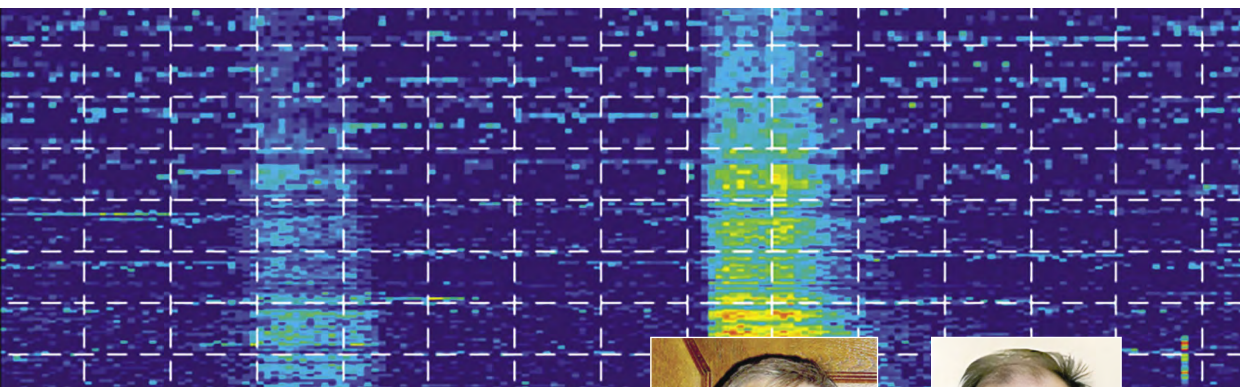


ЗАГЛЯНУТЬ ВГЛУБЬ ИОНОСФЕРЫ



ПУЛИНЕЦ Сергей Александрович,

*доктор физико-математических наук,
Институт космических исследований РАН*

ЦЫБУЛЯ Константин Григорьевич

*Институт прикладной геофизики
имени академика Е.К. Федорова*



DOI: 10.7868/5004439482503003X

Поступила в редакцию: 04.06.2025
Принята к публикации: 04.06.2025

Ионосфера – самая верхняя часть атмосферы Земли, в которой ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца ионизирует атомы, из-за чего в воздухе появляется примесь положительных ионов и свободных электронов, блуждающих между атомами. Некоторое количество заряженных частиц наблюдается уже на высоте 60 км, но самая плотная часть ионизированной материи ионосферы находится в слое от 200 до 500 км, то есть там, где пролегают орбиты многочисленных спутников, включая МКС. Таким образом, ионосфера с одной стороны является самой верхней областью земной атмосферы, а с другой – ближайшей к Земле частью околоземного космического пространства. Считается, что верхняя граница ионосферы

приходится на высоту около 2000 км, где атмосферный газ уже совершенно непохож на приземный воздух, он представляет собой почти полностью ионизованный водород, и его движение определяется не привычными газовыми законами, а магнитным полем Земли. С практической точки зрения, самая важная черта ионосферы – ее влияние на распространение радиоволн. Электроны делают воздух в этом слое электропроводящим, поэтому радиоволны, в диапазоне от длинных до коротких, отражаются от него. Поэтому ионосферу можно использовать как своего рода зеркало для связи на больших расстояниях. Вплоть до 1960-х годов такой способ радиосвязи был единственным для плывущих посреди океана кораблей или для самолетов на даль-

них маршрутах. Однако оказалось, что это зеркало далеко не идеально – ионосфера оказалась капризной и непредсказуемой стихией, в которой происходят сложные и непонятные процессы. Связь могла в любой момент ухудшиться или исчезнуть вообще, что иногда приводило к катастрофам. Важность этого вопроса привела к интенсивному изучению ионосферы. В период от 1920-х до 1950-х во всем мире были созданы десятки и сотни ионосферных станций, на которых проводилось изучение ионосферы, а потом и постоянное наблюдение. На каждой станции был установлен ионозонд, своеобразный локатор, посылающий радиоволны вверх и регистрирующий эхо. По задержке между переданным и полученным импульсом можно было определить высоту, на которой лежит отражающий слой.

Спутниковая радиосвязь, которая возникла в 1960-е годы и быстро развивается с тех пор, во многом заменила старые способы с использованием отражения от ионосферы. Спутники намного более надежны и способны передавать большие объемы информации на высоких частотах. Однако знать, что происходит в ближнем космосе по-прежнему очень важно. Как пример можно привести вездесущие теперь системы спутниковой навигации – ГЛОНАСС, GPS и ряд других. В наше время определение координат по спутниковым сигналам доведено до высокой степени совершенства. Но ионосферная плазма, лежащая между спутниковыми передатчиками и наземными приемниками, вносит непредсказуемые задержки в сверхточно привязанные ко времени импульсы навигационных сигналов, уменьшая точность определения координат. А если ионосфера хаотически и резко меняет свои характеристики на небольших расстояниях, спутниковая навигация вообще может потерять надежность.

ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ И ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

После 1957 г., когда был запущен первый искусственный спутник, открылась возможность изучать околоземное пространство непосредственно. Сразу же возникли предложения установить ионозонд на спутнике, орбита которого лежит выше наиболее плотного ионосферного слоя. Стоящий на Земле локатор «видит» только нижнюю часть ионосферы. Если частота радиоволны достаточно велика, чтобы пройти самый плотный слой, то она беспрепятственно уходит вверх, в космос. Спутниковый ионозонд, наоборот, получает радиолокаторное эхо от слоев выше уровня с максимальной концентрацией электронов. В разных странах был поставлен ряд экспериментов по зондированию ионосферы сверху, начиная от канадского спутника «Алуэтт», запущенного в США в 1962 г.

Но сегодня, пожалуй, очень трудно найти ученых, использующих данные спутникового зондирования ионосферы, поскольку использование этого метода (так сложились обстоятельства) прекратилось 38 лет назад, когда второй советский ионозонд ИС-338 работал на спутнике «Космос-1809» в 1987 г. [1]. В 1999 г. также проводился эксперимент с ионозондом на борту станции «Мир» [2], но орбита станции лежала в той области, где достигается наивысшая концентрация электронов, что неудобно для полноценного зондирования. Сигнал отражался либо выше станции, либо ниже, и в любом случае не уходил далеко.

