

Радиозондирование ионосферы с борта космического аппарата. История исследований и современные достижения

Н.Г. Котонаева, Н.П. Данилкин, С.В. Журавлев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова
129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9.
E-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru*

Краткий обзор о развитии практики радиозондирования ионосферы с борта космических аппаратов (КА) от КА Аллэут-1 до запущенных в ноябре 2024 года КА «Ионосфера - М №1 и №2». Проведено сравнение высот орбит космических аппаратов, антенно-фидерных устройств ионозонда внешнего радиозондирования, результатов, полученных в различных миссиях. Показано, что ионозонд на борту КА, наряду с наземными наблюдательными платформами входит в перечень приборов оперативного наблюдения за ионосферой, позволяющий в реальном времени осуществлять наукастинг и строить краткосрочные прогнозы параметров ионосферы и параметров радиотрасс.

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, внешнее радиозондирование, космический аппарат, антенно-фидерное устройство

Radiosonding of the ionosphere from a spacecraft. Research history and modern achievements

N.G. Kotonaeva, N. P. Danilkin, S.V. Zhuravlev

Fedorov Institute of Applied Geophysics

A brief overview of the development of the practice of ionospheric radiosonding from spacecraft (spacecraft) from the Alluet-1 spacecraft to Ionosphere -M spacecraft No. 1 and No. 2 launched in November 2024. The heights of the orbits of spacecraft, antenna-feeder devices of the ionosonde of topside radiosonding, and the results obtained in various missions are compared. It is shown that the ionosonde on board the spacecraft, along with ground-based observation platforms, is included in the list of devices for operational monitoring of the ionosphere, which allows real-time science casting and short-term forecasts of ionospheric parameters and radio path parameters.

Keywords: ionosphere, ionosonde, topside radiosonding, spacecraft, antenna-feeder device

Введение

Внешним радиозондированием ионосферы (ВнЗ) в соответствии с ГОСТ 25645.113-2015 называют вертикальное радиозондирование ионосферы, при котором излучение и приём сигналов производится на искусственном спутнике Земли (ИСЗ), находящемся выше максимума концентрации электронов. Ионозонд, установленный на ИСЗ, даёт возможность получать информацию о структуре и процессах на высотах между ИСЗ и максимумом концентрации электронов в ионосфере. Если орбита ИСЗ находится ниже максимума слоя F2, то может использоваться термин внутреннее радиозондирование. Ионозонд является радаром декаметрового диапазона. Для ионозондов, установленных на ИСЗ, применяется термин бортовой ионозонд. ВнЗ - уникальный способ наблюдения за ионосферой, дающий полномасштабную информацию об ионосфере выше высоты максимума концентрации электронов, а главное о самом максимуме слоя F2 ионосфере. ВнЗ один из основных методов наблюдения за ионосферой, включенных в Руководящий

документ Росгидромета Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям, часть 1, РД 52.26.817 – 2023.

Параметры ионосферы определяются на ионограммах бортового ионозонда по следам отражений от ионосферы. На рис. 1 представлена типичная ионограмма ионозонда КА «Ионосфера М-2» в точке с координатами 36,7° с.ш., 37,6° з.д. Цифрами обозначены: 1 – след отражения от ионосферы обыкновенной компоненты, 2 – след отражения от ионосферы необыкновенной компоненты, 3 – след отражения от ионосферы медленной необыкновенной компоненты (Z-компоненты), 4 – след отражения от Земли обыкновенной компоненты, 5 – след отражения от Земли необыкновенной компоненты. По ионограмме можно определить, что критическая частота ионосферы $f_oF2 = 6,3$ МГц, частота необыкновенной компоненты на высоте КА составит $f_{xs} = 2,7$ МГц, частота z-компоненты на высоте КА меньше частоты f_{xs} ровно на значение гирочастоты и составляет 1,8 МГц. След отражения необыкновенной компоненты f_xF2 на ионограммах внешнего радиозондирования виден обычно более четко. По этим данным расчетным путем восстанавливается высотный профиль концентрации электронов, а с ним и высота максимума концентрации электронов. Совпадение высокочастотной границы следа отражения от ионосферы и низкочастотного следа отражения от Земли для аналогичных компонент является критерием отсутствия поглощения на частотах близких к критическим. На ионограммах видны гармоники плазменных резонансов гирочастоты f_h до 6 порядка и верхнегибридный резонанс f_{TS} на частоте 1,6 МГц.

