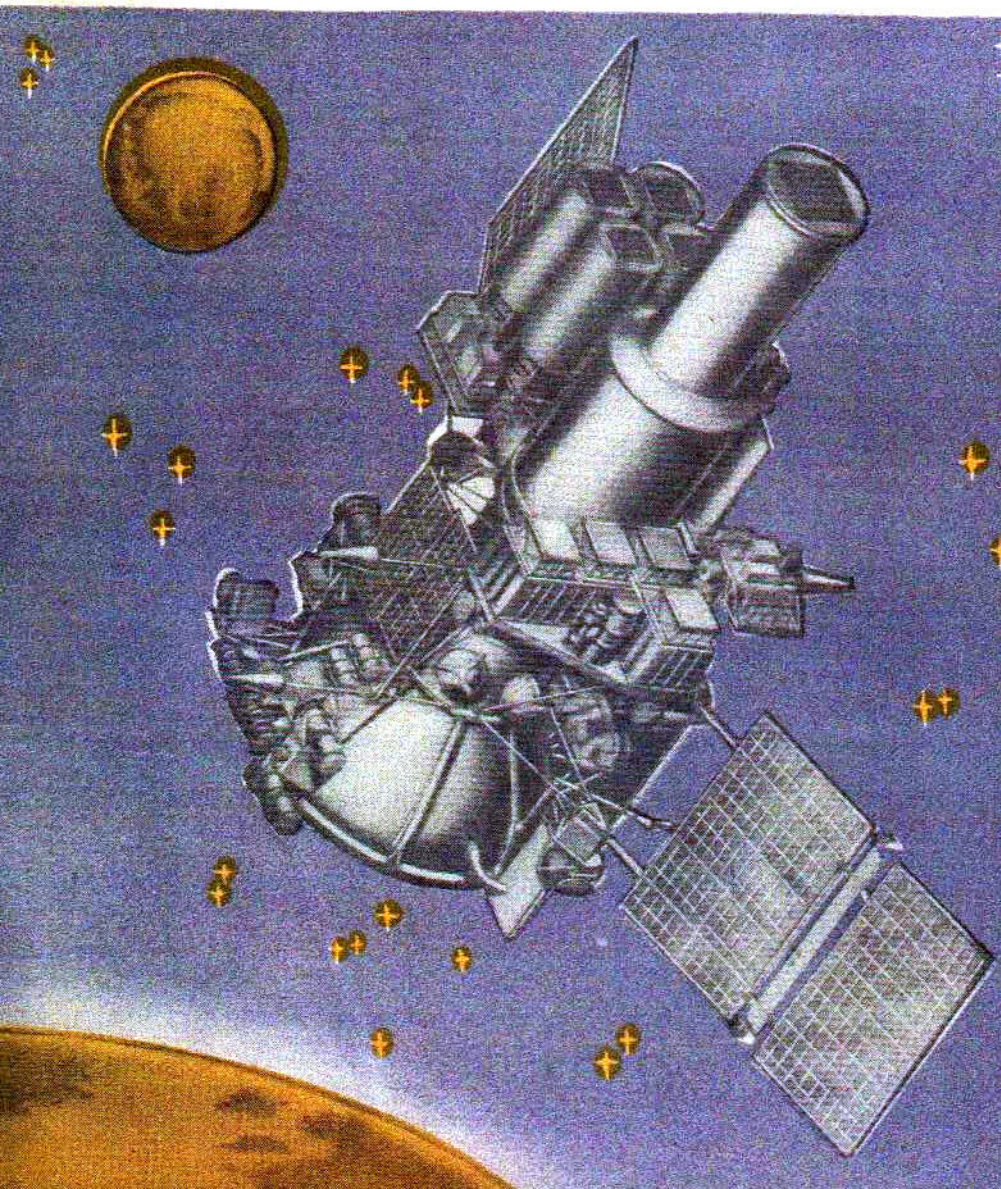


АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА



Аппаратура и методы исследования космического пространства. — М.: Наука, 1989. — 237 с.

ISBN 5-02-000040-X

В сборнике описана аппаратура для исследований в области физики космической плазмы, астрофизики высоких энергий, физики планет и планетных атмосфер. Научные приборы и комплексы, а также методы их разработки и испытаний в наземных лабораториях и на специальных стендах были созданы в самое последнее время для крупнейших международных проектов, осуществляемых на космической станции "Фобос" и астрофизическом модуле "Рентген" кинотируемой станции "Мир", а также для планируемого в самое ближайшее время запуска астрофизической обсерватории "Гранат". Значительная часть из них создается или уже работает впервые. Эта аппаратура создавалась ИКИ АН СССР совместно с другими институтами АН СССР и ведомственными организациями при участии разработчиков широкой международной кооперации.