Уменьшение интереса к спутниковому зондированию частично связано с возникновением новых способов ионосферных исследований. В 90-е годы прошлого века начал внедряться метод, основанный на просвечивании

ионосферы радиоволнами в диапазоне частот $\sim 1200\text{--}1500$ МГц, источниками которых являлись спутники глобальных навигационных систем. Иными словами, был придуман оригинальный метод обращения помех, которые вносит ионосфера в сигналы навигационных систем (задержка по времени и искажение фазы) в полезную информацию. По величине этих задержек на разных частотах, передаваемых спутником, можно оценить количество электронов вдоль линии, соединяющей спутник, и приемник на Земле. Эта величина называется полным электронным содержанием (ПЭС), или, по-английски, *total electron content* (ТЕС), и определяется как число электронов в длинном цилиндре от передатчика до приемника сечением 1 м^2 . Число это очень велико, поэтому ПЭС принято измерять в единицах TECU (TEC unit), 1 TECU равна 10^{16} электронов/ м^2 . За все последующие годы технология бурно развивалась, и сейчас уже существует несколько глобальных навигационных сетей, из которых основных четыре – это GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), GALILEO (Европа) и BeiDou (Китай). Ионосфера – очень изменчивая среда, ее состояние зависит и от высоты Солнца над горизонтом, и от времени года, и от интенсивности ультрафиолетового излучения, которая меняется с течением 11-летнего цикла солнечной активности. Солнечные вспышки, магнитные бури – все это приводит к сильным изменениям концентрации электронов в околоземном пространстве, и все эти изменения отслеживаются наблюдениями ПЭС. Высокоточные навигационные приемники гораздо дешевле, чем ионозонды, и тем более чем спутники и геофизические ракеты. Поэтому если в настоящее время работает около ста ионосферных зондов на всем земном шаре, то сети измерения ПЭС насчитывают тысячи устройств.

Но как обычно бывает, эта технология обладает несколькими неустраняемыми недостатками. Первый – неоднородность распределения наземных приемников по поверхности Земли. Для построения глобальных карт распределения ПЭС необходимо иметь более или менее однородную сеть наземных приемников, а это просто невозможно, так как посреди океана установка стационарных приемников осуществима только на немногочисленных островах. Поэтому значительная доля площади карт ПЭС является не результатом измерений, а экстраполяции данных на океанические и полярные регионы. На рис. 1 показана современная карта распределения наземных приемников сетей ГНСС.

Вторая проблема – это низкие углы наклона орбит навигационных спутников к экватору: GPS и BeiDou – 55° , GALILEO – 56° , ГЛОНАСС – 64.8° . Даже если размещать приемники в полярных зонах, спутники будут видны под низкими углами возвышения, и значение ПЭС можно будет получить только вдоль лучей, сильно наклоненных к плоскости горизонта. Ионосферу «над головой» в полярных шапках изучать таким способом невозможно, а именно там, вблизи магнитных полюсов, происходят сложные и интересные процессы.

И, наконец, самый главный недостаток – метод дает полное число электронов вдоль луча, но каким образом они распределены по высотам? Приведем такую аналогию: допустим, вы купили торт. Пока он целый, вы только можете определить его вес и название от продавца. Но чтобы узнать, какая толщина коржей или слоя крема, или шоколадной прослойки, вам нужно его разрезать. Это очень прямая аналогия, потому что в ионосферных исследованиях существует термин: «вертикальный разрез ионосферы». Его можно

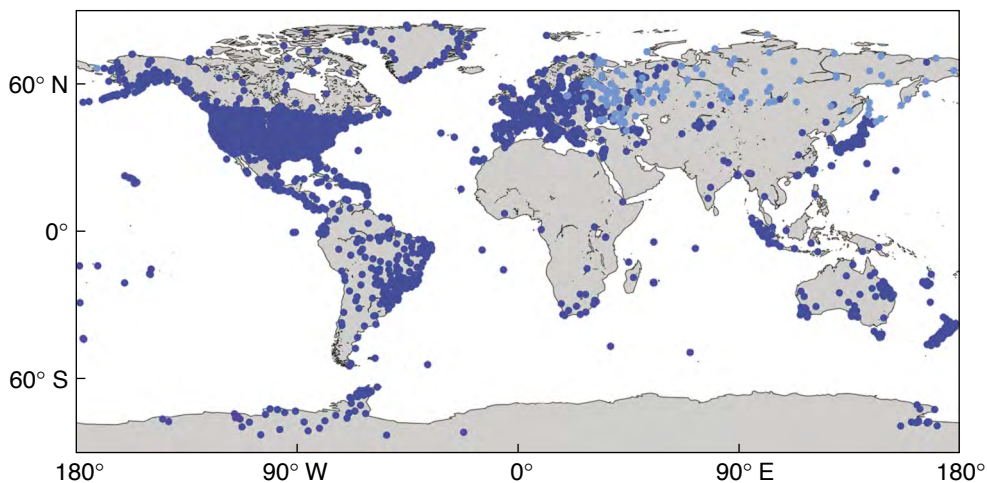


Рис. 1. Распределение наземных приемников сигналов сетей ГНСС (Ясюкевич, 2024)

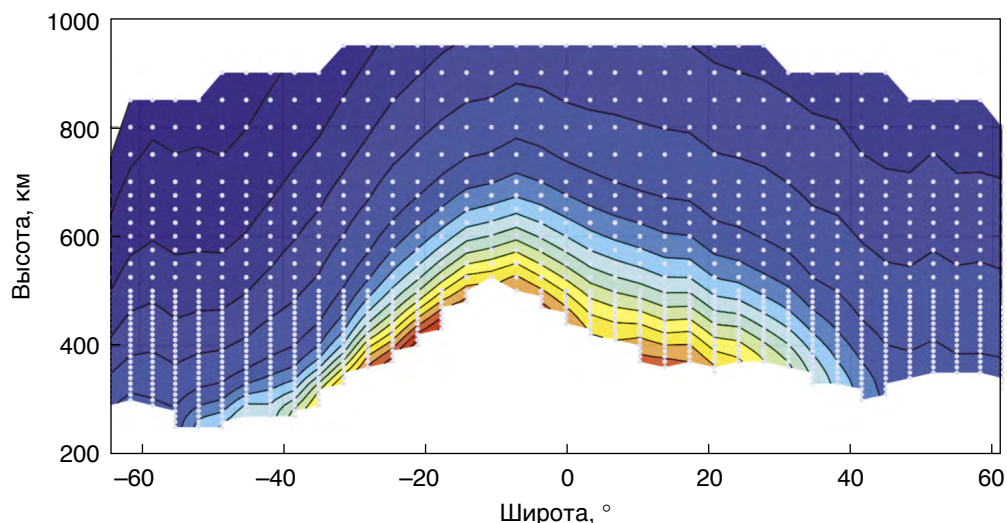


Рис. 2. Разрез ионосферы по данным ионозонда ИС-338 на борту спутника «Интеркосмос-19». Измерения проводились 16 мая 1979 г. Спутник двигался с юга на север, местное время составляло около 15 ч. Отмечены белым точками, для которых были получены значения электронной концентрации. Они образуют полосы, соответствующие местам зондирования. Видимая часть ионосферы ограничена сверху орбитой спутника, а снизу – максимумом плотности

получить только с помощью вертикального радиозондирования, о котором дальше пойдет речь. Пример такого разреза показан на рис. 2 [3]. Он составлен по данным бортового ионозонда

спутника «Интеркосмос-19», запущенного в СССР в 1979 г.