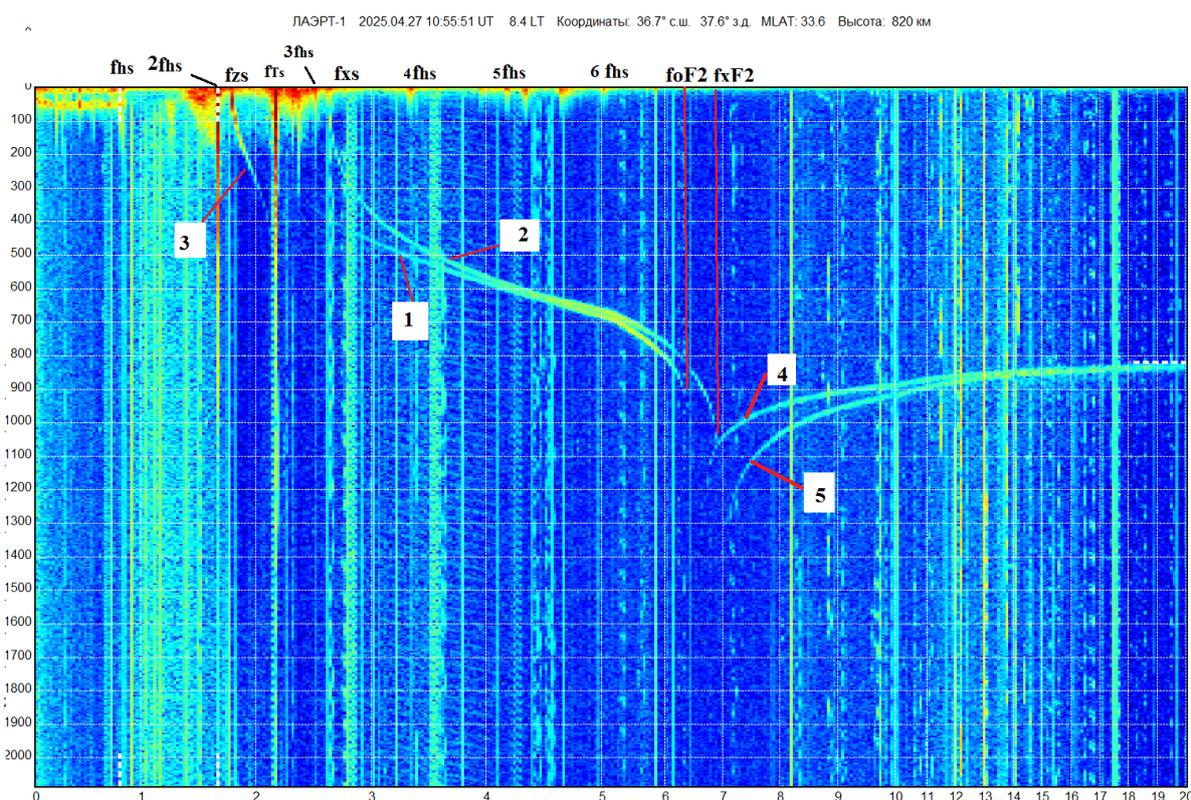


Рис. 1. Ионограмма внешнего радиозондирования ионозонда Лаэрт с отмеченными плазменными параметрами ионосферы с ИСЗ «Ионосфера-М №1» : 1) – след отражения от ионосферы обыкновенной компоненты , 2) – след отражения от ионосферы необыкновенной компоненты, 3) – след отражения от ионосферы z - компоненты, 4) – след отражения от Земли обыкновенной компоненты , 5)) – след отражения от Земли необыкновенной компоненты

История экспериментальных исследований ионосферы методом внешнего радиозондирования

О планах запуска искусственных спутников Земли (ИСЗ) в целях исследования ионосферы было впервые объявлено в рамках программы Международного геофизического года в 1957-1958 годах. В последние десятилетия XX века были проведены эксперименты по размещению ионосферных станций вертикального радиозондирования на ИСЗ.

В 1962 г. был запущен первый такой ИСЗ, зондирующий ионосферу сверху: Alouette 1. Канадский Спутник связи Alouette 1 был построен под руководством физика Джона Герберт Чепмена, выдающегося эксперта в области физики ионосферы. Alouette 1 был запущен с авиабазы Ванденберг, штат Калифорния, где США запускают спутники на полярные орбиты. 145-килограммовый овальной формы Alouettes, был покрыт 6500 солнечными батареями. [1] Самая известная особенность Alouette 1 была в паре его дипольных антенн, 23 и 45 метров в длину, которые были самыми большими антеннами, развернутыми в космосе до того времени. Антенна была детищем одного из величайших изобретателей Канады, Джорджа Кляй. Антенна была сделана из предварительно напряженной стали и закручена как рулетка при запуске спутника рис. 2 [2]. Когда же она разматывалась в пространстве, она формировалась в виде трубки.