Сборник обобщает богатый опыт научного космического приборостроения и рассчитан на научных и инженерно-технических работников специального и широкого профиля, а также студентов и аспирантов.

Instruments and methods for space studies. — М.: Nauka, 1989.

This book describes the instrumentation for studying space plasma physics, astrophysics of high energies, physics of planets and planetary atmospheres. Scientific instruments and systems as well as methods for their development and testing in ground-based laboratories with specially designed stands have been engineered in the last few years for the largest international projects: the PHOBOS space station, the RENTGEN astrophysical module on the MIR station, and the GRANAT astrophysical observatory planned to be launched in the immediate future. A major part of these instruments are now in the making or the operation for the first time. The Space Research Institute, USSR Academy of Sciences has generated the instrumentation in collaboration with other institutes of the USSR Academy of Sciences and state agencies with the participation of specialists from the countries involved in the wide international cooperation.

The book generalizes a wealth of experience in space instrument engineering; and scientists, engineers, research fellows and students will find authoritative accounts in the chapters with which they are most closely concerned.

Редакционная коллегия:

*В.М. Балабанов (отв. редактор),
Р.А. Соколов, Т.К. Бреус, Э.В. Воронцов*

Рецензенты:

*доктор физико-математических наук Н.П. Дамьякин,
доктор физико-математических наук профессор А.М. Гальпер*

А $\frac{3500000000-470}{055(02)-89}$ 738-89, кн. 2

© Институт космических исследований АН СССР, 1989

ISBN 5-02-000040-X

Т.К. Бреус¹, А.М. Крымский², Д.Я. Штерн³, М.Л. Элькин⁴

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА "ПЛАЗМА" В ПРОЕКТЕ "ФОБОС" И ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ МАРСА

1. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Задачей эксперимента "Плазма" является изучение глобального пространственного распределения высотных профилей электронной концентрации в ионосфере Марса в области над максимумом ионизации. Выявление свойств этой области, а именно присутствия на профилях электронной концентрации каких-либо особенностей, напоминающих резкий спад электронной концентрации, подобно тому, как это наблюдается в ионосфере Венеры и ионосфере Земли, выяснение природы этого спада может приблизить к пониманию физики взаимодействия планеты, имеющей слабое собственное магнитное поле и атмосферу, с солнечным ветром (СВ). Этот вопрос является особенно актуальным, поскольку Марс предположительно представляет собой пример промежуточного типа взаимодействия СВ с планетами, имеющий черты сходства взаимодействия СВ как с Землей, так и с Венерой, но и обладающего особенностями, характерными только для этой планеты.

Динамика поведения профилей электронной концентрации в верхней ионосфере Марса с изменением зенитного угла Солнца, динамического давления солнечного ветра, по данным статистически богатого материала, позволит построить эмпирические модели пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере Марса, определить высотные и широтные зависимости электронной концентрации для различных условий в солнечном ветре и выяснить характер и масштабы переноса плазмы из дневной ионосферы Марса в ночную, определить темп потерь плазмы через хвост его магнитосферы в межпланетное пространство, оценить величину потерь нейтральной атмосферы при взаимодействии ее с солнечным ветром.

Этот эксперимент позволит также уточнить свойства ночной ионосферы Марса и источники ее образования, о чем до настоящего времени имеются самые скудные представления, основанные на единичном профиле электронной концентрации, полученном радиозатменным методом. Метод радиолокационного зондирования ионосферы до настоящего времени применялся только у Земли. Планетный бортовой монозонд, установленный на КА "Фобос", предполагалось использовать впервые.

Проведение такого зондирования ионосферы Марса с орбиты Фобоса представляет определенные трудности, потребовавшие дополнительных разработок, специальных технических решений, отличающих марсианский монозонд от использовавшихся в экспериментах на околоземных орбитах.

¹ ИКИ АН СССР.

² Ростовский государственный университет.

³ СКБ ИРЭ АН СССР.

⁴ РКНИГА, г. Рига.

Преимущество использования радиолокационного зондирования ионосферы планеты перед другими методами состоит в том, что оно позволяет получить весь высотный профиль распределения концентрации тепловой плазмы в наиболее интересной с точки зрения взаимодействия планеты с СВ области — верхней ионосфере. Наиболее актуально и то обстоятельство, что $N_e(h)$ -профиль в верхней ионосфере можно получить практически одновременно с данными о свойствах СВ, измеряемых другой аппаратурой плазменного комплекса на орбите КА, и, таким образом, контролировать причинно-следственные физические связи и динамику поведения области взаимодействия при изменениях свойств СВ.

2. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И АКТУАЛЬНОСТЬ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

2.1. Состояние исследований

В настоящее время имеются сравнительно ограниченные сведения о верхней атмосфере (ионосфере) Марса и свойствах области его взаимодействия с солнечным ветром.

Перицентры орбит искусственных спутников "Марса-2,-3,-5" находились на высотах более 1000 км и на широтах $> 35^\circ$ с дневной стороны, и их орбиты не пересекали хвост ночной магнитосферы Марса, а только "касались" его или попадали в периферийные области [1].

Преимущество одновременных измерений на двух аппаратах ("Марс-2,-3"), позволяющее "отследить" реакцию магнитосферного магнитного поля на изменения межпланетного магнитного поля (ММП), не удалось реализовать (как, например, на "Венере-9, -10", установивших, таким образом, индукционную природу венерианской магнитосферы).

На американских аппаратах "Маринер-6, -7" и ИС "Маринер-9" вообще не было необходимых приборов плазменно-магнитного комплекса.

Ионосфера Марса изучалась радиозатменными методами, которые имеют низкую чувствительность по концентрации $\approx 10^3 \div 10^4 \text{ см}^{-3}$ [2]. В ночной ионосфере этим методом получен единственный довольно экзотический профиль — $N_e(h)$ ("Марс-4") с концентрацией $\approx 10^3 \text{ см}^{-3}$ вплоть до поверхности планеты и $N_{e \text{ max}} \approx 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Перепад значений электронной концентрации день—ночь в верхней ионосфере Марса составлял величину $\approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, сопоставимую со значением электронной концентрации в максимуме ионизации.

В то же время при получении высотных профилей электронной концентрации $N_e(h)$ радиозатменными методами из интегральных измерений содержания электронов вдоль пути распространения радиосигнала делается предположение о сферической симметрии свойств ионосферы. Как было показано в расчетах 1970–1972 гг. [3, 4], подобное предположение может приводить к значительным ошибкам, тем большим, чем меньше радиус планеты, горячее ее атмосфера и больше угол θ — плоскости орбиты аппарата с направлением Земли—планета. Ошибки особенно велики при $\theta > 20^\circ$. Для горячей и динамической верхней ионосферы Марса, имеющего меньший радиус, чем Земля, ошибки могли достигать порядка величины, поскольку углы наклона орбит "Марса-2" и "Маринера-9", с помощью ко-

торых был получен основной объем информации радиозатменными методами, составляли около 40 и 65° соответственно. По этой причине по радиозатменным профилям не удастся разрешить вопрос о существовании резкой верхней границы ионосферы в ионосфере Марса — типа венерианской ионопаузы или земной плазмопаузы.

При прямых измерениях на аппаратах "Викинг-1, -2" из двух полученных профилей такая граница, однако, на одном наблюдалась [5].

2.2. Актуальность проблемы

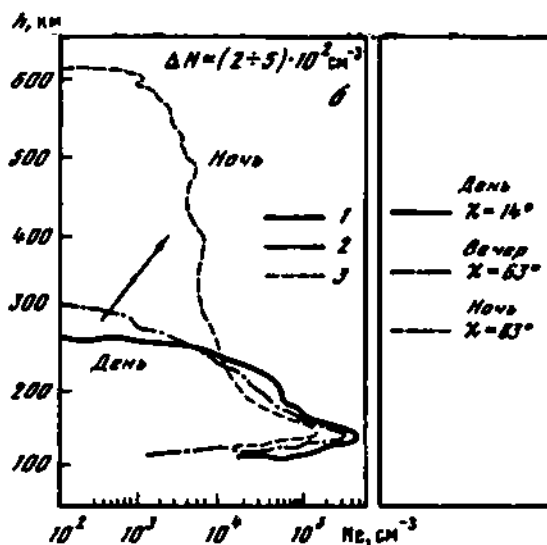
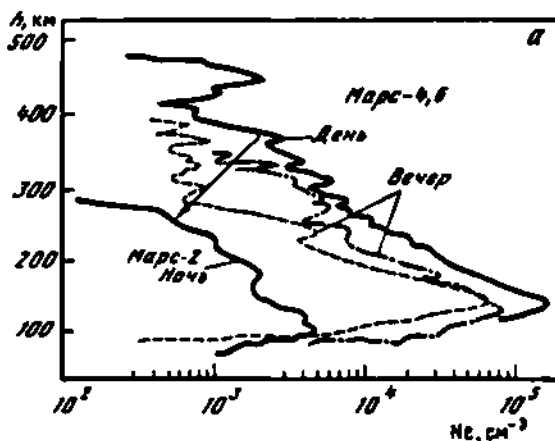
Факт наличия или отсутствия ионопаузы может играть важную роль в понимании характера и типа (венерианского или земного) взаимодействия СВ с планетой.