Цвета на рисунке отмечена электронная концентрация. Как видим, она максимальна в экваториальных

и средних широтах и уменьшается с увеличением широты. Также мы видим уменьшение электронной концентрации с высотой. Внизу рисунок обрезается на высоте, где концентрация электронов максимальна – в главном максимуме ионосферы. Можно заметить еще одну интересную зависимость: высота главного максимума максимальна на геомагнитном экваторе и уменьшается при движении к высоким широтам.

СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Для рассмотрения метода радиозондирования ионосферы необходимо сказать несколько слов о свойствах ионосферной плазмы. Во-первых, плазма в среднем квазинейтральна, т.е. в заданном объеме число положительных ионов и отрицательных электронов одинаково. Представим теперь, что в какой-то области наведен пространственный заряд, то есть наблюдается избыток или недостаток электронов по сравнению с ионами. Тогда электроны под действием электрического поля немедленно устремятся в эту область или из нее. Но электроны обладают массой, хотя и небольшой, поэтому они могут по инерции пролететь положение равновесия и затем начать колебаться относительно него подобно маятнику с определенной частотой, которая называется электронной плазменной частотой f_{pe} . Она связана с концентрацией электронов в плазме простым соотношением:

$$f_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}}.$$

В этой формуле кроме постоянных, таких как e и m_e (заряд и масса

электрона), имеется только одна переменная величина, концентрация электронов n_e . Если ее выразить в м^{-3} , то формула упрощается:

$$f_{pe} = \sqrt{9n_e} \text{ МГц.}$$

Второе важное явление связано с тем, что плазма в околоземном космическом пространстве пронизана магнитным полем Земли. Как известно, заряженные частицы в магнитном поле должны совершать вращательное движение вокруг вектора поля с частотой:

$$f_{he} = \frac{eB}{2\pi m_e},$$

где B – индукция магнитного поля. Эта частота называется гирочастотой электронов.

Еще один важный тип колебаний электронов является комбинированным («гибридным»), его частота называется верхней гибридной. Он отражает продольное перемещение электронов перпендикулярно силовой линии геомагнитного поля.

$$f_{uh} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{he}^2}.$$

Как было уже сказано, низкочастотные радиоволны не могут распространяться в плазме – они отражаются от нее если приходят извне и просто неспособны излучиться, если антенна находится внутри плазмы. Чтобы волна могла пройти сквозь плазму, ее частота должна превысить определенное значение – частоту отсечки. В зависимости от поляризации частота отсечки равна:

$$f_Z = \frac{\sqrt{4f_{pe}^2 + f_{he}^2}}{2} - \frac{f_{he}}{2} - \text{частота}$$

отсечки медленной необыкновенной волны;

$$f_Z = \frac{\sqrt{4f_{pe}^2 + f_{he}^2}}{2} + \frac{f_{he}}{2} - \text{частота}$$

отсечки быстрой необыкновенной волны.

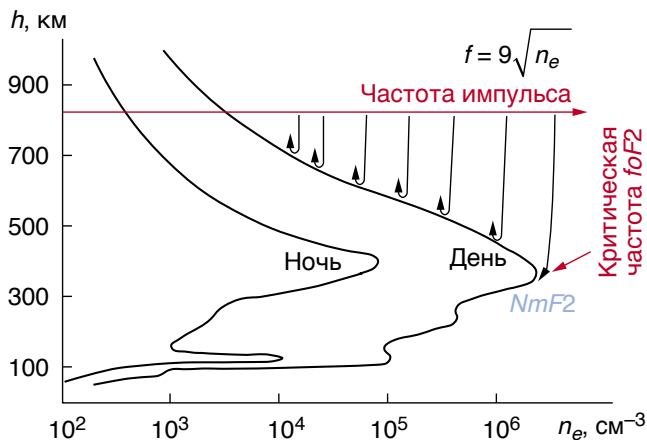


Рис. 3. Схема радиозондирования ионосферы для обыкновенной волны. По горизонтали отсчитывается концентрация электронов, жестко связанная с плазменной частотой. Черные линии – ионосферные профили в разных условиях. Ниже максимума ионосфера имеет сложное слоистое строение. Красная линия проходит на высоте орбиты спутника

Как видим, поляризация волны очень важна при распространении в магнитоактивной плазме. Радиоволна одной поляризации как бы «не чувствует» магнитного поля, она называется обыкновенной. На волну другой поляризации, необыкновенную, магнитное поле оказывает более существенное действие, ее скорость уменьшается, и она преломляется по-другому. Какие именно поляризации – линейные или круговые – соответствуют этим двум волнам зависит от угла наклона магнитного поля к направлению распространения волны, то есть к вертикали.

Теперь мы можем обратиться к сути метода импульсного зондирования ионосферы с борта ИСЗ. Когда частота радиоимпульса обыкновенной поляризации при его распространении вниз сравнивается с плазменной частотой на какой-то высоте, он будет отражен и начнет двигаться обратно к спутнику. Если время задержки между излученным и приходом отраженного импульса разделить на два (импульс прошел путь до точки отражения и обратно) и умножить на скорость света, мы получим расстояние от высоты орбиты спутника до точки отражения.

Поскольку высота орбиты спутника известна, то мы получаем высоту, на которой плазменная частота была равна частоте радиоимпульса. Используя приведенную выше формулу зависимости плазменной частоты от величины электронной концентрации, мы получим значение электронной концентрации на известной высоте. Если сформировать последовательность импульсов с постепенным увеличением частоты, мы сможем узнать, какова концентрация электронов на высотах от орбиты спутника до наиболее плотного слоя ионосферы. Зависимость электронной концентрации от высоты называется ионосферным профилем (рис. 3).

