

УДК 523

## ПРИМЕНЕНИЕ РАДАРА ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРЫ МАРСА И ЕЁ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

© 2018 г. В. М. Смирнов\*, О. В. Юшкова, В. Н. Марчук

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

\*vsmirnov@ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2016 г.

Рассмотрены возможности радара подповерхностного зондирования грунта Марса для определения структуры окружающей его плазменной оболочки. На основе результатов численного моделирования и реальных данных зондирования грунта показано, что применяемый для исследования грунта режим работы радиолокационного радара MARSIS может быть использован для диагностики строения ионосферы исследуемой планеты. При прохождении излучаемых сигналов до поверхности планеты возможно использование отраженных сигналов для оценки полного электронного содержания ионосферы Марса вдоль трассы полета космического аппарата.

DOI: 10.7868/S0023420618030020

### ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2003 г. аппарат *Mars-Express* Европейского космического агентства вышел на орбиту Марса. На его борту был установлен радар MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding) [1]. Работа радара предусмотрена в трех режимах: в режиме подповерхностного зондирования SS (Subsurface Sounder), который предназначен для исследования верхнего слоя грунта во время полета аппарата над поверхностью планеты в ночные часы; в режиме активного ионосферного зондирования AIS (Active Ionospheric Sounder) — для изучения ионосферы в дневные часы; и в режиме пассивной локации — для регистрации электромагнитных космических шумов в частотном диапазоне работы приемника. Несмотря на то, что первые попытки радиолокационного исследования грунта с орбитального аппарата были выполнены в 1972 г. [2], *Mars-Express* стал первым космическим носителем, на котором работал специализированный подповерхностный радар орбитального базирования. Анализ результатов измерений радара MARSIS в режиме SS показал, что дополнительно к основной задаче — изучению диэлектрических свойств и строения грунта — подповерхностный радар позволяет исследовать ионосферу планеты в ночные и сумеречные часы.

До недавнего времени информация об ионосфере Марса базировалась на результатах интерпретации радиозатменных экспериментов, в которых оценивается средняя электронная плотность ионосферы

при прохождении через нее трассы прямой видимости между Землей и космическим аппаратом, находящимся на орбите Марса ([3–4]). После 2005 г. эти данные пополнились радиолокационными измерениями радара MARSIS [5]. Совокупность имеющейся информации позволяет получить хорошее представление о дневной ионосфере. Данные о ночной, утренней и вечерней (сумеречной) ионосфере получены на основе анализа единичных экспериментов, которые не дают полного понимания суточных вариаций высотного профиля электронной концентрации. В данной работе обсуждается возможность использования радара подповерхностного зондирования для исследования ионосферы планеты в сумеречные часы. На основе сопоставления результатов численного моделирования распространения радиосигнала по трассе “ионосфера – грунт – ионосфера” и анализа экспериментальных данных радара MARSIS в режиме SS показан способ определения критической частоты ионосферы и обнаружения неоднородных образований. Предложен метод оценки полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Сформулированные выводы подтверждаются результатами обработки измерений радара MARSIS по трассе 1855 (26.VI.2005 г.)

### 1. ЦИКЛОГРАММА РАБОТЫ РАДАРА MARSIS

Орбитальный аппарат *Mars-Express* вращается по эллиптической орбите с перигеем 300 км и апогеем 1300 км. В зависимости от режима работы радар MARSIS работает либо по циклограмме зонди-

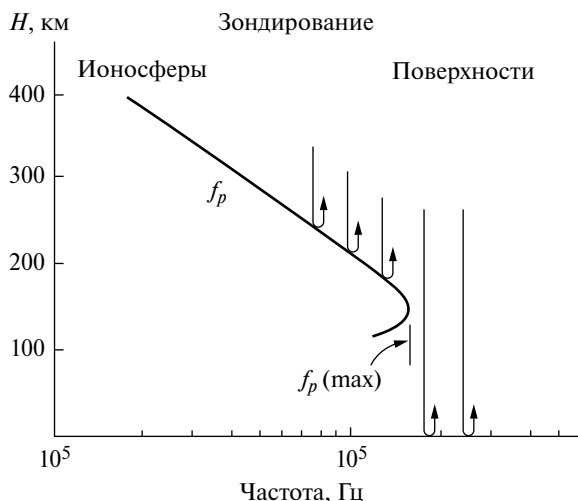


Рис. 1. Схема зондирования ионосферы и грунта планеты Марса с орбиты космического аппарата.

рования грунта (режим зондирования грунта SS) Марса, либо его ионосферы (режим зондирования ионосферы AIS). Схема такого зондирования представлена на рис. 1. В зависимости от частоты излучаемого сигнала происходит либо зондирование ионосферы, либо грунта планеты.

В режиме AIS радар MARSIS работает как ионозонд и используется для исследования верхней ионосферы Марса. Для зондирования ионосферы в диапазоне от 0.1 МГц до 5.5 МГц пошагово излучаются 160 частот с квазилогарифмическим разном их номинального значения ( $\Delta f/f \approx 2\%$ ). Минимальный шаг по частоте составляет 10.937 кГц.

