

ТАЙНЫ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ПРОЕКТ «ИОНОЗОНД» ДЛЯ ИХ РАСКРЫТИЯ



МОГИЛЕВСКИЙ Михаил Менделевич,

кандидат физико-математических наук

ЧЕРНЫШОВ Александр Александрович,

кандидат физико-математических наук

ПУЛИНЕЦ Сергей Александрович,

доктор физико-математических наук



ЛУКЬЯНОВА Рената Юрьевна,

доктор физико-математических наук

ПЕТРУКОВИЧ Анатолий Алексеевич,

академик РАН



Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/S0044394825030016

Поступила в редакцию: 03.06.2025

Принята к публикации: 03.06.2025

Ионосфера – один из самых удивительных слоев атмосферы нашей планеты, играющий ключевую роль в работе систем связи и навигации. Эта зона верхней атмосферы, простирающаяся от 60 км до нескольких тысяч километров над поверхностью Земли, содержит значительное количество заряженных частиц – электронов и ионов, образующихся под воздействием солнечного излучения. Главная характеристика ионосферы – плотность свободных электронов. Именно благодаря ионосфере возможна дальняя радиосвязь, а изучение ее свойств и динамики позволяет лучше понимать взаимодействие Земли с космическим пространством.

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ИОНОСФЕРЫ

История изучения ионосферы неразрывно связана с развитием радиосвязи. Хотя первые предположения о существовании электрически заряженных слоев в верхней атмосфере были высказаны еще в XIX в., настоящий прорыв в этой области произошел в начале XX в. Решающими стали исторические эксперименты итальянского изобретателя Гульельмо Маркони, проведенные в 1901 г. Маркони удалось осуществить радиопередачу через Атлантический океан – из Корнуолла (Великобритания) в Ньюфаундленд (Канада). Интересно, что точная длина использованной волны (или частота) до сих пор остается неизвестной. В настоящее время считается, что наиболее обоснованная частота в эксперименте 511 кГц (длина волны 586 м), рассчитанная по пара-

метрам антенн. Сразу возник вопрос: каким образом радиоволны преодолели расстояние около 3500 км, если они должны были распространяться прямолинейно и из-за кривизны Земли уйти в космос? Ответ на этот вопрос дали независимо друг от друга американский инженер Артур Кеннелли и британский физик Оливер Хевисайд. Они предположили существование в верхней атмосфере слоя с высокой электрической проводимостью, от которого отражаются радиоволны, что позволяет им преодолевать большие расстояния, огибая земной шар. Также нужно отметить, что в начале 1920-х гг. советский ученый М.В. Шулейкин установил, что в ионосфере должно быть, по крайней мере, два локальных максимума электронной концентрации: один на высоте порядка 100 км, а другой примерно на высоте 200 км. Анализируя результаты измерений напряженности поля дальних радиостанций в различных

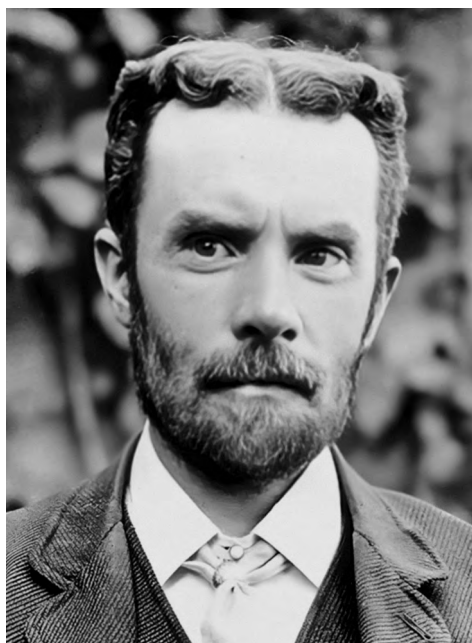


Рис. 1. Исследователи распространения радиосигнала в атмосфере
Гульельмо Маркони и Оливер Хевисайд

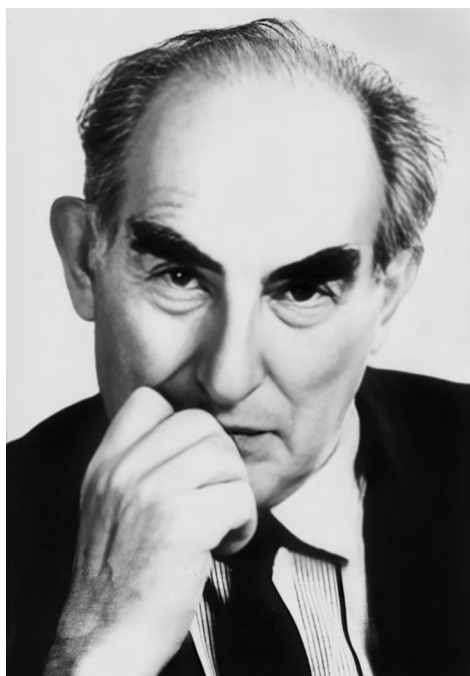
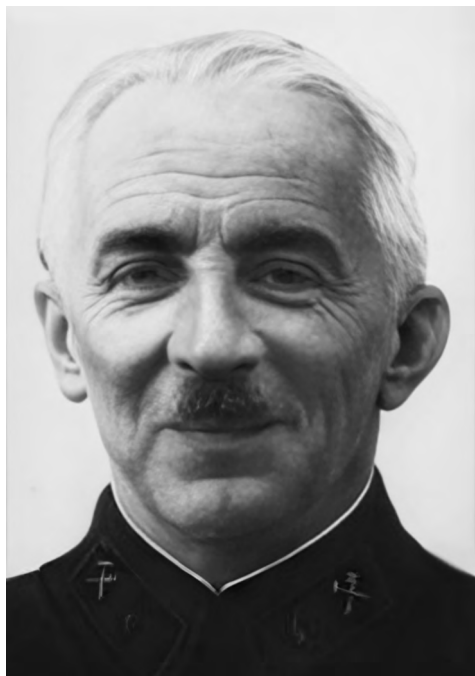


Рис. 2. Российские ученые Михаил Васильевич Шулейкин и Виталий Лазаревич Гинзбург

пунктах земной поверхности, он пришел также к выводу о существовании в ионосфере неоднородностей, имеющих форму облаков. В результате отражения радиоволн от таких облачных образований к антенне приемного устройства могут прийти два и более лучей, при сложении которых возможно либо усиление, либо ослабление (замирание) принимаемого сигнала. В конце 1940-х–1950-х гг. В.Л. Гинзбург с учениками разработал теорию распространения электромагнитных волн в плазме, в том числе и в ионосферной плазме.

Сам термин «ионосфера» был предложен британским физиком Робертом Уотсон-Уаттом в 1920-х гг. и широко вошел в научный обиход в 1930-х гг. Это название очень точно отражает сущность данного атмосферного слоя: «ионо» происходит от греческого слова, обозначающего заряженную час-

тицу, а «сфера» указывает на сферический слой вокруг Земли. В последующие десятилетия интенсивные исследования позволили ученым получить детальную информацию о вертикальной структуре ионосферы, ее временных и пространственных вариациях, а также о физических процессах, формирующих этот уникальный слой и влияющих на его поведение. Были разработаны методы исследования ионосферы с помощью радиозондирования, которые позволили систематически изучать ее свойства. На основе полученных знаний в нашей стране была создана сеть ионосферных станций, которые предназначались для решения как практических задач – определялись условия радиосвязи, так и для исследований ионосферы. Эта работа проводилась ионосферным отделом ИЗМИРАН под руководством Н.П. Беньковой.