В незащищенной собственным магнитным полем ионосфере Венеры, например, высота ионопаузы и концентрация электронов в верхней ионосфере под ионопаузой возрастают в направлении от подсолнечной точки к терминатору вследствие ослабления на флангах динамического давления СВ (рисунок). В то же время земная верхняя ионосфера, так же как, по-видимому, и марсианская, ночью остывает и сжимается, электронная концентрация в ней убывает по сравнению с дневной ионосферой [1]. Земная ионопауза — плазмопауза имеет иную, чем у Венеры, природу. Следовательно, поведение электронной концентрации в верхней ионосфере Марса в зависимости от зенитного угла Солнца может дать информацию не только о природе и свойствах ионопаузы, но и о природе и свойствах магнитосферы Марса, величине вклада магнитного поля в картину взаимодействия планеты с солнечным ветром.

Величина и ориентация магнитного момента Марса, как уже отмечалось, до настоящего времени остаются неопределенными. По имеющимся экспериментальным данным очевидно только, что Марс обладает довольно слабым магнитным полем [6—8].

Граница марсианской магнитосферы, образованной собственным магнитным полем, как и у Земли, должна быть подвижной. На аппаратах "Марс-2, -3, -5", имевших высокие перисцентры, она регистрировалась на высотах 1200—1300 км. Сопоставление с данными по солнечному ветру показало, что эти положения границы соответствовали периодам, когда динамическое давление солнечного ветра имело значение ниже средней величины $\approx 0,4 \cdot 10^{-8}$ дин/см² [6, 8]. При изменении динамического давления СВ в 4 раза (т.е. до $1,68 \cdot 10^{-8}$ дин/см²) расстояние от планеты до границы препятствия тормозящего СВ, определяемой балансом давлений дипольного магнитного поля планеты и СВ, должно изменяться примерно на 25%, т.е. примерно на 1000 км, для Марса. При таких условиях граница магнитосферы — магнитопауза может проходить в области высот ≈ 300 км на дневной стороне планеты [9].

Как показывают сопоставления плотностей нейтральных верхних атмосфер Венеры и Марса, в области высот приблизительно 250—450 км [9] нейтральная атмосфера Марса сравнима или даже превосходит по плотности нейтральную атмосферу Венеры. Присутствие же нейтральной атмосферы в области взаимодействия с солнечным ветром, как показали исследования у немагнитной планеты Венеры [10, 11], играет важную роль как в фор-



Сопоставление $N_e(h)$ – профилей в ионосфере Марса (а) и Венеры (б) и их вариация в зависимости от земного угла Солнца

1 – день, $\chi = 14^\circ$; 2 – вечер, $\chi = 63^\circ$; 3 – ночь, $\chi = 83^\circ$

мирования особенностей характеристик переходной области, так и в свойствах верхней ионосферы, примыкающей к границе препятствия. Эффект нагружения СВ ионами, возникающими при процессах фотоионизации и перезарядки СВ с нейтральной атмосферой, приводит к увеличению отхода фронта ударной волны от планеты, дополнительному торможению плазмы в переходной области.

Образование достаточно протяженной области плазмы планетарного происхождения выше границы препятствия солнечному ветру, выносимой к терминатору вместе с потоком солнечного ветра, может быть причиной потери существенной части нейтральной атмосферы планеты. Очевидно,

что у Марса для определенных режимов в солнечном ветре [9] при высоких и средних динамических давлениях эффект нагружения может иметь те же самые последствия, что и у Венеры. Потери нейтральной атмосферы за счет взаимодействия СВ у Марса, однако, могут превосходить потери у Венеры. У Венеры скорости горизонтального переноса плазмы в ионосфере над терминатором ($\approx 2+3$ км/с) существенно меньше характерной скорости убегания из атмосферы (≈ 10 км/с). У Марса же скорость убегания составляет всего лишь 5 км/с, в то время как скорость градиентного переноса над терминатором плазмы при среднем динамическом давлении СВ (10^{-8} дин/см²), как показывают оценки, должны составлять величину ≈ 6 км/с, т.е. сопоставимую или даже превосходящую скорость убегания. Но в таком случае средняя величина потерь атмосферы Марса за счет выноса ее в хвост магнитосферы составляет $\approx 10^{23}$ частиц/с.

Таким образом, эрозия верхней атмосферы Марса под действием солнечного ветра может привести к тому, что современная атмосфера Марса, содержащая примерно $3 \cdot 10^{41}$ частиц, может быть потеряна планетой полностью за 10^8 лет. За геологическую историю планеты в результате такой эрозии могло быть потеряно примерно $\approx 10^{22}$ г · см⁻² кислорода, что сопоставимо с величиной потерь, например, азота за счет диссипации (≈ 75 г · см⁻²) и значительно превышает, по-видимому, потери атомарного кислорода, имеющего сверхтепловые скорости [12].