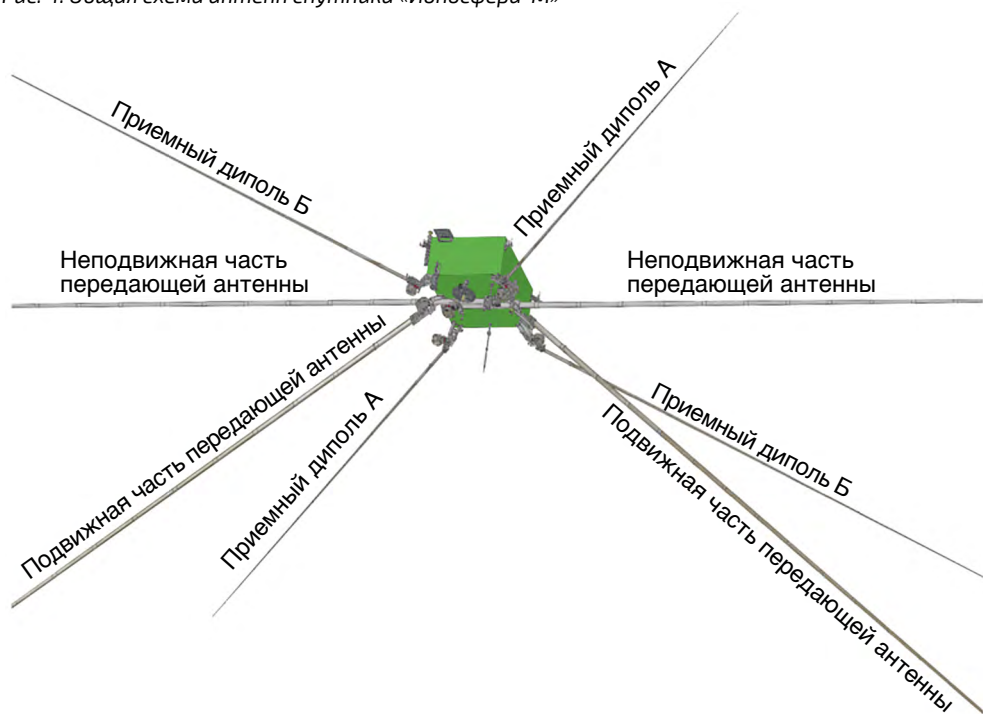
А что будет происходить с импульсом, частота которого больше плазменной частоты в максимуме электронной концентрации? Поскольку ниже максимума электронная концентрация, следовательно и плазменная частота уменьшается, ничто не будет препятствовать распространению импульса вниз до поверхности Земли. Мало того, энергии импульса обычно хватает, чтобы, отразившись от Земли, вернуться назад на высоту спутника, подобно эхоимпульсу самолетного радиовысотомера.

СПУТНИКОВЫЙ ИОНОЗОНД ЛАЭРТ

Успешный запуск двух космических аппаратов «Ионосфера-М» 5 ноября 2024 г. дал возможность возобновить программу спутникового зондирования ионосферы. На борту каждого из них работает ионозонд ЛАЭРТ, который принадлежит к следующему поколению цифровых ионозондов, по сравнению с теми, что были установлены на спутниках «Интеркосмос-19», «Космос 1809» и на борту орбитальной станции «Мир». Прибор назван в честь **ЛА**боратории **Э**кспериментальных **Рабо**Т Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук, в которой был когда-то создан ионозонд ИС-338. Зонд не только способен проводить вертикальное зондирование ионосферы в диапазоне

частот от 0.1 до 20 МГц, но и работать в режимах радиоспектрометра и релаксационного зонда, для чего раньше были нужны дополнительные приборы на том же спутнике. Помимо расширения частотного диапазона и функциональных возможностей для ионозонда была разработана уникальная антенная система, состоящая из отдельных передающей и приемных антенн. Для эффективного излучения волн длиной до 3 км антенна должна иметь достаточно большой размер. Передающая антенна представляет собой V-образный диполь длиной 30 м, а приемная антенна состоит из двух скрещенных диполей длиной 15 м каждый (рис. 4). Во время запуска антенны находятся, конечно, в свернутом состоянии и разворачиваются после вывода на орбиту. Еще одна инновация – это материал антенных диполей. Они были изготовлены не из металлического сплава,

Рис. 4. Общая схема антенн спутника «Ионосфера-М»



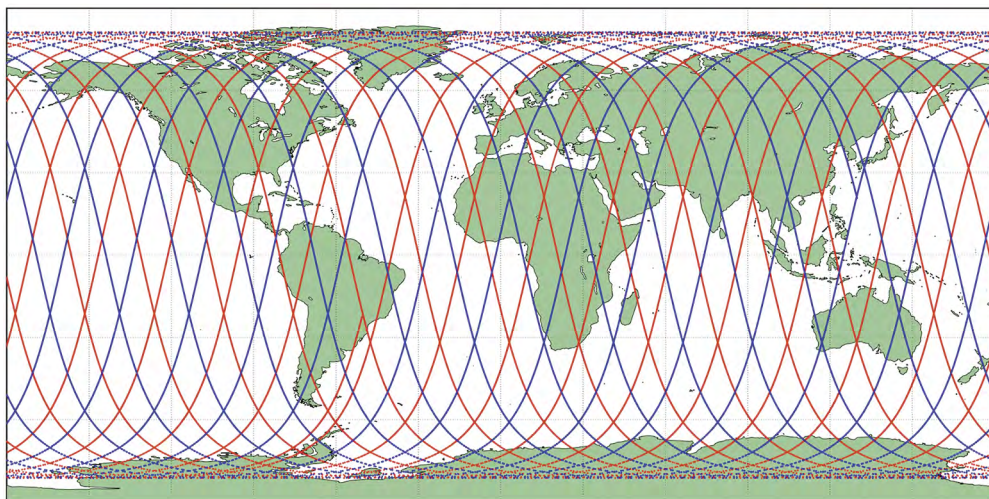


Рис. 5. Глобальное распределение мест зондирования спутников «Ионосфера-М» за сутки 15 мая 2025 г. Красные точки – «Ионосфера-M1», синие – «Ионосфера-M2»

а из композитного углепластика, что резко уменьшило их массу по сравнению с металлическими.

Чтобы не перегружать читателей техническими деталями, перечислим основные параметры прибора, которые существенны для дальнейшего понимания получаемых результатов. Ионозонд излучает последовательно импульсы, пиковая мощность которых составляет ~300 Вт, а длительность 100 мкс. Временной промежуток между соседними импульсами, когда ионозонд ожидает прихода отраженного импульса, составляет 15 мс. За 8 секунд ионозонд «пробегаёт» 400 частот в диапазоне 0.1–20 МГц с шагом 25 кГц в нижней половине диапазона частот, 50 кГц – в средней и 100 кГц в верхней. Ионозонд «молчит» 2 секунды и через 10 секунд после начала предыдущего сеанса зондирования начинает следующий. Таким образом, пространственное разрешение проводимых сеансов зондирования составляет ~70 км. Длительность одного витка спутника составляет 100 минут,

и при непрерывной работе ионозонда мы получаем 600 ионограмм за виток и ~8640 ионограмм в сутки. Если иметь в виду, что на орбите сейчас находятся два спутника «Ионосфера-М», а в конце июля будет запущено еще два, то при завершении формирования группировки объем информации, получаемой системой «Ионозонд», будет составлять 34 560 ионограмм в сутки. Как видно из рис. 5, проблема с неоднородным покрытием земной поверхности ионозондами и измерителями ПЭС (рис. 1) полностью решается за счет глобального равномерного покрытия с орбиты.

