длительного времени. С осени 2021 года синхронизирована работа двух ионозондов - в г. Салехард и в г. Новосибирск. На рисунке 6 показаны суточные вариации критической частоты слоя F2 при наклонном зондировании радиотрассы Салехард-Новосибирск 09.05.2022 г. Длительная работа в режиме совмещенного зондирования продемонстрировала устойчивость применения такого метода исследования ионосферы.



**Рис. 6. Суточные вариации критической частоты слоя F2 при наклонном зондировании радиотрассы Салехард-Новосибирск 09.05.2022 г.**

Проведенная серия экспериментов подтвердила возможность устойчивого совмещенного зондирования ионосферы на ионозондах серии «Парус-А», не создавая помех вертикальному зондированию. Результат достигнут без существенных доработок, которые заключались в модернизации программного обеспечения, при заложенном при разработке потенциале.

### **Выводы**

В нашей стране наземные средства исследования ионосферы в большинстве случаев работают по принципу вертикального зондирования. Высокоширотная ионосферная сеть, на основе ионозондов иностранного производства обладает рядом ограничений. Опыт эксплуатации десяти экземпляров ионозонда «Парус-А» показал исключительную устойчивость воспроизводимой им структуры ионосферы в условиях самых разнообразных возмущений — ионосферных бурь, F-рассеяний, наклонных отражений, волн широкого спектра и т.д.

Анализ результатов наклонного зондирования существенно сложнее по сравнению с вертикальным. Ранее проводилась первичная обработка результатов НЗ на ионосферной сети от Калининграда до Петропавловска-Камчатского. Эти экспериментальные данные формируют основу для проверки прогнозирования параметров ионосферы. Совместно с моделированием результаты совмещенного зондирования могут быть использованы для прогнозирования радиотрасс. Результаты ВЗ ионозондов «Парус-А» верифицируются ионозондами других производителей, которые в ряде случаев устанавливаются в непосредственной близости. Так, в Салехарде на ионосферной станции установлены «Парус-А», CADI и ЛЧМ-ионозонд, а в ИЗМИРАН (г. Троицк) совместно с «Парус-А» зондирует ионосферы DPS-4.

Собраны данные наклонного зондирования между Салехардом и Новосибирском за период более года. В результате выявились особенности, заключающиеся в отсутствии прохождения сигнала в течение от получаса до нескольких часов без очевидной причины. В ряде случаев наблюдается прохождение сигнала только в одну сторону, также пробелы в наборе данных могут появляться в результате геомагнитных бурь или радиопомех. Эти проблемы могут быть решены в будущем путем усовершенствования аппаратного и программного обеспечения ионозондов. Результаты экспериментов по совмещенному зондированию требуют дальнейшего анализа.

Для пространственного покрытия территории России необходимо расширить возможности ионосферной сети. Это может быть сделано за счет увеличения количества ионозондов, а также расширения их возможностей в части наклонного зондирования и применения спутниковых средств.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022г.*

### **Литература**

1. Деминов М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли : Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. – Москва : Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 2015. – С. 295-346. – EDN YNAQOR.
2. Скрипачев В.О., Суровцева И.В., Барсуков А.И., Жуков А.О. Результаты обработки данных бортовой геофизической аппаратуры для выявления сейсмической активности // Материалы пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Труды



ВНИИЭМ. Приложение за 2017 год, серия Вопросы электромеханики, «Корпорация «ВНИИЭМ» Москва, с. 159-167.

3. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами: тематический выпуск, посвященный 75-летию сотрудника ИПГ, профессора Н. П. Данилкина / под ред. В. Б. Лапшина. - Москва : ИПГ, 2014. - 308 с.

4. Verhulst T., Altadill D. et all. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronized ionosondes // Advances in Space Research, 2017. V. 60. I. 8. P. 1644-1656.

5. Литвинов С.В., Глинкин И.А., Панышин Е.А., Скрипачев В.О. Обработка результатов эксперимента по совмещенному (вертикальному и наклонному) зондированию ионосферы на ионозондах серии Парус-А // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 372. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a

6. РД 52.26.817-2015 «Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть I. Ионосферные наблюдения», Обнинск ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» 2015 – 200 с.

7. Гавриленко В.Г., Яшнов В.А. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 101 с.

8. Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н. Ионозонд "Парус-А": новый измерительный комплекс ИЗМИРАН // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли : Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. – Москва : Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 2015. – С. 150-159. – EDN YMYGZD.

9. Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н., Власов Ю.М., Кузьмин А.В. Ионозонд "Парус-А": функциональные возможности и перспективы развития // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 4. – С. 68-74. – EDN RCWNVT.

10. Котонаева Н.Г., Денисова В.И., Панышин Е.А., Литвинов С.В., Глинкин И.А. Результаты эксперимента по комплексному зондированию ионосферы на ионозондах серии "Парус-А" ионосферной сети Росгидромета // Всероссийские открытые Армандовские чтения : Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн, Муром, 28–30 мая 2019 года. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ 2019. – С. 326-335. – EDN ВВОСJW.

11. Корляков Д. С., Литвинов С. В. Приемные и передающие антенны современного ионозонда // Материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 13–16 сентября 2022 года – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 53-56. – EDN YKJYUB.