Следует подчеркнуть также, что превышение скорости горизонтального переноса плазмы в марсианской верхней ионосфере над скоростью убегания является необходимым условием развития гидродинамической турбулентности, способной существенно повлиять на характеристики потока плазмы у терминатора, а также на свойства ночной ионосферы. В частности, возрастание плазменной температуры, наблюдавшееся вблизи терминатора в пограничном слое на "Марсе-5", по-видимому, может быть связано с развитием в этой области турбулентности, которая может играть важную роль в процессах диссипации энергии при взаимодействии СВ с ионосферой планеты, оказывая влияние на ее свойства. Отсутствие ионопаузы у Марса на высотах 300–500 км или спорадическое ее существование на N_e (h)-профилях может быть связано также не только с эрозией ионосферы от СВ собственным магнитным полем, но и с размытием N_e (h)-профиля турбулентностью по крайней мере вблизи терминатора и ночью.

Напомним, что только статистически богатый материал исследований, полученных на "Пионер-Венере" за 9 лет работы аппарата, дал убедительные подтверждения открытого электронного источника ионизации в ночной ионосфере Венеры, на "Венере-9, -10" [13, 14] и дискутировавшегося в течение всех этих лет.

Следует подчеркнуть также, что данные наблюдения радиозатмений позволяют получить достаточно достоверную информацию только в области главного максимума ионизации и их чувствительность недостаточна для задачи исследования свойств верхней ионосферы Марса — области, наиболее интересной с точки зрения взаимодействия планеты с солнечным ветром.

В проекте "Фобос" предполагалось проводить радиолокационное зондирование ионосферы Марса с круговой орбиты спутника Фобос (дистанция 6000 км от поверхности планеты).

Основной объем информации об ионосфере должен был быть получен

этим методом из-за упомянутых выше особенностей орбиты и обычных ограничений радиозатменных методов. Сенсы радиозондирования, одновременные с работой аппаратуры плазменно-магнитного комплекса, без специальной переориентации аппарата, имеющего трехосную стабилизацию, могли проводиться в интервалах углов $\pm 30^\circ$ от линии Солнце—Марс с дневной и ночной стороны планеты. Некоторый объем информации, возможно, был получен над терминаторными районами со специальной переориентацией объекта.

3. ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОСОБЕННОСТИ ДЛЯ ПРОЕКТА "ФОБОС"

3.1. Методика эксперимента

В основе эксперимента лежат принципы классического импульсного ионозонда (ионосферной станции), которые с начала шестидесятых годов успешно использовались и в спутниковых экспериментах для исследования внешней (выше главного максимума) ионосферы Земли (Алузтт, ISIS, "Интеркосмос-19", "Космос-1809" [15,1]).

Методика эксперимента по исследованию внешней ионосферы Марса аналогична используемой для изучения земной ионосферы с помощью бортовых ионосферных станций, построенных по принципу импульсного радиолокатора. Антенна передающего устройства на КА "Фобос" излучает сигнал в виде радиопульса — зондирующий импульс. После окончания действия зондирующего импульса передатчик антенны переключается на вход приемно-регистрирующего устройства, также размещенного на борту спутника. Приемно-регистрирующее устройство в течение времени между зондирующими импульсами осуществляет прием отраженных от ионосферы зондирующих импульсов и обеспечивает измерение временной задержки τ , между излученным и принятым отраженным сигналами. Кроме того, на борту осуществляются измерения амплитуд отраженных импульсов. Данные о временной задержке и амплитуде отраженных сигналов кодируются для передачи по телеметрическому каналу на наземный приемный пункт.

Зондирование ионосферы производится на частотах в некотором диапазоне, соответствующем пределам возможных значений электронной концентрации. При этом несущая частота зондирующего радиосигнала изменяется дискретно. Приемное и передающее устройства перестраиваются с одной несущей частоты на другую, таким образом аппаратура радиозондирования измеряет величину временной задержки в зависимости от частоты $\tau_2(f)$. По величине временной задержки $\tau_2(f)$ непосредственно находится действующая дальность $h = c\tau_2(f)/2$ как функция частоты f , т.е. определяется высотнo-частотная характеристика-ионограмма.

На основе высотнo-частотных характеристик, полученных при различных положениях спутника на орбите, по известной методике, широко используемой для обработки данных земной ионосферы, находятся высотные профили электронной концентрации марсианской ионосферы. Из-за эффекта Фарадея возможны замирания амплитуды отраженного от ионосферы сигнала, что позволит судить о наличии магнитного поля.