Результаты работы ионозонда в определенное время и определенной географической точке принято изображать в виде ионограммы, то есть диаграммы частота-высота, на которой цветом от синего до красного отмечена интенсивность принятого сигнала (рис. 6). Частотные каналы, от 0.1 до 20 МГц, отложены по горизонтальной оси. На каждом канале передатчик излучает импульс соответствующей частоты (его следы можно заметить в самом верху,

на нулевой высоте). Затем приемник записывает радишум в течение 15 мс, в том числе приход отраженного от ионосферы эха. Этот шум отображается на диаграмме, каждый канал заполняется сверху вниз. По вертикальной оси отложена временная задержка, переведенная для удобства в километры и соответствующая глубине проникновения в ионосферу. Поскольку скорость движения радиоимпульса в плазме меньше световой, показанная на диаграмме глубина больше истинной и даже иногда больше высоты орбиты. Впрочем, эта кажущаяся глубина может быть пересчитана в истинную.

Мы видим на ионограмме характерное раздвоение следа как результат того, что линейно поляризованный импульс распадается в магнитоактивной плазме на два – обыкновенный и необыкновенный – движущиеся с разными скоростями. На высоких частотах, где сигнал достигает земной поверхности, видны отражения от нее, также

для обыкновенной и необыкновенной волн. Чем выше частота, тем слабее влияние плазмы на радиоволны и тем ближе глубина следа к истинной высоте орбиты (820 км).

Требуют пояснения вертикальные пики на верхней оси ионограммы. Это так называемые плазменные резонансы. Когда частота зондирующего импульса совпадает с одной из собственных частот плазмы, возбуждаются интенсивные и длительные колебания. Это явление подобно колебаниям струны гитары, когда частота громкого звука совпадает с частотой ее настройки. Мы видим резонансы на гирочастоте электронов и ее гармониках вплоть до пятой, на плазменной и верхнегибридной частотах. Также заметно темное пятно под верхней осью на частотах ниже плазменной, где электромагнитные волны не могут распространяться. Узкие полосы справа – это помехи от наземных радиостанций, прорывающиеся через ионосферу снизу.

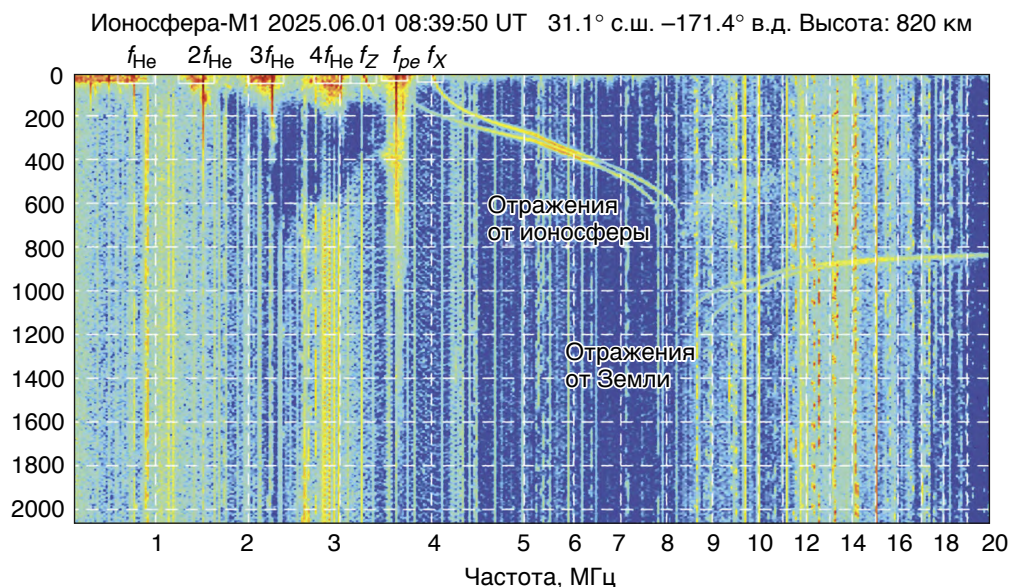


Рис. 6. Пример ионограммы, полученной на спутнике «Ионосфера-М1» 1 июня 2025 г. в 08:39:50 UT

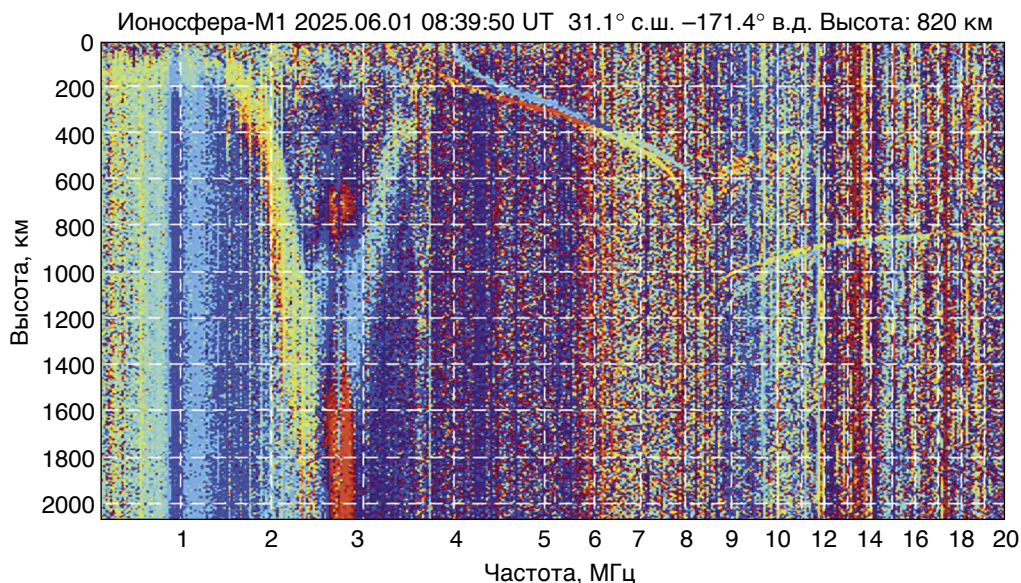


Рис. 7. Поляризация принятого сигнала для ионограммы, изображенной на рис. 6. Красный цвет соответствует обыкновенной волне, голубой – необыкновенной. Вследствие близости места зондирования к экватору, волны, отраженные от более глубоких слоев, имеют несколько другую, эллиптическую, поляризацию

Очевидно, что ручная обработка такого объема информации невозможна, нужна организация автоматической обработки с использованием технологии распознавания изображений, но этому вопросу будет посвящена другая статья. В настоящей работе мы можем продемонстрировать один из подходов к автоматизации обработки с помощью определения поляризации принимаемых волн путем расчета разности фаз между сигналами, принимаемыми скрещенными диполями (рис. 7).