Рис. 2 Антенна Alouette 1

Спутник Alouette-1 был запущен с целью исследования глобальных вариаций электронной концентрации во внешней ионосфере с особым акцентом на эффектах высоких широт. Однако на ионограммах ВнЗ кроме следов отражений электромагнитной волны от ионосферы оказалось огромное количество четко выраженных пиков, отражающих резонансные свойства ионосферной плазмы. Достаточно сказать, что гармоники гирочастоты фиксировались до номера $n = 22$. Относительно плазменных резонансов был получен настолько богатый материал, что дальнейшее развитие эксперимента (Alouette-2, ISIS-1 и ISIS-2) шло, в основном, в плане более детального изучения этих резонансов.

В 1979 г. в СССР лабораторией Ю.В.Кушнеревского (ИЗМИРАН) был подготовлен успешный проект в рамках которого был запущен спутник Интеркосмос-19. ИСЗ «Интеркосмос-19» был предназначен для комплексного исследования приземной плазмы выше максимума слоя F2 в рамках Международного научного проекта по изучению магнитосферы Земли. В задачу научного проекта входило исследование структуры внешней ионосферы, уточнение взаимодействия атмосферы Земли с волновым излучением Солнца и корпускулярными потоками, а также исследование

некоторых особенностей ионосферного распространения радиоволн. Основным его преимуществом был режим непрерывной работы с запоминанием в течение ~16 ч, что составляет ~11 витков или 250 по долготе. После сброса телеметрической информации этот режим мог быть повторен. Таким образом, хотя и за счет ухудшения качества ионограмм, этот режим позволял получать глобальное распределение электронной концентрации во всей толще внешней ионосферы. [3].

Эксперимент на ИСЗ «Космос 1809» (1986 г.) с почти полярной орбитой - наклоном 84° - принес дополнительные сведения о сложной и мало поддающейся моделированию арктической ионосфере. Головной организацией при проведении этого эксперимента был ИПГ. Вершиной эксперимента явился поход сотрудников ИПГ на Северный полюс на борту атомного ледокола «Сибирь» для регистрации ионограмм с ИСЗ «Космос 1809» и проведения особого вида вертикального зондирования, основанного на синхронной работе передатчика на ИСЗ и приемника на Земле – трансionoсферного зондирования. В течение 42 дней был осуществлен непрерывный мониторинг всего арктического региона. Одним из новых результатов было обнаружение нескольких серий характерных отражений типа рассеяния, появление которых было результатом прохождения через сложное плазменное образование – тонкую стенку повышенной концентрации электронов.

И сам бортовой ионозонд, и весь комплекс приборов этих ИСЗ должны были стать базовыми для Ионосферно-магнитной службы нашей страны. Всего на КА находилось 8 приборов и предполагалось на будущее отработать основной приборный состав для космического сегмента Ионосферно-магнитной службы. Результаты оперативных наблюдений с этого ИСЗ предполагалось передавать не только в Центр Ионосферно-магнитной службы, но и на региональные станции, а также Потребителям по специальному радиоканалу.

Все перечисленные выше ИСЗ с ионозондом на борту летали на высотах выше 500 км. ИСЗ «Alouette-1», «ISS -1,-2» имели полярные или близкие к ним орбиты. «Космос-1809» и «ISIS-2» летали на аналогичных орбитах с высотой 900 км и 1400 км соответственно. Орбиты спутников «Alouette-2», «ISIS-1», «Интеркосмос-19» были эллиптическими: 500-3000 км, 570-3550 км и 500-1000 км, соответственно. Ни один из спутников с ионозондами на борту систематически не опускался ниже высоты максимума слоя F2. ИСЗ «Интеркосмос-19» в отдельные моменты в области ярко выраженной экваториальной аномалии мог опускаться ниже высоты [4].

Эксперимент, проведенный с использованием ионозонда, установленного на орбитальном комплексе (ОК) «Мир», летавшем на высотах 340 – 400 км, стал первым в мире экспериментом по радиозондированию ионосферы со столь низких высот [5]. На рис. 3 показано система антенн ионозонда на блоке «Природа» ОК «Мир».

Эксперименты на ИСЗ показали существенную роль, которую могут играть спутниковые ионозонды, производя контроль ионосферы вместе с наземными ионозондами. Спутниковое радиозондирование имеет и недостатки, и преимущества по сравнению с наземным радиозондированием. К его недостаткам следует отнести менее точное определение параметров внутренней ионосферы по сравнению с наземным зондированием и сложность измерений в одном месте. К достоинствам - возможность равномерного покрытия измерениями всей территории земного шара (в том числе и над океанами, и над полюсами) и получение информации в периоды полного ионосферного поглощения. В эти периоды – кстати, наиболее интересные для радиосвязи – резко возросшее поглощение в D-области может полностью или частично сорвать все виды радиосвязи. В том числе и сами ионосферные станции становятся фактически «слепыми». Спутниковое радиозондирование продолжает надежно и в это время контролировать ионосферную обстановку. Поэтому была сформулирована идея

совместного использования бортовых и наземных ионозондов в интересах оперативной службы ионосферного мониторинга.