Рис. 3. Роберт Уотсон-Уатт изобрел радар и впервые ввел термин «ионосфера»

В самом простом приближении ионосфера действует как гигантское зеркало, расположенное на высоте от 100 до 400 км над поверхностью Земли. Это зеркало позволяет радиосигналам достигать точек, находящихся далеко за горизонтом, что делает возможной дальнюю радиосвязь. Механизм отражения радиоволн от ионосферы на самом деле более сложен, чем обычное отражение от зеркала. В высокочастотном диапазоне (3–30 МГц) происходит постепенное искривление траектории радиоволны по мере ее продвижения в ионосферу, где концентрация заряженных частиц увеличивается с высотой. В результате волна постепенно меняет направление распространения и возвращается к Земле. При благоприятных условиях радиосигналы могут распространяться на тысячи километров, многократно отражаясь между ионосферой и поверхностью Земли. Важно отметить, что эффективность

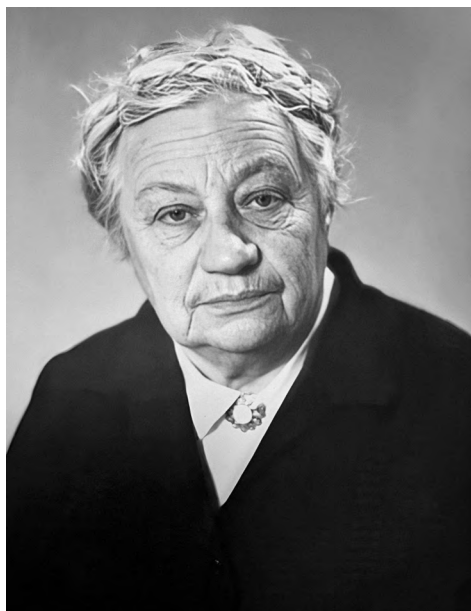


Рис. 4. Руководитель ионосферным отделом ИЗМИРАН Наталья Павловна Бенькова

отражения зависит от частоты радиоволны. Высокие частоты (выше плазменной частоты ионосферы, которая меняется и зависит от времени суток, сезона, солнечной активности – $f_{кр} \sim 3\text{--}12$ МГц) проходят сквозь ионосферу без достаточного искривления траектории и уходят в космос. С другой стороны, низкочастотные сигналы могут сильно поглощаться в нижних слоях ионосферы. Поэтому для каждой радиотрассы существует оптимальная частота, которая зависит от текущего состояния ионосферы.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ИОНОСФЕРЫ

Ионосфера не является однородным образованием. Плотность заряженных частиц (электронов) изменяется с высотой неравномерно, образуя несколько характерных слоев (рис. 5).

Традиционно в литературе выделяют следующие основные области:

слой D находится на высотах 60–70 км, это самый нижний слой ионосферы, в основном он поглощает радиоволны – особенно низкочастотные (30–300 кГц), концентрация электронов здесь относительно невелика, и слой существует преимущественно в дневное время, практически исчезая ночью из-за быстрой рекомбинации ионов и электронов после захода солнца;

слой E расположен на высотах 100–120 км, от него отражаются радиоволны средневолнового диапазона 500–1600 кГц, он также сильно зависит от солнечного излучения, достигая максимальной ионизации в полдень, ночью концентрация электронов значительно снижается, хотя слой не исчезает полностью;

слой F – самый высокий и наиболее ионизированный слой ионосферы, расположенный на высотах ~ 180–400 км, имеет решающее значение для дальней радиосвязи, поскольку от него отражаются высокочастотные радиоволны коротковолнового диапазона 3–30 МГц, в дневное время часто разделяется на два подслоя – F₁ (нижний) и F₂ (верхний), в нем достигается максимальная концентрация электронов во всей ионосфере, и именно этот слой сохраняется даже в ночное время.

Верхняя граница ионосферы находится там, где электроны можно считать «замагниченными», то есть на высотах 1000 и более километров. Выше этой границы плазма (ионизированный газ) подчиняется в основном законам движения в магнитном поле Земли, и эта область называется магнитосферой [Зелёный и Веселовский 2008]¹.

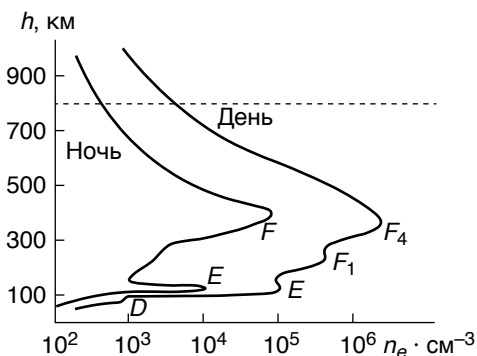


Рис. 5. Распределение электронной концентрации в слоях в ночной и дневной ионосфере. Штриховой линией обозначена высота орбиты КА «Ионосфера-М»

Главным фактором образования ионосферы является солнечное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение [Брюнелли и Намгаладзе 1988]. Когда это высокоэнергетическое излучение взаимодействует с нейтральными атомами и молекулами верхней атмосферы (преимущественно кислорода и азота), оно отрывает электроны, превращая нейтральные частицы в положительные ионы. Этот процесс называется фотоионизацией. Кроме ионизации солнечным излучением, важную роль играют высыпания заряженных частиц (электроны и ионы) из магнитосферы в ионосферу, что также вызывает ионизацию верхней атмосферы. Можно выделить также и другие факторы: солнечные корпускулярные потоки, особенно во время солнечных вспышек; космические лучи (высокоэнергетические частицы из глубокого космоса); метеорные частицы, сгорающие в атмосфере.

Неравномерное распределение ионизации с высотой в атмосфере Земли и формирование нескольких ионосферных слоев обусловлены совокупностью различных физических факторов. Поток солнечного излучения ослабевает

¹ Пулинец С.А., Ведешин Л.А. Космос как природная плазменная лаборатория // Земля и Вселенная, 2023, № 6. С. 35–53.

по мере проникновения в атмосферу из-за его поглощения и рассеяния, при этом разные длины волн (в первую очередь ультрафиолетовые и рентгеновские) поглощаются на разных высотах. С другой стороны, плотность атмосферы растет при снижении высоты, обеспечивая большее количество нейтральных атомов и молекул, способных быть ионизированными. Кроме того, на распределение ионизации также влияют химический состав атмосферы (преобладание молекулярных или атомарных компонентов на разных высотах), скорость рекомбинации электронов и ионов, зависящая от температуры и плотности, суточные и сезонные вариации освещенности, угол падения солнечного излучения, геомагнитная широта и наклон магнитного поля Земли. В совокупности эти процессы приводят к формированию устойчивой многослойной структуры ионосферы, которая может изменяться во времени и пространстве.

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Термин «космическая погода» (предположительно такой термин в научной литературе впервые использован А.Л. Чижевским) описывает совокупность явлений на Солнце, в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере Земли, которые могут влиять на работу технических систем². Ионосфера играет роль своеобразного индикатора космической погоды, поскольку ее состояние чутко реагирует на изменения

в потоках солнечной радиации и заряженных частиц. Во время солнечных вспышек резко возрастает поток рентгеновского излучения, которое вызывает быстрое увеличение электронной концентрации во всех слоях дневной ионосферы, что может приводить к нарушениям радиосвязи. Особенно сильно страдает коротковолновая связь, поскольку низкочастотные сигналы поглощаются в усиленном нижнем слое ионосферы. Солнечные вспышки могут сопровождаться выбросами высокоэнергичных заряженных частиц и корональной массы, которые, достигая Земли, вызывают геомагнитные бури и связанные с ними ионосферные возмущения [Зелёный и Веселовский 2008]. Эти явления могут приводить к сбоям в работе спутников, проблемам с радиосвязью и навигацией, а в особо сильных случаях – даже к нарушениям в работе энергетических систем из-за индуцированных геомагнитных токов. Также следует упомянуть о связи атмосферной и космической погоды, которая может приводить, в том числе, к изменению урожайности основных культур и цен на продовольствие.