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИОНОЗОНДА ЛАЭРТ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Ионозонд ЛАЭРТ позволяет получать не только вертикальные профили электронной концентрации, но и оперативно оценивать структурные особенности

ионосферы, регистрировать электромагнитные излучения как естественного происхождения, так и антропогенные сигналы, а также излучения от удаленных источников, например, солнечные радиовсплески III типа.

Поскольку примеры ионограмм уже были приведены выше, мы продемонстрируем, как быстро оценить получаемую информацию в режиме релаксационного зонда. Как уже было сказано, в течение одного витка мы получаем около 600 ионограмм. Даже просмотреть такое количество за короткий промежуток времени невозможно. Но тут приходят на помощь спектрометрические измерения, организованные следующим образом. Мы измеряем уровень сигнала на входе приемника за несколько микросекунд до излучения зондирующего импульса и еще раз через 2.5 мс после его излучения. Во втором случае реализуется режим релак-

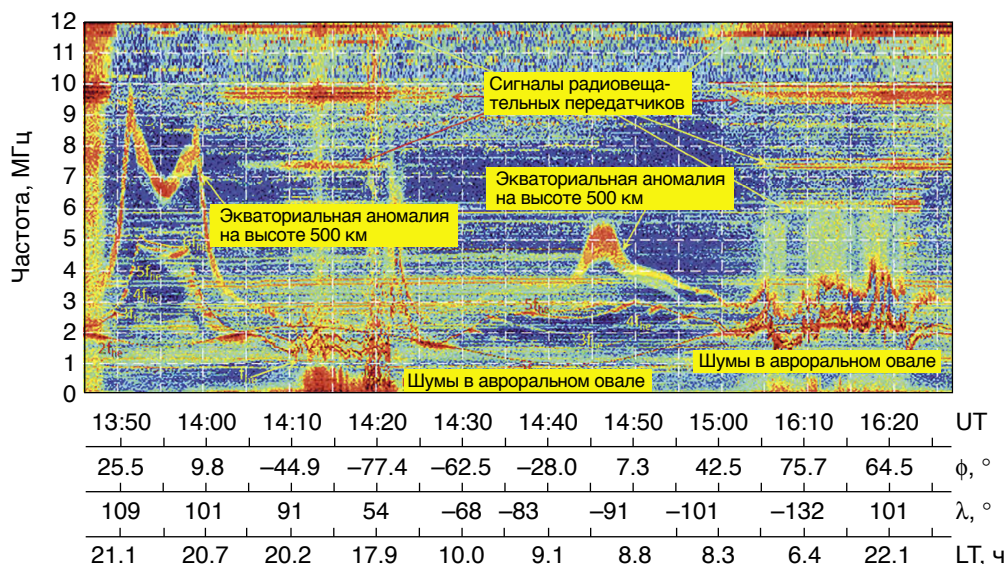


Рис. 8. Динамический спектр вдоль витка 15 марта 2015 г. в режиме релаксационного зонда. По вертикали – частота измеренных шумов, цветом, от синего до красного, отмечена их интенсивность. По горизонтальной оси отложены гринвичское время (UT), широта (ϕ), долгота (λ) точек измерений и местное время (LT).

сационного зонда, принимающего еще не успевшие затухнуть колебания плазмы рядом с антенной. Таким образом мы получаем значения плазменной и верхнегибридной частот, а также гармоник электронной гирочастоты на высоте орбиты спутника. Приятным бонусом является прием сигнала, который отразился от высоты, достигаемой импульсом за 2.5 мс (по нашим оценкам – это высота 500 км). Такие спектры вдоль орбиты мы называем динамическими. Пример такой регистрации представлен на рис. 8.

В нижней части всей диаграммы, до 2 МГц, мы видим синусообразную волну. Если посмотреть на географические координаты, отложенные на оси снизу, мы увидим, что минимумы наблюдаются вблизи экватора, а максимумы – вблизи полюсов. Эта кривая – вторая гармоника гирочастоты электронов. Двугорбая структура в левой части ри-

сунка, максимумы которой достигают 8–10 МГц – это экваториальная аномалия, интенсивность которой увеличивается в вечернем секторе около 21:00 местного времени. Такие повышения концентрации электронов по обе стороны геомагнитного экватора очень характерны для земной ионосферы. В утреннем секторе на экваторе на высоте 500 км формируется только один максимум, не такой интенсивный, как в вечернем. Внутри максимумов экваториальной аномалии отмечаются гармоники гирочастоты электронов вплоть до шестой. Хаотические вариации в полярных широтах отражают сильно неоднородную структуру ионосферы в этих областях, а красные полосы шумов на частотах ниже 1 МГц свидетельствуют о высыпании энергичных частиц в авроральных овалах, как принято называть области полярных сияний, окружающие магнитные полюса.

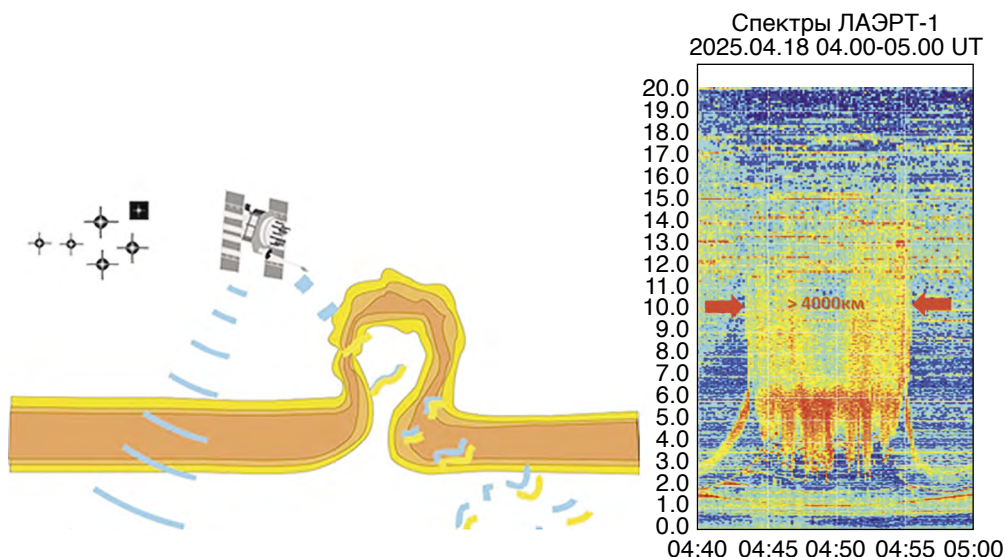


Рис. 9. Плазменные пузыри и их проявление на спектрограммах

Интенсивные горизонтальные полосы – это проникающие во внешнюю ионосферу сигналы радиовещательных передатчиков, частоты которых превышают критическую частоту ионосферы. Вблизи Южного географического полюса можно наблюдать резкий скачок электронной концентрации, который свидетельствует о пересечении спутником языка ионизации, формирующегося в полярной ионосфере. Причина возникновения этого языка лежит на гораздо больших высотах, в магнитосфере, где вращение Земли и давление солнечного ветра приводят к сложной конвекции плазмы.