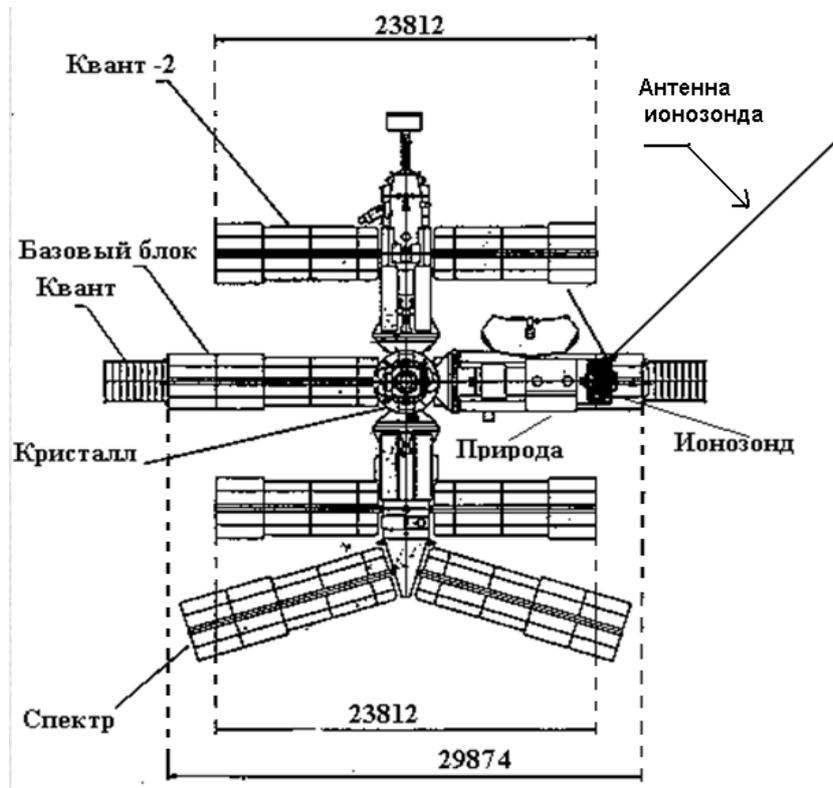


Рис.3 Схематическое изображение орбитальной пилотируемой ОК «Мир» с указанием размеров отдельных блоков станции

Мониторинг ионосферы с космических аппаратов за рубежом

Интерес именно к оперативному радиозондированию ионосферы никогда не пропадал. В 1980 г. Управление разведки ВВС США заказало, получило и в течение 1982-1991 г.г. использовало военные метеорологические спутники DMSP 5D-2 для оперативного контроля, прогноза и картирования глобальной ионосферы [6].

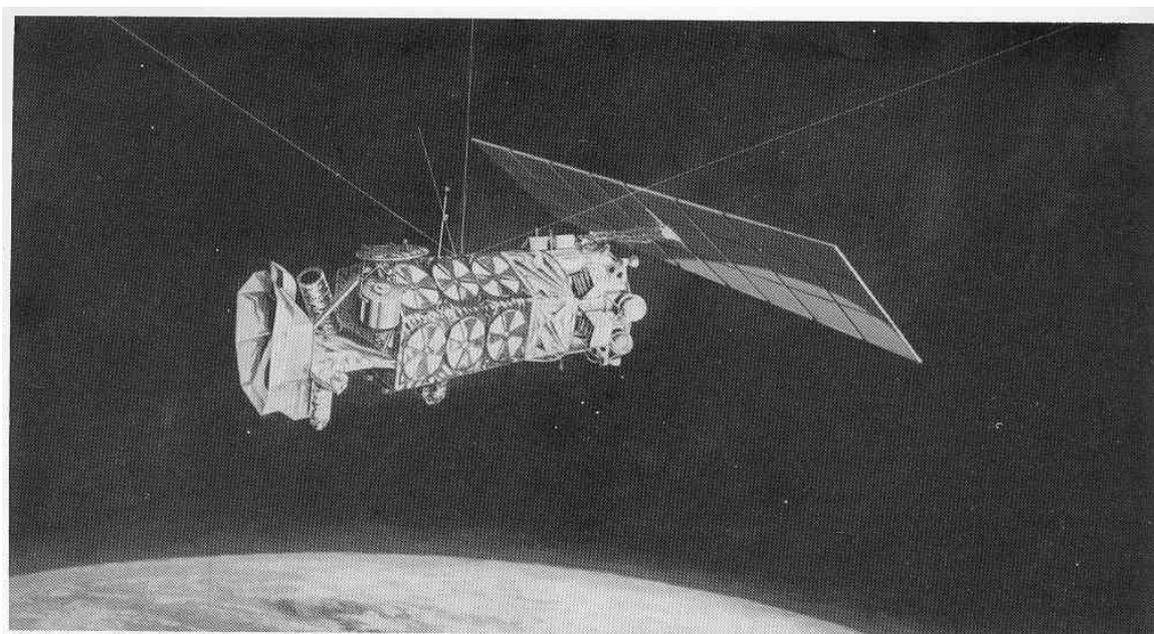
В качестве датчика использовался ионозонд, установленный на внешней поверхности спутника, который обеспечивал детальные глобальные измерения распределения электронов в ионосфере Земли [7].