В данном эксперименте исследования ионосферы Марса, учитывая тех-

нические возможности, ограничиваются интервалом измерений электронной концентрации от 400 до 10^5 см⁻³, что соответствует частотам заполнения зондирующего импульса в пределах от 180 до 2800 кГц. Это следует из известного соотношения, связывающего частоту радиосигнала с электронной концентрацией, при которой происходит отражение сигнала: $f = 10^3 \sqrt{80,8 N_e}$, где f — в Гц, N_e — в см⁻³.

В связи с тем, что не предполагалось осуществлять разделение необыкновенной и обыкновенной составляющих из-за малости магнитного поля Марса, особых требований к разрешению по времени принимаемых импульсов не предусматривалось.

Дискретность измерений электронной концентрации в ионосфере определяется шагом перестройки частоты излучаемого сигнала δf :

$$\delta N_e = \frac{2}{80,8 \cdot 10^6} f \delta f.$$

На частоте зондирования 180 кГц, что соответствует $N_e = 400$ см⁻³, при $\delta f = 12,5$ кГц $\delta N_e = 63$ см⁻³.

Такая дискретность измерений электронной концентрации в области резкого спада электронной концентрации (предполагаемой ионопаузы) достаточна для анализа процесса взаимодействия с солнечным ветром. Для изучения нижних слоев ионосферы Марса, где электронная концентрация больше, шаг перестройки по частоте может быть увеличен. Так, на частоте около 900 кГц ($N_e = 10^4$ см⁻³) при $\delta f = 50$ кГц $\delta N_e = 1,1 \cdot 10^3$ см⁻³. Частотные точки расположены по диапазону с таким относительным шагом, чтобы относительное разрешение по электронной концентрации было бы приблизительно постоянным во всем диапазоне. Всего в диапазоне частот 48 дискретных точек. Исходя из того, что толщина области резкого спада N_e до порядка величины и более (рис. 2) составляет примерно 100 км, точность определения высоты отражения над поверхностью Марса должна быть не хуже 20 км.

Эксперимент осуществляется во время нахождения космического аппарата на орбите спутника Марса. Выбор программы эксперимента определялся следующими обстоятельствами. Для выявления факта существования у Марса резкого спада N_e — верхней границы ионосферы, а также закономерностей ее поведения — необходим набор высотных профилей высотной концентрации при различных зенитных углах Солнца и временах суток.

Для того чтобы физические условия, при которых будет получен этот набор профилей, были приблизительно одинаковы, время проведения эксперимента в целом должно быть как можно меньше.

Учитывая вышесказанное, а также возможности бортового запоминающего устройства (ЗУ) и системы телеметрии, предложена программа эксперимента, при которой в течение одного витка КА проводится 6–12 сеансов длительностью 5–8 мин. За месяц измерений может быть получено 60–100 $N_e(h)$ -профилей.

3.2. Энергетический потенциал

Основная особенность зондирования ионосферы Марса с КА "Фобос" — большая высота аппарата над ионосферой (максимальная дальность зондирования в околоземных спутниковых ионозондах не превышала 2000 км). Высота орбиты КА "Фобос" над ионосферой составляет приблизительно 6000 км. При внешнем радиозондировании отражающий плазменный слой представляет собой выпуклую поверхность, при отражении от которой угол расхождения лучевого пучка увеличивается, что приводит к ослаблению принимаемого сигнала по сравнению с отражением от плоской поверхности. Выпуклая поверхность как бы увеличивает дальность до отражателя по сравнению с фактической. Из простых геометрических соображений можно найти коэффициент эквивалентного увеличения дальности K в зависимости от отношения фактической дальности H_0 и радиуса кривизны поверхности отражения r [17]:

$$K = 1 + H_0/r. \quad (1)$$

При зондировании ионосферы Марса с орбиты спутника с марсоцентрическим расстоянием около 9 тыс.км и $r = 3,4$ км, $K = 2,76$ эквивалентная дальность $H_s = H_0 K$ будет достигать 16,5 тыс.км.

Таким образом, по сравнению с околоземными спутниковыми ионозондами в марсианском ионозонде должна обеспечиваться возможность зондирования с дистанцией на порядок большей. При этом ослабление сигнала на трассе зондирования увеличится на два порядка. Следовательно, отношение излучаемой мощности к чувствительности приемного канала должно на эти же два порядка превышать достигнутое в околоземных спутниковых ионозондах.