Такое представление позволяет точно определить, в какой области и структуре ионосферы находится спутник и выбирать из массива всех ионограмм только те, которые представляют особый интерес. Это помогает также корректной интерпретации ионограмм.

Именно такой формат представления информации позволил понять исчезновение следов отражения сигналов на ионограммах в экваториальной

ионосфере. Этот эффект был назван нами экваториальной кавитацией. При определенных условиях в низкоширотной ионосфере возбуждаются неустойчивости (по механизму Рэля–Тейлора), приводящие к проникновению из нижней в верхнюю ионосферу пузырей холодной разреженной плазмы [5]. Обычно в литературе демонстрируются одиночные структуры, но они оказывают крайне негативное влияние на распространение радиоволн, в том числе сигналов навигационных систем (рис. 9, слева). Были обнаружены также структуры внутри экваториальной аномалии, представляющие собой последовательность нескольких десятков плазменных пузырей, занимающих область между горбами экваториальной аномалии (рис. 9, справа).

Ионозонд также может работать в режиме пассивного радиоспектрометра, то есть измерять космические радишумы на различных частотах без включения передатчика. Измерения по всему диапазону частот производятся один раз в секунду. Это по-

звolyет точно привязать то или иное ионосферное явление к географическим координатам. В частности, в диапазоне ниже 1 МГц регулярно наблюдается интенсивное излучение, которое связано с границами аврорального овала. По всей видимости, оно порождается потоками низкоэнергичных электронов, высыпаящихся в овале. Таким образом, появляется возможность даже без датчиков частиц обнаруживать их потоки. Определяя координаты положения всплесков этого излучения, можно найти положение и размер аврорального овала. Кроме того, можно заметить на регистрируемых спектрах различное положение максимума излучения. Эти различия, по-видимому, связаны с углом наклона траекторий потока частиц к магнитному полю, как наблюдалось в 1975 г. при наблюдении искусственных полярных сияний в ходе советско-французского эксперимента АРАКС [7]. В этом эксперименте французская геофизическая ракета подняла на высоту до 200 км ускоритель заряженных частиц советской разработки, инжектировавший электроны с энергией 27 кэВ и 15 кэВ в околоземное пространство над о. Кергелен. Следуя линиям магнитного поля Земли, эти электроны вызывали различные явления в верхней атмосфере над Архангельской областью. Оптическое свечение атмосферы зарегистрировать не удалось, но радишумы были зарегистрированы.

На рис. 10 слева показаны спектры, зарегистрированные при пролете спутника «Ионосфера-М1» через авроральный овал, а справа – спектры излучений, зарегистрированные в эксперименте АРАКС (черные графики), голубым цветом показаны очень схожие спектры излучений, полученные спектрометром ЛАЭРТ при пролете через авроральный овал.

В заключение демонстрации возможностей спутникового ионозонда ЛАЭРТ обратимся к регистрации сигналов от внеземных источников – солнечных радиовсплесков III типа. Из-за того, что ионосфера экранирует излучения в диапазоне нескольких мегагерц, наземные радиотелескопы регистрируют это излучение в диапазоне от сотен мегагерц до 25 мегагерц. Спутник, находящийся на орбите выше главного максимума электронной концентрации, имеет возможность регистрировать эти всплески и на более низких частотах, в нашем случае от 20 МГц до плазменной частоты на высоте орбиты спутника. Серии всплесков обычно наблюдаются при солнечных вспышках. Не стала исключением и серия вспышек 31 мая 2025 года, когда был зарегистрирован наиболее интенсивный всплеск за все время наблюдений на спутниках «Ионосфера-М» (рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запуск спутников «Ионосфера-М» вывел российские исследования ионосферы на принципиально новый уровень. Ионозонд ЛАЭРТ, успешно пройдя период летных испытаний, продемонстрировал свои возможности как комплексной лаборатории, позволяющей решать сложные задачи исследования динамики и структуры ионосферы Земли. Как бы избито ни звучала эта фраза, но в настоящее время у этого прибора нет аналогов. Спутников с ионозондом на борту нет в орбитальных группировках других государств, а эксплуатация прибора открывает широчайшие возможности для наблюдения и изучения ионосферы. Информация ионозонда позволяет проводить калибровку просвечивания ионосферы сигналами