В американском издании книги “Space Directory. 1990-1991” [8]. В разделе «Военный космос» на стр. 202 приведена фотография американского военного метеорологического спутника DMSP 5D-2 (рис. 4.) на которой отчетливо видны антенны ионозонда.

Описание бортового ионозонда было опубликовано в 1981 году в материалах комиссии “G” (Ионосфера и распространение радиоволн) Генеральной Ассамблеи Всемирного Радиосоюза (URSI) [9], которая проходила в США.

Ионозонд выводился на орбиту на космическом корабле с 3х-осной стабилизацией. Ориентация корабля фиксирована в отношении его вектора скорости и надира. Бортовая память обеспечивала непрерывный сбор данных. Использование полярной орбиты с постоянным местным временем на высоте спутника приблизительно 800 км, обеспечивало получение данных на всех геомагнитных широтах примерно один раз каждые 100 минут (т.е. виток). Наземный пункт обработки данных автоматически оцифровывал ионограммы, используя алгоритм обработки ионограмм и преобразовывал данные для получения N(h)-профилей по алгоритму расчета профилей (PIA). Эти данные поступали в модель ионосферы.

В ионозонде использовался передатчик низкой мощности и многоимпульсные зондирующие сигналы, что вызвано требованием получения ионограмм за достаточно быстрые интервалы времени для точного определения параметров ионосферы. При зондировании на каждой частоте используя 27 импульсов, каждый из которых состоит из 4 сложных (соприкасающихся) импульсов по 133,3 мкс. Междумпульсное и внутриимпульсное двухфазное кодирование используется для устранения неопределенностей действующей высоты. Нечетные частоты излучаются с частотой повторения 263Гц, а четные - 200Гц.



DMSP 5D-2, the latest Defense Meteorological Satellite model. Military weather forecasters use them to prevent spy satellites wasting resources when targets are cloud-covered. (RCA)

Рис. 4 Метеорологический спутник DMSP 5D-2

Структура "окон" дальности дает полное перекрытие действующих высот от 125 до 1995 км. Около половины импульсов излучается при конфигурации приемных антенн с правой круговой поляризацией и остальная половина - с левой. Разделение О и Х сигналов обеспечивает расшифровку сложных следов на ионограммах, связанных с различными воздействиями на нее естественного и антропогенного происхождения. Антенны ионозонда позволяют разделять правую и левую поляризации, используя алгоритм, включающий информацию о расположении геомагнитного экватора. Антенна состоит из 4-х монополий по 17м, образующих 2 ортогональные V-образные антенны (согнутые диполи) с углом 100 градусов (Рис. 5.). V-образная антенна имеет диаграмму направленности без боковых лепестков в широком диапазоне частот. Условия согласования такие же, как для линейных диполей такой же длины (т.е. 34 м). Удовлетворительное согласование, ширина луча и свойство разделять поляризацию выполняются в диапазоне 3 - 19 МГц.

Информация о том, что блок, который в первых упоминаниях содержал ионозонд, был установлен на последующих аппаратах DMSP, была в общих описаниях КА вплоть до 2020 года. Что дает право высказать предположение, что в этот период с КА DMSP проводилось вертикальное радиозондирование ионосферы.