Способность ионосферы отражать и преломлять радиоволны определенных частот делает возможной дальнюю радиосвязь без использования спутников или кабельных линий. Благодаря многократным отражениям между ионосферой и поверхностью Земли, радиосигналы в коротковолновом диапазоне могут распространяться на тысячи километров [Альперт 1960]. Этот механизм широко использовался в XX в. для международной коммуникации, морской и авиационной связи, радиовещания. И в настоящее время, несмотря на развитие спутниковых и оптоволоконных технологий, коротковолновая связь через ионосферу остается важным резервным каналом коммуникации, особенно в удаленных

² Климов С.И., Родин В.Г., Григорян О.Р. Изучение и контроль космической погоды // Земля и Вселенная, 2000, № 3. С. 9–18. Пилипенко В.А., Гвишиани А.Д. и др. Космическая погода и железные дороги // Земля и Вселенная, 2023, № 6. С. 22–34.

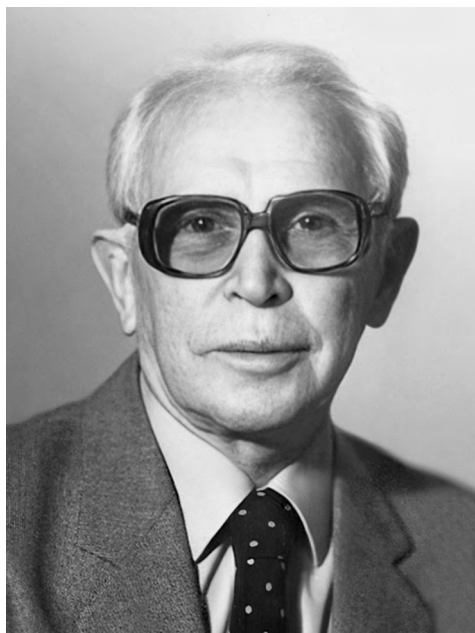


Рис. 6. Ученый в области физики плазмы и радиофизики Яков Львович Альперт

районах, в экстремальных ситуациях и для военных нужд. Однако изменчивость ионосферы создает определенные проблемы для радиосвязи. В зависимости от концентрации электронов в ионосфере меняется и максимальная частота, которая может отражаться от ионосферы для данной трассы связи. Поэтому для обеспечения стабильной радиосвязи необходимо учитывать текущее состояние ионосферы и прогнозировать его изменения.

Современные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (ЕСА) и BeiDou (Китай), широко используются для определения местоположения и времени. Однако точность этих систем может существенно снижаться из-за влияния ионосферы на распространение радиосигналов [Афраймович и Перевалова 2006]. Когда радиосигнал от навигационного спутника проходит через ионосферу, его

скорость изменяется из-за взаимодействия с заряженными частицами (схематично проиллюстрировано на рисунке 7). Это приводит к задержке сигнала, которая зависит от концентрации электронов вдоль пути распространения и от частоты сигнала. Если эта задержка не учтена должным образом, возникает ошибка в определении расстояния до спутника, что приводит к ошибкам в определении местоположения.

Особую проблему для навигационных систем представляют ионосферные неоднородности и возмущения, возникающие во время геомагнитных бурь [Захаров и др. 2020]. В такие периоды обычные методы коррекции ионосферных ошибок могут оказаться недостаточно эффективными, что приводит к значительному снижению точности позиционирования. Наибольший вклад в полное электронное содержание (ПЭС – полное электронное содержание), которое определяет величину задержки навигационных сигналов, вносит плазма в ионосфере³.

Мониторинг ионосферы позволяет своевременно обнаруживать признаки неблагоприятной космической погоды и принимать меры по защите уязвимых технологических систем. Для этой цели используются средства наблюдения – ионозонды, магнитометры, риометры, а также специализированные космические аппараты.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

1. Наземное зондирование

Классическим методом изучения ионосферы является импульсное радиозондирование с помощью специальных

³ Ясюкевич Ю.В., Ясюкевич А.С. Взгляд на ионосферу Земли через GPS и ГЛОНАСС // Земля и Вселенная, 2020, № 4. С. 59–71.

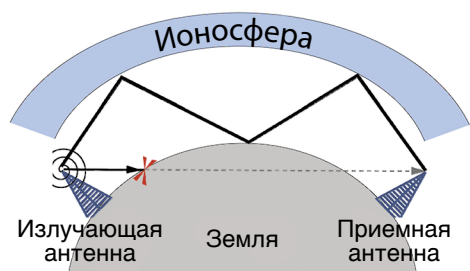


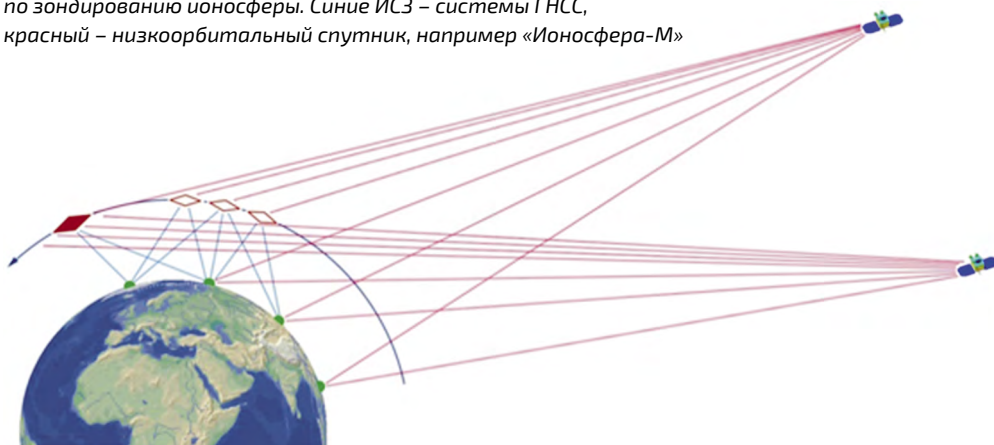
Рис. 7. Распространение радиосигнала на большие расстояния за счет множественных скачков между ионосферой и Землей

устройств – ионозондов. Принцип их работы достаточно прост: ионозонд излучает радиопульсы различных частот (обычно 1–20 МГц) вертикально вверх и регистрирует сигналы, отраженные от ионосферных слоев. По времени запаздывания отраженного сигнала определяется так называемая «действующая высота» отражения, а по критической частоте (максимальной частоте, при которой еще происходит отражение) можно рассчитать максимальную концентрацию электронов в слое. Наземные ионозонды позволяют изучать структуру нижней и средней ионосферы, но имеют суще-

ственное ограничение: они не могут получать информацию о распределении электронной концентрации выше максимума F2-слоя (внешняя ионосфера), поскольку радиоволны, направленные вверх, либо отражаются на частотах ниже критической, либо проходят вверх во внешние слои на частотах выше критической.