Излучаемая мощность определяется мощностью выходных каскадов передатчика и потерями в передающем тракте (потери на излучение). Чувствительность приемного канала определяется собственно чувствительностью приемника — уровнем шумов на его выходе и возможностями обнаружения (регистрации) полезных сигналов на фоне этих шумов. В самом деле, уравнение, связывающее эквивалентную дальность (H_s) с мощностью передатчика (P_t) и мощностью отраженного сигнала на входе приемника (P_r) в предположении зеркального отражения от плазменного слоя, имеет вид

$$P_r = \frac{P_t L_t}{4\pi(2H_s)^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} L_r \quad (2)$$

где L_t — множитель потерь при излучении, λ — длина волны зондирующего сигнала, L_r — множитель, включающий поляризационные потери (потери за счет расщепления на обыкновенную и необыкновенную компоненты) и влияние диаграммы направленности антенны.

Минимальная мощность отраженного сигнала будет соответствовать чувствительности приемника:

$$P_{r,\min} = SkT\Delta f, \quad (3)$$

где S — пороговое отношение сигнал/шум, T — эквивалентная температура

входа приемника, k — постоянная Больцмана, Δf — полоса частот приемника.

Из приведенных соотношений ясно, что при сохранении других параметров мощность передатчика должна увеличиваться пропорционально квадрату дальности действия. Очевидно, что достижение требуемой дальности путем увеличения импульсной мощности передатчика неприемлемо, так как для этого мощность должна была бы составлять десятки киловатт. Необходимы были другие технические решения, которые позволили бы обойтись без чрезмерного увеличения мощности передатчика, а именно: резонансное согласование антенной цепи во всем диапазоне частот зондирования, использование сложного зондирующего сигнала с фазокодовой модуляцией, компьютерная обработка, накопление сигнала [16–18]. При этом в зависимости от номера дискретной точки предусмотрено 64 или 32 накопления последовательных посылок.

3.3. Точность измерений

Потенциальная среднеквадратическая погрешность измерения дальности зависит от длительности зондирующего импульса, в данном случае от длительности элемента кода τ_n , и от отношения сигнал/шум S , полученного в результате "сжатия" сложного сигнала и его накопления:

$$\sigma = \tau_n c / (2\xi\sqrt{S}),$$

где ξ — коэффициент, обычно в пределах 1–1,5, определяемый формой частотной характеристики приемного тракта.

Оценка показывает, что на нижней частоте зондирования 182 кГц при $\tau_n = 1,3$ мс и температуре галактических шумов $T = 10^3$ К погрешность δ составит примерно 13 км.

Дополнительную погрешность — ошибку квантования — вносит дискретная обработка сигналов:

$$\Delta = rbc / (2\sqrt{12}).$$

При $r_b = 1/4\tau_n \approx 0,33$ мс ошибка квантования $\Delta = 14$ км. Полная погрешность измерений $\sigma_n = \sqrt{\sigma^2 + \Delta^2}$ составит, таким образом, около 20 км.

Значительное уменьшение ошибки квантования может дать использование в процедуре обработки метода статистических испытаний [19], известного в вычислительной математике как метод Монте-Карло, при котором запаздывание эхо-сигнала τ_2 определяется как среднее арифметическое независимых n измерений $\tau_2 = \xi \tau_1 / n$, где в нашем случае максимальное значение $n = 64$ или 32.

Принципиальная возможность применения этого метода состоит в том, что принимаемый сигнал РЛК существенно "рандомизирован", так как отношение сигнал/шум S_1 в каждой посылке после операции "сжатия" невелико и по оценке составит 2–2,5.

Полная погрешность измерений в первом приближении в этом случае

$$\sigma_n \approx \sqrt{\left(\frac{\tau_n c}{2\xi\sqrt{S_1 n}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_n c}{8\sqrt{\xi n}}\right)^2}.$$

и с учетом $\xi\sqrt{S_i} < 8\sqrt{3}$

$$\sigma_n = \frac{r_n c}{2\xi\sqrt{S_{in}}} .$$

Ожидаемое значение погрешности измерений дальности с учетом вышесказанного может быть доведено до 13 км.