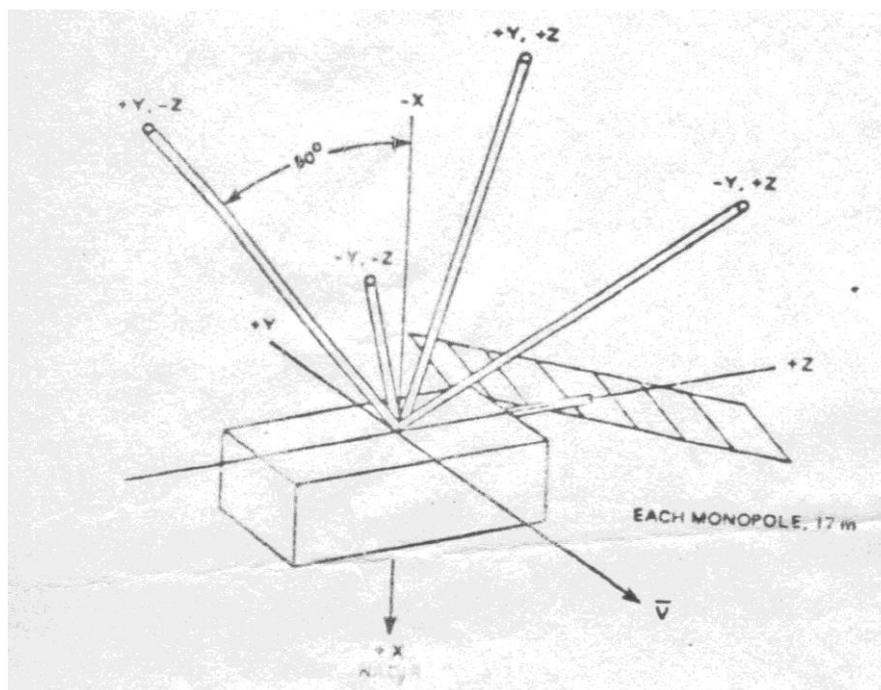


Рис. 5. Антенная система бортового ионозонда DMSP 5D2 [3].
 Характеристики ионозонда DMSP 5D2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 Характеристики ионозонда DMSP 5D2

Диапазон частот	0.5 – 19 МГц
Шаг по частоте	25, 50, 100 кГц
Время зондирования на одной частоте	0.125 с
Время получения ионограммы	от 10 до 40 с: от 80 до 320 частот, от 0.6 до 2.4 градуса дуги большого круга
Действующая высота	от 125 до 1995 км
Дискретность по высоте	10 км
Частота повторения	200 и 263 Гц
Мощность передатчика	30 Вт
Излучаемая поляризация	линейная
Принимаемая поляризация	левая и правая круговая
Выигрыш при обработке	16.8 дБ
Скорость телеметрии	3168 бит/с

Мониторинг ионосферы с космических аппаратов в России

5 ноября 2024 г. успешно выведены на целевую орбиту первые два космических аппарата (КА) «Ионосфера-М» № 1 и № 2 космического комплекса (КК) «Ионозонд». Одной из основных целевых задач комплекса являются контроль текущего состояния ионосферы с помощью синхронных измерений её параметров. На КА «Ионосфера» установлен ионозонд внешнего радиозондирования ЛАЭРТ, измерения которым должны проводиться непрерывно, сброс данных осуществляться на каждом витке при прохождении над наземными пунктами приема информации в Европейском, Сибирском и Дальневосточном центрах ФГБУ «НИЦ «Планета», получение данных должно производиться с задержкой не более 20-30 минут с момента сброса, что обусловлено периодом изменчивости ионосферных процессов. КА работают на одной солнечно-

синхронной орбите и разведены на 180° по орбите в плоскости 9/21 час на высоте 820 км. Тематическая обработка проводится в ФГБУ «ИПП» на аппаратно-программных комплексах из состава Комплекса сбора и валидации данных КС «Ионозонд». Возможности своевременной обработки и валидации информации позволяют включить данные с КА «Ионосфера-М» № 1 и № 2 в систему оперативного мониторинга геофизической обстановки.

В июне 2025 г планируется запуск еще одной пары КА «Ионосфера –М» с орбитой в плоскости 3/15 часов. Подобное расположение группировки позволяет наблюдать ионосферу в 3, 9,15 и 21 час локального времени над всей территорией Земли. Ближе к полюсам локальное время наблюдения отклоняется от указанных на 1-2 часа.

Ионозонд ЛАЭРТ обладает уникальным трансформируемым антенно-фидерным устройством (АФУ) [10]. АФУ обеспечивает передачу и прием импульсов в диапазоне рабочих частот от 0,1 до 20 МГц. АФУ ЛАЭРТ включает в себя тридцатиметровую передающую антенну, состоящую из четырех плеч антенн по 15 м каждое, и две пятнадцатиметровые приемные антенны, каждая из которых состоит из двух плеч антенн по 7,5 м каждое. После выведения на орбиту для достижения орбитальной конфигурации АФУ проведено шесть раскрытий и восемь выдвиганий. Особенностью АФУ является то, что раздвижные плечи антенны сделаны из углепластикового материала, что реализовано впервые.