Другим важным наземным инструментом является радар некогерентного рассеяния – мощный радиолокатор, который регистрирует сигналы, рассеянные на тепловых флуктуациях ионосферной плазмы. Этот метод позволяет получить вертикальный профиль электронной концентрации до высот порядка 500 км, а также измерить температуру электронов и ионов, ионный состав и скорости дрейфа плазмы. Однако количество таких установок ограничено, обслуживание их в труднодоступных районах – сложная и трудоемкая задача, поэтому замена их на спутниковый мониторинг ионосферной плазмы в комплексе с наземными измерениями позволяют получить глобальную картину распределения приземной плазмы, что важно для решения практических и исследовательских задач (рис. 8).

Рис. 8. Схема проведения радиотомографических экспериментов по зондированию ионосферы. Синие ИСЗ – системы ГНСС, красный – низкоорбитальный спутник, например «Ионосфера-М»



Еще один метод исследования ионосферы – радиопросвечивание с использованием сигналов навигационных спутников. При прохождении через ионосферу радиосигналы от спутников ГНСС изменяют свои характеристики, что позволяет определить интегральное содержание электронов вдоль пути распространения – параметр ПЭС. Сеть наземных приемников ГНСС позволяет создавать карты распределения ПЭС и отслеживать их изменения во времени.

2. Спутниковые методы

Запуск ракет и искусственных спутников Земли открыл новую эру в исследовании ионосферы⁴. Спутниковые методы имеют ряд существенных преимуществ перед наземными: они обеспечивают глобальное покрытие, включая океаны и труднодоступные регионы, и позволяют исследовать верхнюю ионосферу, недоступную для наземных ионозондов.

Нужно заметить, что устойчивые орбиты спутников проходят существенно выше максимума плотности ионосферы (250–400 км) и локальными методами определить плотность ионосферной плазмы в этом максимуме и ее вариации крайне сложно. В этой связи особую роль играют дистанционные методы зондирования.

Одним из важнейших спутниковых методов является радиозондирование ионозондом, в общем, аналогичным наземному, при работе «сверху» (с околоземной орбиты) позволяет определить структуру ионосферы выше максимума F-слоя, где наблюдается плавный переход к магнитосфере/плазмосфере (такой прибор установлен на спутниках системы «Ионозонд-2025»).

⁴ Грингауз К.И., Серафимов К.Б., Шмеловский К.Г., Шмиллауэр К. Ионосферные исследования, выполненные на спутниках и ракетах, запущенных по программе «Интеркосмос». Под ред. Г.С. Нариманова. М.: Машиностроение, 1976. С. 21–47.

Также на спутниках можно принимать сигналы ГНСС и определять ПЭС как на лучах, приходящих от навигационных спутников «сверху», так и на лучах, проходящих через максимумы плотности ионосферы от спутников, видимых вблизи линии горизонта.

Еще один распространенный метод исследования ионосферных неоднородностей – прием на Земле сигналов радиомаяков с низкоорбитальных спутников [Падохин и др. 2025]. Используется прием двух когерентных частот (например, 150 и 400 МГц), так как при приеме только одной частоты сигнал содержит кроме изменений фазы, обусловленных прохождением сигнала спутника через ионосферу, также сдвиги фазы, вызванные движением самого космического аппарата.

3. Комплексный подход

Для полного понимания характеристик ионосферы необходимы комплексные исследования, сочетающие наземные и спутниковые методы наблюдений. Каждый метод имеет свои преимущества и ограничения, и только их совместное использование позволяет получить целостную картину состояния и динамики ионосферы.

Наземные ионозонды обеспечивают детальную информацию о нижних слоях ионосферы и их временных вариациях в конкретных географических точках. Радары некогерентного рассеяния дают наиболее полную информацию о локальных параметрах ионосферной плазмы. Спутниковые ионозонды исследуют верхнюю ионосферу, а сети приемников ГНСС предоставляют данные о глобальном распределении полного электронного содержания. Особенно важен комплексный мониторинг ионосферы во время геомагнитных возмущений, когда ее состояние быстро меняется и может существенно отличаться от спокойных условий.

4. Активные эксперименты

Интерес представляют также активные эксперименты, в которых производится управляемое воздействие на ионосферу Земли⁵. Наиболее действенными методами активного воздействия являются радиофизические средства: нагревные стенды [Гуревич 2007]

действуют с частицами радиационных поясов, вызывая их «стимулированные выпадения» в ионосферу (рис. 10). Это явление можно использовать как в фундаментальной науке, так и в прикладных задачах, например, чтобы уменьшить уровень радиации, воздействующей на космические аппараты.

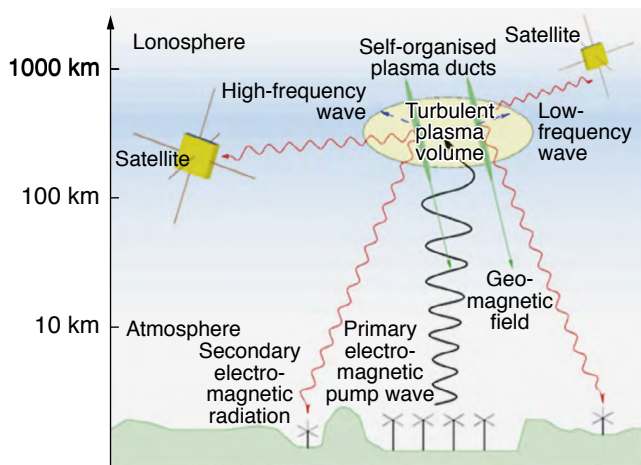


Рис. 9. Схема проведения активных экспериментов с использованием мощного коротковолнового излучения от нагревного стенда – специализированного передатчика с антенной, направленной вверх и формирующей относительно узкую диаграмму направленности излучения (с шириной ~ 30–50 км на уровне ионосферы)

и мощные наземные низкочастотные ОНЧ-передатчики [Молчанов 1985]. Взаимодействие мощного искусственного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой сопровождается появлением различного типа ионосферных неоднородностей в широком диапазоне временных и пространственных масштабов. В настоящее время функционируют (периодически) несколько коротковолновых нагревных стендов – EISCAT (Норвегия), Сура (Россия), HAARP (США) и сеть мощных ОНЧ-передатчиков (рис. 9). Искусственные низкочастотные радиоволны могут проникать в магнитосферу, где они взаимо-

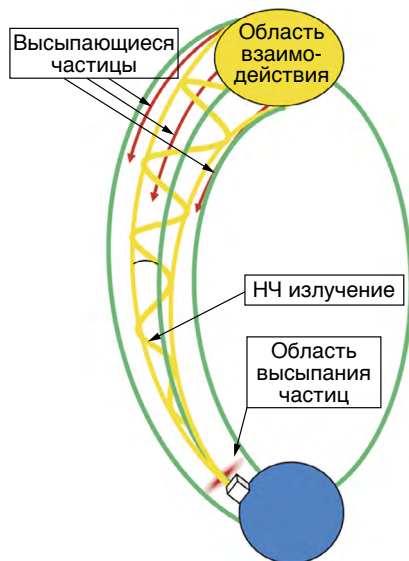


Рис. 10. Схематичное представление эксперимента по стимулированию выпадений частиц под действием искусственного низкочастотного излучения

⁵ Лавров Н.П., Зецер Ю.И. Активные эксперименты в ионосфере с использованием энергии радиоволн ВЧ диапазона. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2000. С. 11–30.