Первые обработанные данные, полученные по результатам работы радара MARSIS в режиме активного зондирования верхней ионосферы Марса, до высоты её максимума, были опубликованы в [5]. Радар MARSIS в режиме AIS не даёт никакой информации ни о состоянии нижней ионосферы, ни об её локальных неоднородностях ниже

максимума электронной концентрации из-за особенностей зондирования плазменной оболочки — радиоволны, частота которых ниже критической частоты слоя ионосферы полностью отражаются от него. График изменения плазменной частоты ионосферы Марса в зависимости от зенитного угла Солнца, составленный по результатам измерений радара MARSIS в 2005 г., приведён на рис. 2 [5]. Эти результаты позволяют определить частоты, на которых необходимо проводить зондирование грунта планеты в зависимости от зенитного угла Солнца (времени суток).

В режиме SS радар MARSIS работает на частотах от 1.3 до 5.5 МГц. Частотная полоса разделена на четыре диапазона. В каждом диапазоне излучается сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигнал). Во время эксперимента попеременно могут излучаться сигналы двух диапазонов. Основные параметры радара MARSIS для режима SS приведены в [1]. Радар может излучать и принимать сигнал в четырёх частотных диапазонах с центральными частотами 1.8; 3; 4 и 5 МГц. Девиация частоты для каждого диапазона — 1 МГц.

Согласно приведенным на рис. 2 данным, радар MARSIS в режиме зондирования грунта может работать при определенных зенитных углах Солнца. Если ионосфера имеет критическую частоту ниже частотного диапазона радара, сигнал, после взаимодействия с плазмой, достигает поверхности Марса. Часть сигнала рассеивается поверхностью грунта района проведения эксперимента, часть проникает в грунт и распространяется в нем со скоростью, пропорциональной диэлектрической проницаемости основной породы грунта, отражаясь от встречающихся диэлектрических неоднородностей. Отраженный от поверхности и принятый на борту КА сигнал несет в себе информацию об объектах отражения и диэлектрических особенностях среды распространения, в том числе и об ионосфере.

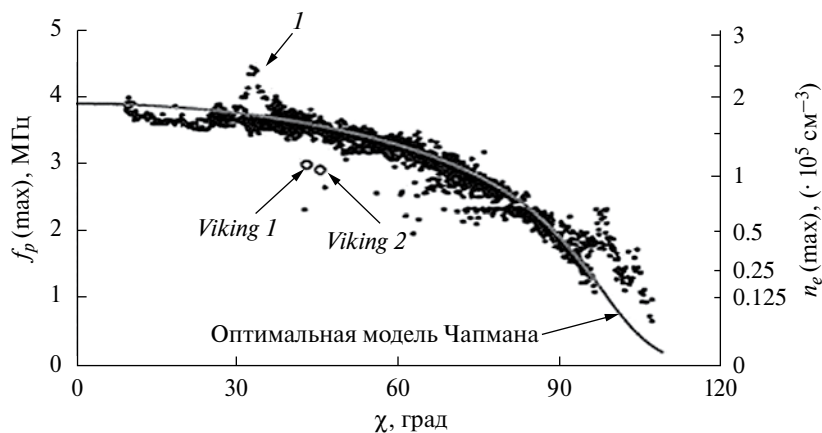
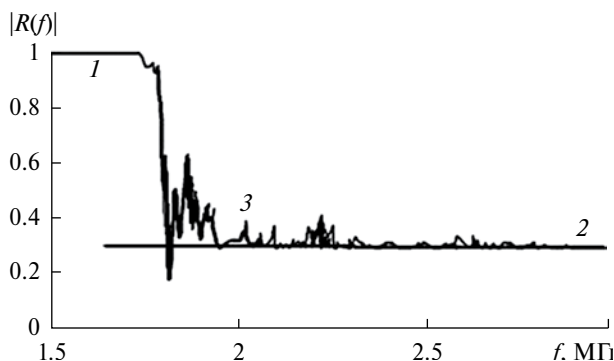


Рис. 2. График зависимости плазменной частоты ионосферы Марса в зависимости от зенитного угла Солнца [5]. 1 — солнечная вспышка, класс XI, 15.IX.2005 г., 08.30 UT.



**Рис. 3.** Частотная зависимость модуля коэффициента отражения радиоволн от системы сред “ионосфера-грунт”, зенитный угол Солнца 96°: 1 – отражение от ионосферы, 2 – отражение от грунта, 3 – влияние ионосферы.