На рис. 1 изображена характерная ионограмма ионозонда ЛАЭРТ. Однако кроме обычных ионограмм, отражающих амплитуды принимаемых сигналов ионозонд в интервалах между излучениями работает как спектрометр, получая единую картину ионосферы за виток орбиты спутника. На рис. 6 приведен пример такой спектрограммы. Ярко выражены гребни экваториальной аномалии (ЭА) (1,2 на рис.6), понижение плазменной частоты ввиду фонтан-эффекта между гребнями ЭА (3) и полярные высыпания (4)

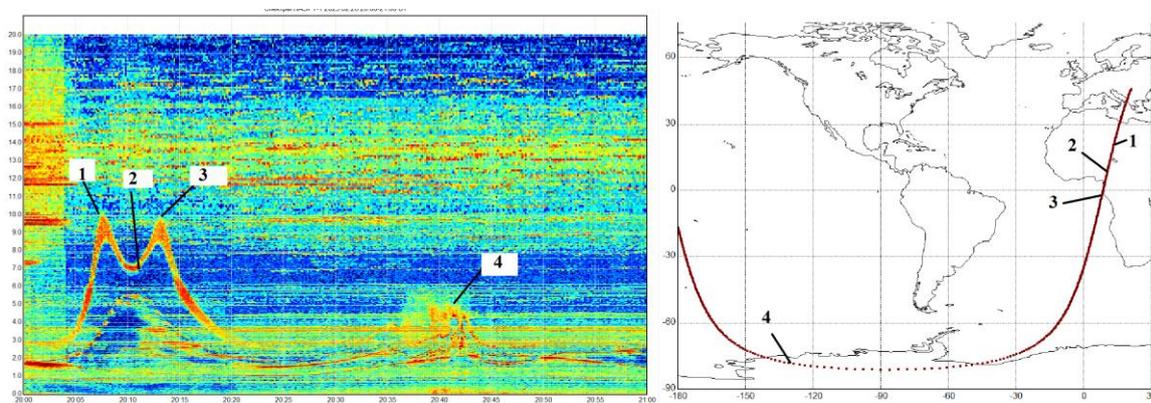


Рис. 6. слева - Спектрограмма ионозонда ЛАЭРТ, справа – след орбиты, соответствующий спектрограмме.

Первые месяцы испытаний ионозонда ЛАЭРТ позволили получить интересные результаты в части морфологических особенностей ионосферы в период высокой солнечной активности. Прежде всего расширены интервалы возможных величин критической частоты ионосферы foF2. Были зарегистрированы ионограммы с foF2 ниже 2 МГц и выше 20 МГц. Высоты главного максимума концентрации hm электронов также так же увеличили диапазон своих значений. Были зафиксированы случаи, когда КА опускался ниже hm, следовательно, высота максимума концентрации может достигать 800 км, что ранее не отмечалось.

Системный мониторинг ионосферы в России

Несмотря на открывающиеся перспективы научных исследований ионосферы, накопления данных для обновления моделей, изучения ионосферных структур, еще раз подчеркнем во многом служебный характер информации с ионозонда ЛАЭРТ. В России работает государственная система ионосферного мониторинга, подчиненная Росгидромету. До последнего момента она состояла из наземных ионозондов вертикального радиозондирования, ионозондов наклонного радиозондирования, системы высокоорбитальной радиотомографии и риометров. Данные наземных ионозондов ассимилируются в модель «Система ионосферного мониторинга и прогноза» SIMP. Информация из данной модели передается потребителям непосредственно в виде параметров ионосферы, либо в виде параметров коротковолновых радиотрасс, которые рассчитываются по вертикальным профилям концентрации электронов SIMP [11].

Включение в систему мониторинга данных бортовых ионозондов позволяет получать информацию не только с территории России. Система мониторинга ионосферы в настоящий момент обладает данными о состоянии ионосферы над океанами, полюсами и зарубежными территориями. Вполне реальной становится задача обеспечения информацией о КВ-радиосвязи Северного морского пути и других радиотрасс.

На рис. 7 справа представлен интерфейс SIMP с указанными белыми точками местами получения информации с бортового и наземных ионозондов. Слева распределение плазменных частот вдоль орбиты КА в районе Арктики. Можно отметить существенную неоднородность ионосферы, градиенты концентрации до 3 МГц на 100 км. Что существенно влияет на результаты расчета радиотрасс.