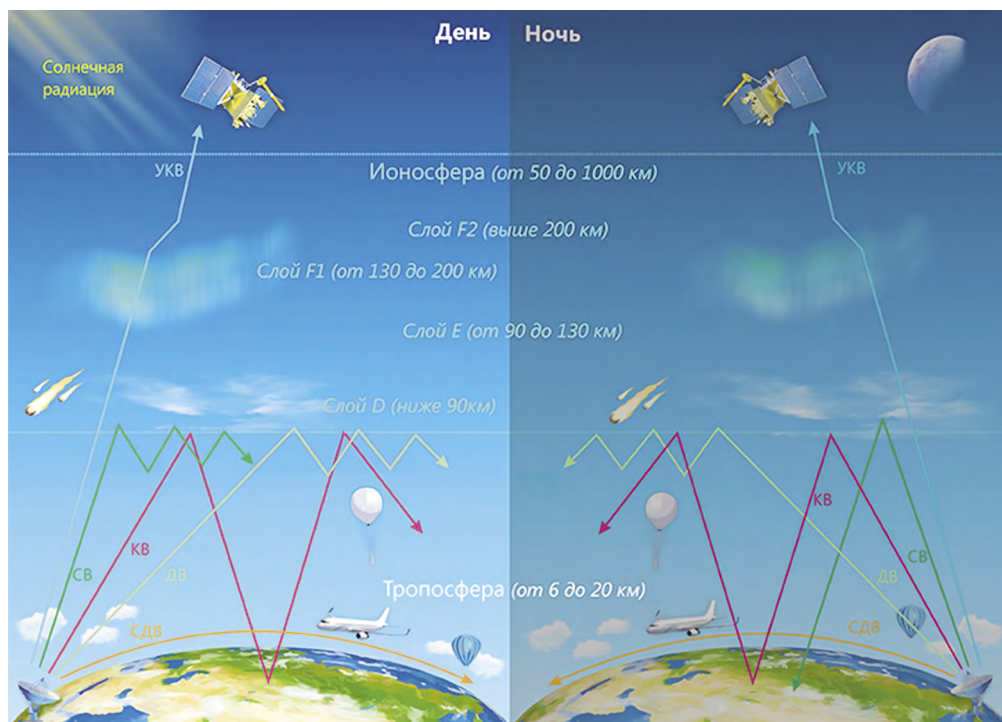


Рис. 11. Влияние ионосферы и суточной изменчивости ионосферы на радиосигналы различной длины волн

ДИНАМИКА ИОНОСФЕРЫ

1. Регулярные вариации

Состояние ионосферы постоянно меняется в зависимости от времени суток, сезона и уровня солнечной активности. Суточные вариации наиболее заметны. Поскольку главным источником ионизации является солнечное излучение, концентрация заряженных частиц на дневной стороне Земли значительно выше, чем на ночной. Ночью слой D практически исчезает, слой E также значительно ослабевает, слой F1 в ночное время обычно сливается с F2, образуя единый F-слой.

Сезонные изменения связаны с изменением угла падения солнечных лучей и продолжительности светового дня в разные времена года. В летнем полушарии ионизация обычно сильнее из-за

более интенсивного солнечного излучения. Кроме того, состав нейтральной атмосферы также меняется с сезоном, что влияет на скорость ионизации и рекомбинации заряженных частиц.

Долговременные вариации ионосферы в основном следуют 11-летнему циклу солнечной активности⁶. В годы максимума солнечного цикла интенсивность ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца возрастает, что приводит к более высокой степени ионизации в атмосфере. Это улучшает условия для дальней радиосвязи на высоких частотах, но также увеличивает вероятность ионосферных возмущений (рис. 11).

⁶ Обридо В.Н. Циклы солнечной активности // Земля и Вселенная, 2011, № 1. С. 12–24. Обридо В.Н., Наговицын Ю.А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. СПб.: ВВМ, 2017.

2. Влияние солнечной активности

Солнце является главным «дирижером» процессов в околоземном космическом пространстве, включая ионосферу. Наиболее драматичным проявлением солнечной активности являются солнечные вспышки – внезапные выбросы огромного количества энергии в атмосфере Солнца. Во время вспышек резко возрастает поток рентгеновского и ультрафиолетового излучения, которое вызывает внезапные ионосферные возмущения. Происходит быстрое увеличение электронной концентрации во всех слоях ионосферы освещенного полушария Земли. Особенно сильно растет ионизация в слоях D и E, где концентрация электронов может увеличиваться в несколько раз. В слое F рост концентрации более умеренный – около 10–30%.

Кроме электромагнитного излучения, солнечные вспышки могут сопровождаться выбросом высокоэнергичных заряженных частиц – солнечных космических лучей. Эти частицы, в основном протоны, могут вызывать дополнительную ионизацию в полярных областях ионосферы, что приводит к росту поглощения радиоволн в полярной шапке. Такое явление может длиться от нескольких часов до нескольких дней, серьезно нарушая радиосвязь в высоких широтах.

3. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие

Ионосфера не существует изолированно – она тесно связана с магнитосферой Земли через потоки заряженных частиц, электромагнитные поля и токи [Петрукович и др. 2015]. Особенно ярко эта связь проявляется во время геомагнитных бурь и суббурь. Энергичные заряженные частицы (электронов и ионы) магнитосферного происхождения высыпаются в ионосферу вдоль силовых линий магнитного поля, вызывая разнообразные эффекты (см. следующий раздел).

4. Воздействие атмосферных явлений

Ионосфера подвержена не только воздействию «сверху» (от Солнца и магнитосферы), но и «снизу» – от нижележащих слоев атмосферы. Атмосферные гравитационные волны (АГВ), планетарные волны и приливы могут распространяться вверх из тропосферы и стратосферы, достигая ионосферных высот. Эти волны вызывают вариации плотности, температуры и скорости нейтрального газа, что приводит к соответствующим изменениям параметров ионосферной плазмы. Взаимодействие нейтральных частиц и плазмы происходит посредством столкновений и обмена зарядами, которые достигают максимума на высотах 100–200 км, но остаются важными вплоть до высоты около 500 км. Эти процессы играют ключевую роль в передаче энергии и импульса от нейтральной атмосферы к ионосферной плазме и обратно. Особую роль играют АГВ, возникающие в авроральной области из-за локального нагрева атмосферы и усиления ионосферных токов во время геомагнитных возмущений. Эти волны распространяются к средним и низким широтам и вызывают характерные волнообразные вариации в ионосфере. Относительно мелкомасштабные АГВ быстро затухают по мере распространения, а крупномасштабные могут достигать экваториальных широт.

ШИРОТНАЯ СТРУКТУРА ИОНОСФЕРЫ И ЛОКАЛЬНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Характерные параметры и динамические характеристики ионосферы меняются в зависимости от геомагнитной широты. Можно выделить несколько областей, где поведение ионосферы имеет свои особенности:

- полярная область (полярная шапка);
- авроральная область;
- среднеширотная область;
- экваториальная область.

Особенности высокоширотной ионосферы определяются тем, что силовые линии геомагнитного поля в зонах вблизи полюсов выходят во внешнюю магнитосферу и даже межпланетное пространство. Оттуда в ионосферу вдоль линий магнитного поля из магнитосферы Земли выпадают электроны и ионы. Более того, во время полярной ночи (в отсутствие солнечного излучения) именно выпадения магнитосферных частиц определяют свойства ионосферы. В результате F-слой ионосферы в высоких широтах практически отсутствует, поскольку существенную роль соударения магнитосферных и ионосферных частиц начинают играть только на меньших высотах E-слоя. Таким образом, высокоширотная ионосфера является своеобразным экраном, на котором видны проявления солнечной и магнитосферной активности, динамика этой зоны наиболее достаточно сложная и для ее описания необходимы регулярные измерения.