3.4. Влияние движения КА на измеряемую величину электронной концентрации

Скорость движения проекции КА по поверхности Марса в проекте "Фобос" будет составлять 0,75 км/с. Смещение подспутниковой точки за период снятия одной монограммы (213 с)¹ составит 160 км. Смещение этой точки за время измерения на одной частоте, т.е. расстояние, на котором усредняются данные измерений электронной концентрации: в нижней части диапазона — 5 км, в верхней — 2,5 км. При этом радиус пятна (зоны Френеля), участвующего в формировании отраженного сигнала, с учетом выпуклости отражателя составляет: на нижней частоте — 180 кГц — 29 км, на верхней частоте — 2,7 МГц — 7,5 км. Приведенные величины смещения подспутниковой точки и радиуса пятна позволяют оценить масштабы пространственного усреднения по горизонтали на каждой частоте порядка 60 км в нижней части диапазона и порядка 15–20 км — в верхней. Отметим, что рассчитанный по полученным монограммам вертикальный профиль концентрации электронов при наличии горизонтальных градиентов может быть несколько деформирован за счет указанного выше смещения пятна, однако влияние горизонтальных неоднородностей ионосферы на полученный профиль, по-видимому, будет существенно менее значительным, чем в радиозатменных экспериментах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, имеется принципиальная возможность при радиолокационном зондировании ионосферы Марса с больших дистанций (орбиты Фобоса) получить высотные профили электронной концентрации в требуемом диапазоне значений N_e и с разрешением, достаточным для обнаружения резкого спада N_e в ионосфере, соответствующего его верхней границе, если таковая существует. Детальное описание технической реализации аппаратуры РЛК и ее особенностей в режиме "Плазма" приведено в следующей статье настоящего сборника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреус Т.К., Грингуз К.И. О природе препятствий, тормозящих СВ вблизи Венеры и Марса, и об особенностях взаимодействия СВ с ионосферой этих планет // Космич. исслед. 1980. Т. 18, вып. 4. С. 587.
2. Васильев М.Б., Вышлов А.С. и др. Предварительные результаты эксперимента по двухчастотному радиопросвечиванию на спутниках Марса // Там же. 1975. Т. 13.

¹ См. статью Н.А. Армаид, Т.К. Бреус и др. «Особенности ионосферной станции КА "Фобос"» в настоящем сборнике.

3. McCormick P.T., Whitten R.C. // Planet. and Space Sci. 1972. Vol. 20. P. 822.
4. Ferraglia J., Gross S.H. // Ibid. 1970. Vol. 18. P. 1760.
5. Hanson W.B., Savelani S., Zuccaro D.R. // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 28. P. 4351.
6. Dolginov Sh.Sh. // Geophys. Res. Lett. 1978. Vol. 5, N 1. P. 89-92.
7. Dolginov Sh.Sh. et al. Magnetic field and plasma inside and outside of the martian magnetosphere // Solar Wind interaction with the planet Mercury, Venus, Mars, SP-397. 1976. Wash. (D.C.): NASA, 1982. P. 1-20.
8. Slavin J.A., Holzer R.E. // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87, P. 10285-10296.
9. Бреус Т.К., Крымский А.М. Эффект нагружения солнечного ветра при взаимодействии с Венерой и Марсом: Препр. ИКИ АН СССР №1275. М., 1987.
10. Бреус Т.К. // Adv. Space Res. 1986. Vol. 6, N 1. P. 167-177.
11. Бреус Т.К., Крымский А.М., Митницкий В.Я. // Космич. исслед. 1987. Т. 25, вып. 1. С. 124-133.
12. Мороз В.И. Физика планеты Марс. М.: Наука, 1978.
13. Гринявуз К.И., Веригин М.И., Бреус Т.К., Гомбоши Т. // ДАН СССР. 1977. Т. 232. С. 1039-1042.
14. Knudsen W.C., Kibore A.J., Whitten R.C. // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 13381-13399.
15. Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1980. 305 с.
16. Бреус Т.К., Штерн Д.Я., Элькин М.Л. Основные принципы построения бортовой аппаратуры радиозондирования плазменных оболочек планет // Научная аппаратура для космических исследований М.: Наука, 1987. С. 27.
17. Науменко И.И., Штерн Д.Я., Элькин М.Л. О применении сложных сигналов при радиозондировании околопланетной плазмы // Научная аппаратура для космических исследований. М.: Наука, 1987. С. 34.
18. Кольвах С.В., Элькин М.Л. О согласовании приемника бортовой аппаратуры планетного ионозонда с короткой антенной // Там же. С. 41.
19. Горбунов Ю.И. Цифровые методы дальнометрии в импульсных обзорных радиолокаторах // Автометрия. 1988. № 2.

УДК 621.396.967:629.78

Н.А. Арманд¹, Т.К. Бреус², Д.Я. Штерн³,
С.В. Кольвах⁴, А.П. Местэртон⁵, М.Л. Элькин⁶

ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ФОБОС"

ВВЕДЕНИЕ

В состав научного радиолокационного комплекса (РЛК) космического аппарата (КА) "Фобос" входила ионосферная станция — ионозонд. Высокая орбита КА, малая длина вибраторов антенны, определяемая динамическими и массовыми характеристиками КА, необходимость сжатия информационного потока потребовали нетрадиционного подхода в построении аппаратуры ионозонда, ряд особенностей которого изложен в статье Т.К. Бреус, А.М. Крымского, Д.Я. Штерна, М.Л. Элькина в настоящем сборнике.

¹ ИФЗ АН СССР.

² ИКИ АН СССР.

³ СКБ ИФЗ АН СССР.

⁴ Ростовский государственный университет.

⁶ РКНИГА, г. Рыга.