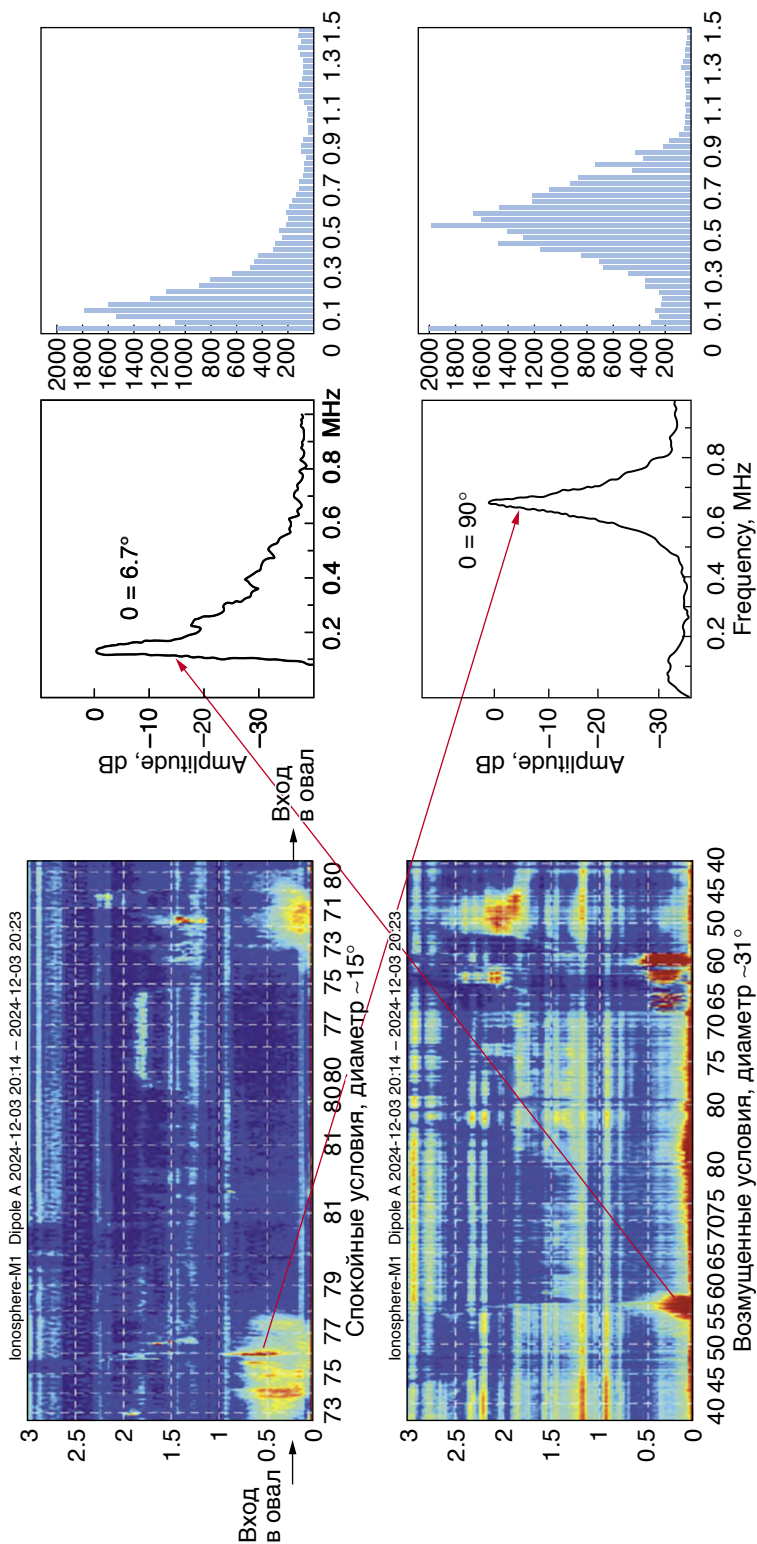


Рис. 10. Левая панель – спектры низкочастотных шумов, зарегистрированных при пролете спутников «Ионосфера-М1» (сверху) и «Ионосфера-М2» (снизу). Справа голубым цветом показаны спектры излучения при пролете через авроральный овал, черные графики – спектры, зарегистрированные при инжекции электронного пучка в эксперименте АРАКС при наклонении к магнитному полю 6.7° (сверху) и 90° (снизу).

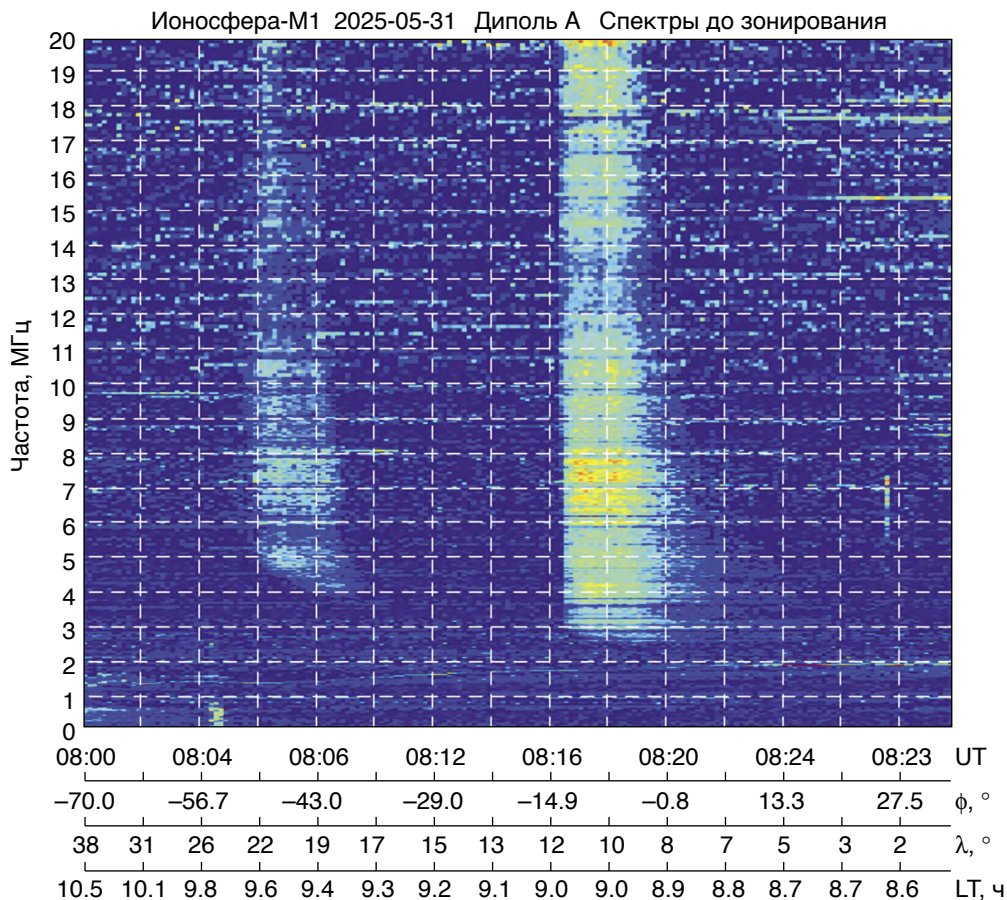


Рис. 11. Солнечные радиовсплески III типа, зарегистрированные 31 мая 2025 г.

систем ГНСС, совершенствовать эмпирические модели ионосферы, исследовать процессы взаимодействия магнитосферы и ионосферы, а также решить давно назревшую задачу обновления Государственного стандарта распределения электронной концентрации в ионосфере Земли.

Литература

1. <https://пуни.рф/Космос-1809>
2. Pulinets S.A., Liu J.-Y., Chuo Y.-J., Danilkin N.P., Depuev V. Kh., Kotonaeva N.G. MIR Space Station Topside Sounding near Taiwan, Terr Atmos. Ocean Sci. J. 2001. 12. No. 3. P. 525–536.
3. Pulinets S.A., Depuev V.H., Karpachev A.T., Radicella S.M., Danilkin N.P. Recent advances in topside profile modeling, Adv. Space Res. 2002. 29. No. 6. P. 815–823.
4. Oya H. Sequence of diffuse plasma resonances observed on Alouette 2 ionograms, J. Geophys. Res. 1970. 75. P. 4279–4285.
5. Benson R.F. Stimulated plasma waves in the ionosphere, Radio Sci. 1977. Vol. 12. P. 861–878.
6. Hanson W.B., Coley W.R., Heelis R.A. et al. Fast equatorial bubbles, J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. A2. P. 2039–2045.
7. Pulinets S.A. On the radio-emission of the injected electron beam from the point of view of ionospheric plasma diagnostics, Cosmic Research 22. 1984. No. 5. P. 807–809.