Выделяют авроральную зону (геомагнитные широты 60–70°, также эту зону называют авроральным овалом), которая связана магнитным полем с внешней магнитосферой и в которой наиболее ярко проявления магнитных бурь и суббурь. Различного рода неоднородности и нестационарности, имеющиеся в магнитосферной плазме и в геомагнитном хвосте, проецируются в авроральную зону ионосферы посредством продольных электрических токов и выпадений частиц. Временные характеристики у этих процессов обычно составляют от десятков до сотен секунд, а их горизонтальный масштаб иногда изменяется от десятков метров до сотен километров. Эта динамика отражается в разнообразных формах полярных си-

яний – свечений верхней атмосферы, вызываемых электронами и ионами из магнитосферы. При этом спокойные и долгоживущие дуги и полосы, диффузное свечение больших участков ионосферы можно считать отражением стационарного неравновесного состояния ионосферной плазмы, а пульсирующие сияния представляют собой яркий пример нестационарного режима.

Геомагнитные бури возникают, когда возмущения в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле достигают магнитосферы Земли. Во время геомагнитных бурь высокоширотная ионосфера расширяется, и ее граница может опускаться до 40° широты.

Полярная шапка (выше 70–75° широты) соединена магнитным полем с солнечным ветром. Это, в целом, более спокойная зона, чем авроральная, но зато она более чувствительна к состоянию межпланетной среды, например, к всплескам солнечных космических лучей.

Конвекция плазмы под действием электрических полей магнитосферного происхождения в сочетании с ионизацией солнечным излучением и выпадениями формирует и собственную сложную структуру высокоширотной ионосферы. Здесь возникают различные образования: язык ионизации – вытянутая область с повышенной концентрацией электронов, которая переносится от дневной стороны к ночной под действием электродинамических потоков; полярные патчи – как бы «островки» ионизации, дрейфующие через полярную шапку; трансполярные дуги – вытянутые светящиеся структуры, пересекающие полярную область.

В зоне, расположенной экваториальнее аврорального овала, которая называется субавроральная область, на широтах около 55–60°, возникает узкая и мощная струя быстрого движения ионосферной плазмы – поляризационный джет (или SAID) [Гальперин и др. 1973].

Это явление сопровождается сильным электрическим полем, которое может достигать сотен милливольт на метр, и высокой скоростью потока плазмы – до 5 км/с. Такие условия вызывают нагрев ионов, изменение состава и плотности плазмы, а также появление красных сияний (SAR-дуг) и относительно нового оптического явления STEVE, которое проявляется как сине-фиолетовое свечение на небе.

Среднеширотная область характеризуется небольшими возмущениями и ее поведение наиболее предсказуемо. На средних широтах большинство крупномасштабных возмущений возникают из-за распространения сюда высокоширотных явлений. Между авроральной областью и средними широтами часто формируется главный ионосферный провал – область пониженной электронной концентрации.

В экваториальной области плотность электронов (степень ионизации) ионосферы максимальна из-за наиболее эффективного поглощения излучения Солнца. При этом максимумы плотности электронов образуются днем по обе стороны от геомагнитного экватора на широтах 10–20°. Это явление известно как экваториальная аномалия (другое название – геомагнитная аномалия или аномалия Эпплтона). Механизм образования этой аномалии связан с так называемым «фонтан-эффектом». В области геомагнитного экватора геомагнитное поле почти параллельное поверхности Земли и восточно-западная компонента электрического поля вызывают дрейф заряженных частиц в поперечном обоим полям направлении. В результате этого происходит вынос плазмы из района геомагнитного экватора, где ионизация максимальна, в области более высоких широт и возникает явление «фонтана» – плазма поднимается вверх в экваториальной области, постепенно поворачивается на север в северном полушарии (и на юг в южном).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Прогнозирование состояния ионосферы имеет большое практическое значение для обеспечения надежной работы систем радиосвязи, навигации и других технологий, зависящих от состояния околоземного космического пространства. Особенно важны прогнозы сильных ионосферных возмущений, связанных с геомагнитными бурями и солнечными вспышками⁷. Прогнозы, как правило, опираются, во-первых, на оперативные данные о солнечной и геомагнитной активности и, во-вторых – на модели ионосферы.

Современные модели ионосферы можно разделить на несколько категорий:

- эмпирические модели, основанные на статистическом анализе большого количества наблюдений и описывающие «среднее» состояние ионосферы в зависимости от времени суток, сезона, солнечной и геомагнитной активности;
- физические модели, основанные на решении уравнений, описывающих физические процессы в ионосфере (ионизация, рекомбинация, диффузия, электродинамические процессы и т.д.);
- ассимиляционные модели, сочетающие теоретические уравнения с реальными наблюдениями и корректирующие модельные расчеты на основе поступающих данных.

Наиболее известна стандартизированная эмпирическая модель IRI (International Reference Ionosphere – Международный эталон ионосферы), вполне удовлетворительно воспроизводящая среднеширотную ионосферу

⁷ Ишков В.Н. Воздействие солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство и возможность их прогноза // Сложные системы, 2012. № 4 (5). С. 21–41.

и основные долготные особенности распределения ионосферной плазмы, но не позволяющая адекватно описать ее вариации, особенно в высокоширотной и экваториальной зонах.

Ионосфера находится под постоянным воздействием природных и антропогенных факторов, параметры ионосферной плазмы постоянно варьируют, а характерные времена динамических внешних и внутренних воздействий различной природы, а также длительность релаксации после них, могут составлять от нескольких минут до нескольких суток. Поэтому ионосфера крайне редко достигает стационарного состояния, а ее пространственная структура характеризуется иерархией различных масштабов. Поэтому точный прогноз состояния ионосферы остается сложной задачей. Это связано как с недостаточным пониманием некоторых физических процессов, так и с ограниченностью данных наблюдений, особенно спутниковых измерений непосредственно в ионосферной плазме. Для детального изучения ионосферы требуются специализированные спутниковые миссии, состоящие из нескольких космических аппаратов, обеспечивающие непрерывное измерение различных параметров плазмы на ионосферных высотах и постоянный мониторинг состояния околоземного космического пространства.

ПРОЕКТ «ИОНОЗОНД»: ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ «ИОНОСФЕРА-М»

Российский проект «Ионозонд» нацелен на всестороннее исследование ионосферы Земли с помощью специализированных спутников серии «Ионосфера-М» (рис. 12). Первая пара спутников уже выведена на орбиту

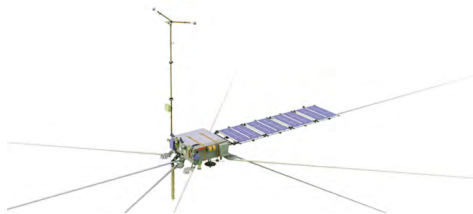


Рис. 12. Космический аппарат «Ионосфера-М» с раскрытыми элементами конструкции и антеннами (длинные – антенны ионозонда ЛАЭРТ), справа – панели солнечной батареи из четырех элементов. Вверх отходит штанга, на которой установлены электрическая и магнитная антенны диапазона ОНЧ, вниз направлена антенна прибора МАЯК. Рисунок госкорпорации «Роскосмос»

5 ноября 2024 г., а запуск второй пары запланирован во второй половине 2025 г. В данный момент это единственный работающий космический проект для исследований солнечно-земных связей и ближнего космоса.