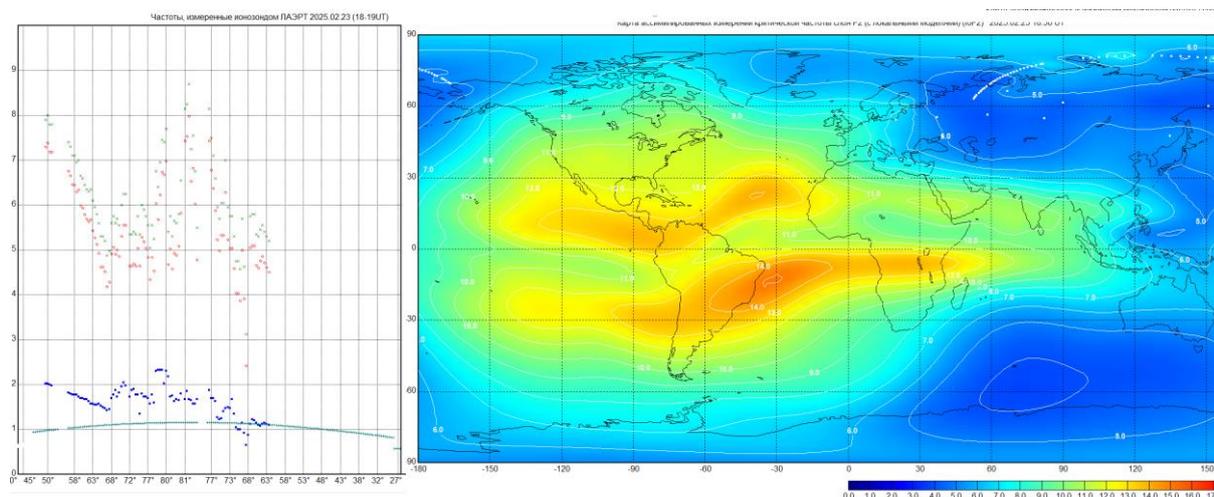


Рис. 7 Ассимиляция данных ионосферного мониторинга в модель SIMP

Выводы

Использование ионозондов внешнего радиозондирования на бортах КА на протяжении всей космической эры было источником информации о структуре ионосферы. По данным первого бортового ионозонда были построены первые модели, которые и сейчас лежат в основе современных ионосферных моделей. Многочисленные эксперименты привели к осознанию необходимости и возможности использования бортового ВнЗ как инструмента геофизических служб для оперативного получения информации об ионосфере в интересах работы различных радиосистем.

Запуск КК «Ионозонд» из 4 новых КА «Ионосфера» с ионозондами на борту открывает новый этап развития технологий радиосвязи с использованием оперативной информации о состоянии ионосферы из различных географических районов Земли. Комплексное использование наземных и бортовых ионозондов позволяет с одной

стороны детально определить внутреннюю структуру ионосферных слоев, с другой стороны расширить географию получения информации.

Вместе с этим новая ионосферная информация расширяет сведения о морфологии ионосферы, строении экваториальной аномалии, системы полярных провалов, явлениях F-рассеяния, что в конечном итоге приведет к обновлению и совершенствованию ионосферных моделей.

Литература

1. Jackson, J. E. Objectives, History, and Principal Achievements of the Topside Sounder and ISIS Programs / John E. Jackson, E. S. Warren. // Proceedings of the IEEE. – 1969. – V. 57. – N. 6. – P. 861-865.
2. Alouette 1 Canada's first satellite // <https://spacenet.on.ca/data/pdf/canada-in-space/alouette-1.pdf>
3. Карпачев А. Т. Основные принципы внешнего зондирования ионосферы (Геофизический подход) // <https://coronas.izmiran.ru/ionosphere/esound/principles.shtml>
4. Карпачев А.Т., Жбанков Г.А., Телегин В.А., Цыбуля К.Г. Интерпретация двойных следов на ионограммах ИСЗ «Интеркосмос -19» в области гребня экваториальной аномалии/ Труды Международной научной конференции Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2009, 2009. С. 581-585.
5. Danilkin, N. P. The results of the satellite radio sounding of the ionosphere below the F-layer maximum/ International Journal of Geomagnetism and Aeronomy. 2001. V. 2. N.3. С.173-180
6. Контракты Управления разведки ВВС США F04701-78-C-0016 и F04701-80-C-0037 от 1980 г.
7. History of the military polar orbiting meteorological satellite program. R. Cargill Hall, September 2001, Office of the historian. National reconnaissance office.
8. Space Directory. 1990-1991". Edited by A.Wilson.
9. MAPPING OF THE TOPSIDE IONOSPHERE USING A DIGITAL SOUNDER AND AUTOMATED IONOGRAM SCALING; H. R. Mathwich, O. E. Aubert and A. F. Martz, RCA Astro-Electronics, Princeton, N. J. K. Bibl and B. Reinisch, University of Lowell, Center Atmospheric Research, Lowell, Mass., D. Lewis, USAF, Space Division, Los Angeles, CA
10. Белокурова Н. А., Захаренко А. Б., Федотов А. Ю., Телепнев П. П. Анализ электрических характеристик антенно-фидерного устройства ЛАЭРТ для космических аппаратов «ИОНОСФЕРА-М»/ Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ т. 204. № 1. 2025.
11. Котонаева Н.Г., Анишин М.М., Григорьев Д.В. Макет оперативного обеспечения пользователей КВ-радиосвязи прогнозами состояния ионосферы и распространения радиоволн на основе данных наблюдательной сети Росгидромета // Труды XXXIII Всероссийской конференции "Радиолокационное исследование природных сред". – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. –С.420-424.