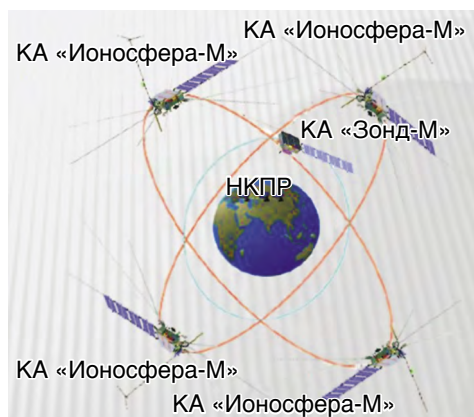
Космические аппараты этой системы изготовлены Научно-производственной корпорацией «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна (ВНИИЭМ, главный конструктор проекта Д.А. Силантьев), полезная нагрузка этих спутников создается в ИКИ РАН (главный конструктор комплекса целевой аппаратуры И.В. Козлов). Специально подобранные орбиты спутников, солнечно-синхронные на высоте около 820 км, выбраны таким образом, чтобы было возможно регистрировать состояние ионосферной плазмы и волновые явления на всех широтах. Одна из орбит находится в плоскости 3–15 часов местного времени, вторая – в плоскости 9–21 часов. На каждой из этих орбит будет работать по два космических аппарата, находящихся в противоположных частях орбит. После 2025 г. к четырем космическим аппа-

ратам «Ионосфера-М» присоединится «Зонд-М», который ориентирован непосредственно на изучение Солнца, его разработку ВНИИЭМ начало 2018 г. «Зонд-М» будет работать на орбите высотой 650 км по программе «Ионозонд», на нем установят 11 научных приборов. Схематическое изображение расположения двух пар космических аппаратов «Ионосфера-М» и «Зонд-М» на орбитах проиллюстрировано на рис. 13.

В рамках данного проекта решаются фундаментальные и прикладные задачи по мониторингу и диагностике структуры ионосферы и ее динамике, что имеет большое значение для понимания космической погоды, обеспечения надежной радиосвязи и навигации, а также для фундаментальной науки о взаимодействии солнечной активности с верхней атмосферой Земли. К основным задачам исследований относятся:

- мониторинг состояния ионосферы;
- контроль состояния магнитосферы;
- измерение волновой активности (электромагнитные, акустические волны);
- диагностика корпускулярных ионизирующих излучений;

Рис. 13. Схема расположения двух пар спутников «Ионосфера-М» на околоземных орбитах. Рисунок госкорпорации «Роскосмос»



– взаимодействие с наземными установками по искусственной модификации ионосферы.

Состав целевой аппаратуры космических аппаратов «Ионосфера-М» включает в себя две группы научных приборов для измерения параметров: ионосферы и электромагнитных излучений, магнитосферной плазмы и радиационных поясов Земли. Они оснащены также аппаратурой для сбора и передачи информации. Перечислим комплекс целевой аппаратуры.

Ионозонд ЛАЭРТ (главный конструктор С.А. Пулинец, ВНИИЭМ) зондирует ионосферу с околоземной орбиты и позволяет получить вертикальный профиль электронной концентрации выше максимума слоя F, что невозможно сделать с помощью ионозондов, расположенных на Земле. ЛАЭРТ может проводить измерения в двух режимах – пассивном и активном. В пассивном режиме прибор работает как радиоспектрометр в диапазоне частот 100 кГц – 20 МГц, который охватывает гирочастоту, плазменную частоту электронной составляющей, частоту верхнего гибридного резонанса и другие частоты характерных колебаний ионосферной плазмы. В активном режиме ЛАЭРТ работает как ионозонд и определяет вертикальный профиль плотности. На рис. 14 представлен пример такой ионограммы «внешнего зондирования», полученный 25 января 2025 г. космическим аппаратом «Ионосфера-М» № 1.

Прибор МАЯК (главный конструктор С.Е. Андреевский, ИЗМИРАН) является излучателем двух когерентных частот радиосигнала 150 и 400 МГц, т.е. частот, сформированных от одного задающего генератора. Сигналы этого прибора принимаются на сети наземных приемников и используются для восстановления двумерной картины распределения электронной

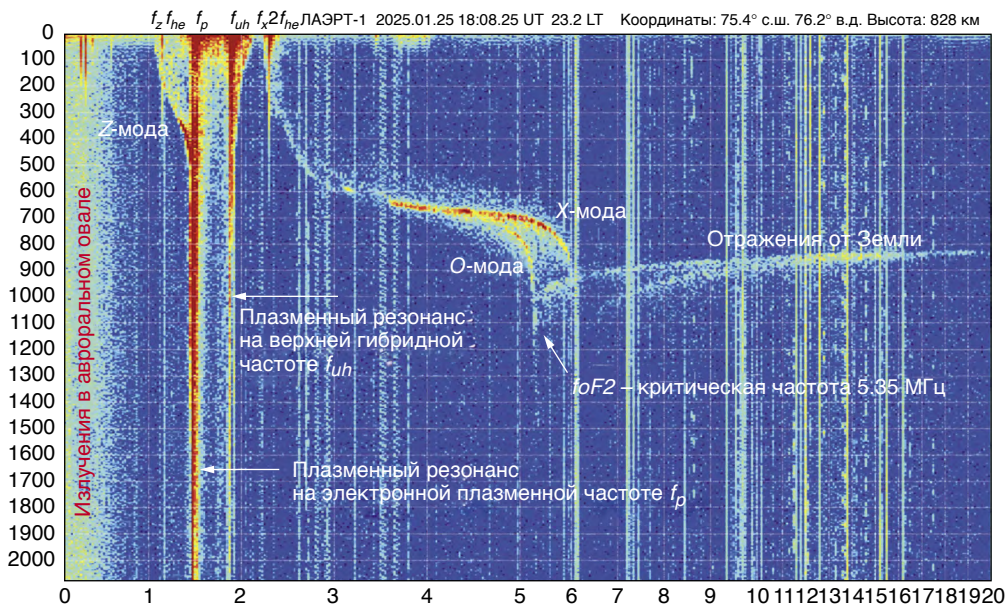


Рис. 14. Пример ионограммы внешнего зондирования, снятой ионозондом ЛАЭРТ на КА «Ионосфера-М» № 1. По вертикальной оси отложено эффективное расстояние от спутника до точки отражения сигнала, вычисленное из задержки между излученным импульсом и отраженным. По горизонтальной оси отложены частоты. Интенсивность излучения кодирована цветом. На рисунке отмечены основные параметры ионосферы, получаемые с помощью ионозонда: плазменные резонансы на локальной плазменной и верхней гибридной частотах, следы отражений от ионосферы обыкновенной и необыкновенной мод, критическая частота и следы отражения от поверхности Земли

составляющей в ионосфере методом низкоорбитальной радиотомографии.

Прибор ПЭС (главный конструктор С.Е. Андреевский, ИЗМИРАН) – это приемник сигналов спутниковых навигационных систем. Максимум диаграммы излучения антенны прибора направлен горизонтально, что позволяет принимать сигналы от навигационных спутников, находящихся вблизи горизонта, и проходящие через ионосферу. По рефракции этих сигналов восстанавливается вертикальное распределение ионосферной плазмы.

Волновой комплекс состоит из прибора НВК (главный конструктор С.Е. Андреевский, ИЗМИРАН), магнитного датчика МД (главный конструктор А.В. Поляков, НИРФИ ННГУ) и электрических датчиков ЭД (главный конструктор

П.П. Моисеев, НПП «Астрон электроника»). Он регистрирует магнитную и электрическую компоненты электромагнитного поля в низкочастотном диапазоне (1–20 кГц), где находятся циклотронные частоты основных ионосферных ионов, частота нижнего гибридного резонанса и другие частоты, которые характеризуют состояние плазмы. Пример результатов наблюдений, полученных с помощью комплекса, представлен на рис. 15.

Прибор СПЭР (главный конструктор А.А. Шемухин, НИИЯФ МГУ) – спектрометр плазмы и энергичных частиц, регистрирующий потоки заряженных частиц магнитосферного происхождения: электроны, протоны и альфа-частицы в широком диапазоне энергий от 0.1 кэВ до 160 МэВ.

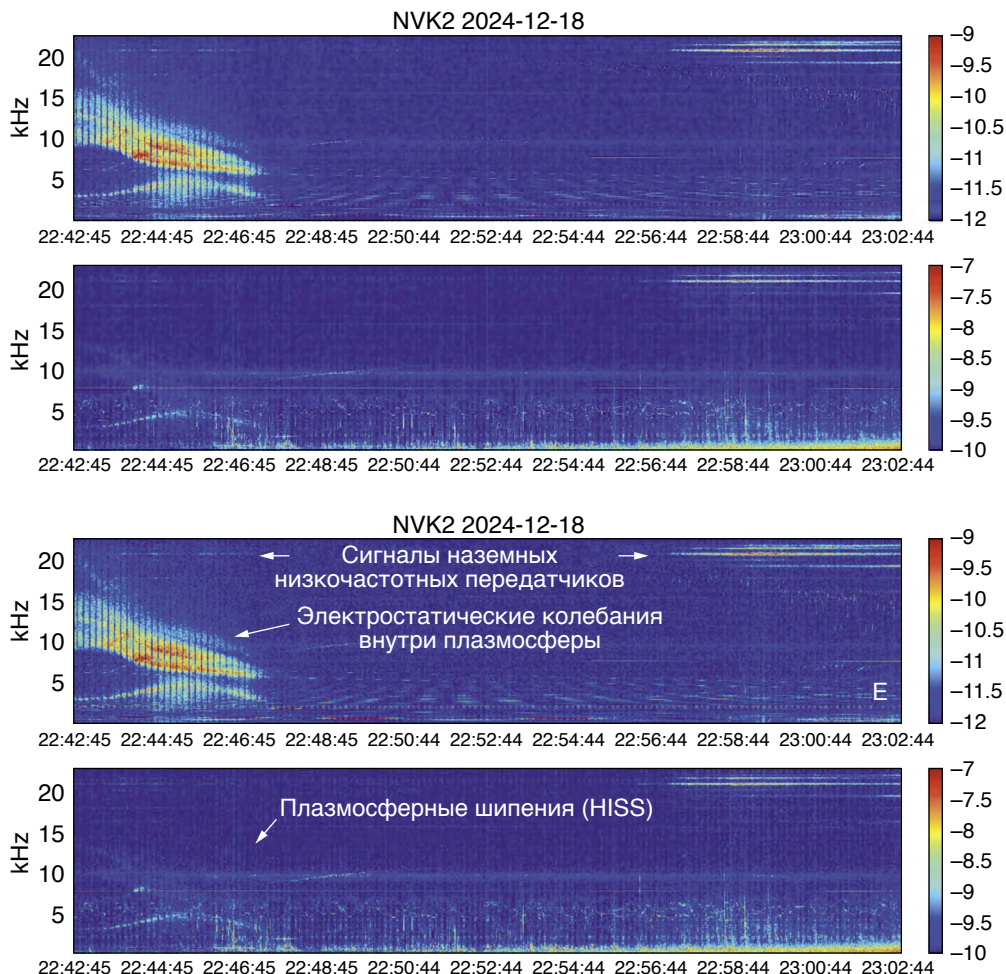


Рис. 15. Пример результатов измерений комплекса ОНЧ-передатчиков: сверху на спектрограммах А и Б представлены измерения электрической компоненты, внизу – магнитной. По вертикальной оси отложена частота принятого излучения в кГц, по горизонтальной оси – время. Амплитуда сигнала кодируется цветом (шкалы справа от спектрограмм). В интервалах времени 22:42:45–22:46:50 и 22:57:00–22:02:44 регистрируются сигналы наземных ОНЧ-передатчиков. Естественные электростатические колебания, вызванные частицами авроральной области, наблюдаются от начала измерений до 22:47:00. Плазмосферные шипения (или хиссы) на частотах вблизи 10 кГц наблюдаются как в Северном полушарии, так и в Южном

Прибор ГАЛС (главный конструктор В.С. Александров, ИПГ Росгидромета) – детектор галактических и солнечных космических лучей: электронов и протонов в диапазоне от 0.15 до 600 МэВ.

Прибор СГ (главный конструктор В.В. Богомолов, НИИЯФ МГУ) –

гамма-спектрометр для регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне 0.02–10 МэВ, включая солнечные вспышки и гамма-всплески.

Блок управления и передачи данных БКУСНИ (главный конструктор

К.В. Ануфрейчик, ИКИ РАН) связывает все измерительные приборы в единый комплекс, управляет режимами работы приборов, собирает результаты измерений отдельных приборов и транслирует информацию в телеметрическую систему для передачи на Землю.

Также на космических аппаратах «Ионосфера-М» № 3 и 4 будет установлен прибор «Озонометр-ТН» (Главный конструктор П.П. Моисеев, НПП «Астрон-Электроника» при участии ИКИ РАН), предназначенный для определения распределения озона в атмосфере.

Прием информации и результатов измерений с космических аппаратов проводится государственной системой космического мониторинга в составе Европейского, Сибирского и Дальневосточного центров НИЦ Росгидромета с участием ИКИ РАН. Управление спутниками в полете будет осуществлять Центр управления полетами ЦНИИмаш. Обработка и интерпретация полученной информации в интересах решения практических задач будут осуществляться «Центром валидации» ИПГ им. Е.К. Федорова. Проведение научных исследований с использованием результатов измерений на спутниках «Ионосфера-М» координирует ИКИ РАН.

Приборы, установленные на космических аппаратах «Ионосфера-М», охватывают измерения всех ключевых параметров, характеризующих или влияющих на ионосферную плазму. В наблюдениях будут принимать участие различные научные, образовательные учреждения Российской Федерации, имеющие наземные ионосферные станции, что обеспечит комплексный характер исследований.

Ионосфера – не просто «радиозеркало», это щит, который защищает нас и нашу планету от космических угроз. Ее изучение помогает не только улуч-

шить радиосвязь, предсказывать появление полярных сияний и повысить точность позиционирования навигационных спутниковых систем, но и понять, как устроено околоземное пространство, магнитосфера Земли, следить за солнечной активностью. Возможно, когда-нибудь в будущем мы научимся настраивать и управлять ионосферой. Но пока эта загадочная область ближайшего нам околоземного пространства продолжает бросать вызов человечеству, напоминая, что даже в эпоху интернета и высоких технологий природа хранит множество тайн. Создание специализированных космических программ, таких как российский проект «Ионозонд», дает нам возможность глубже проникнуть в эти тайны.

Литература

1. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: АН СССР, 1960.
2. Гальперин Ю.И., Понамарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури // Космические исследования, 1973. Т. 11. С. 284–296.
3. Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука, 1985.
4. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
5. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук, 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.
6. Зеленый Л.М., Веселовский И.С. Плазменная гелиогеофизика. М.: Физматлит, 2008.
7. Петрукович А.А., Могилевский М.М., Чернышов А.А. и др. Некоторые аспекты магнитосферно-ионосферных связей // Успехи физических наук, 2015. Т. 185, № 6. С. 649–654.
8. Падохин А.М., Чернышов А.А., Андреева Е.С. и др. Томографические методы исследования верхней атмосферы и околоземного космического пространства: современное состояние и перспективы развития // Космические исследования, 2025. Т. 63, № 3. С. 102–126.
9. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во НИ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
10. Захаров В.И., Чернышов А.А., Милох В., Джин Я. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 60, № 6, 2020.