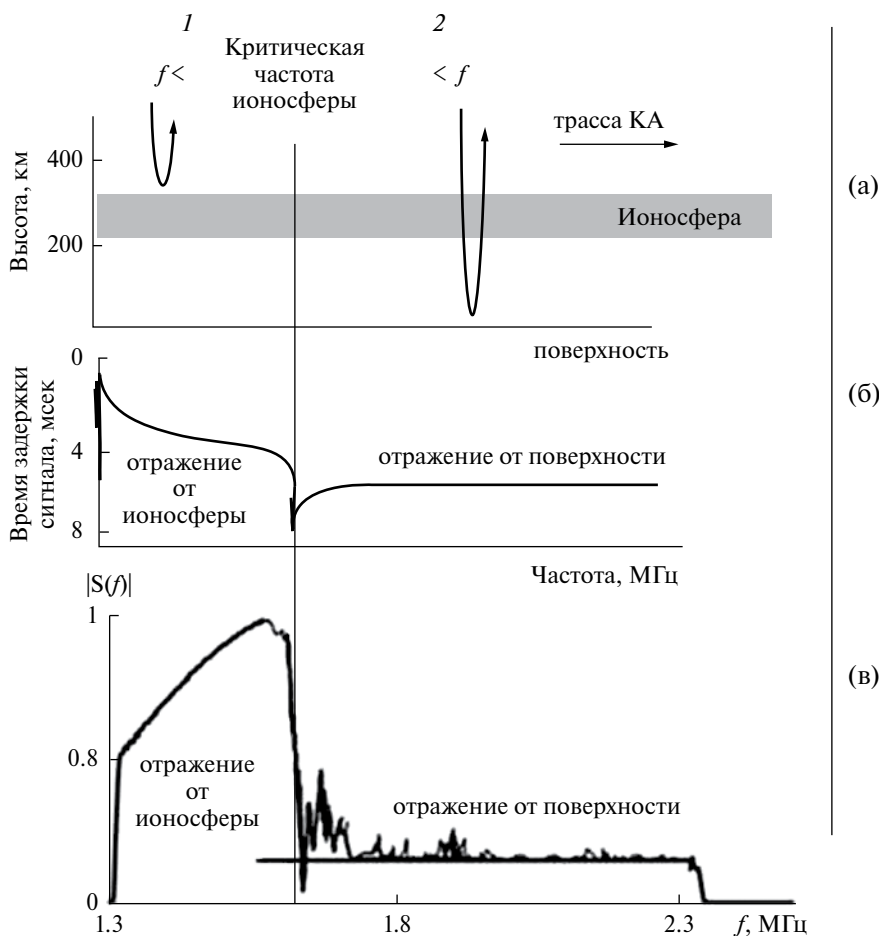
согласно данным радиозатменных методов и результатам исследования ионосферы Марса в режиме AIS, критическая частота в максимуме ионосферы меняется от 2.3 МГц при 80° (вечер) до 0.7 МГц при 120° (ночь). Это означает, что в измерениях радара MARSIS в режиме SS существует информация об отражении самого низкочастотного сигнала (центральная частота 1.8 МГц) и от ионосферы, и от грунта, а при удачном стечении обстоятельств есть сигналы, часть которых отражается от ионосферы, а часть от грунта.

В плоскослоистом приближении коэффициент отражения радиоволны частотой  $f$  от грунта с учетом двойного прохождения ионосферы Марса рассчитывается на основе решения уравнения Гельмгольца:

$$Y'' + k^2 \epsilon(z, f) Y = 0, \tag{1}$$

При стандартной циклограмме работы в режиме SS радар включается в районе терминатора (при зенитных углах Солнца выше 80°). В эти часы,

где комплексная функция  $\epsilon(z, f)$  задана как:



**Рис. 4.** а – схема процесса прохождения импульса по трассе “ионосфера – грунт– ионосфера”: 1 – отражение от ионосферы, 2 – отражение от грунта. б – зависимость времени задержки отраженного сигнала от частоты излучения при зондировании грунта с орбиты космического аппарата, находящегося выше плазменной оболочки планеты. в – модуль спектра сигнала, отраженного от однородного грунта с учетом двойного прохождения ионосферы для зенитного угла Солнца 96°.

$$\varepsilon(z, f) = \begin{cases} 1, & z < 0, & \text{I} \\ \varepsilon_i(z, f), & H > z \geq 0, & \text{II} \\ \varepsilon_g(f) = \text{const}, & z \geq H, & \text{III} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь область I соответствует однородному полупространству выше КА, расположенного в  $z = 0$ ; II – слоисто-неоднородный слой, описывающий ионосферу с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_i(z, f)$ ; III – однородный грунт, диэлектрическая проницаемость которого  $\varepsilon_g(f)$ ;  $z = H$  – соответствует границе “атмосфера – грунт”. Решение уравнения в области I имеет следующий вид:

$$Y_1 = \exp(ikz) + R(f)\exp(-ikz), \quad (3)$$

где функция частоты  $R(f) = (\sqrt{\varepsilon_g(f)} - 1) / (\sqrt{\varepsilon_g(f)} + 1)$  является коэффициентом отражения радиоволны частотой  $f$ ,  $k = 2\pi f/c$  – волновое число,  $c$  – скорость света.

Диэлектрическая проницаемость ионосферы  $\varepsilon_i(z, f)$  определялась согласно (1) и рассчитывалась методом инвариантного погружения [6]. В качестве примера, на рис. 3 приведен график частотной зависимости модуля коэффициента отражения радиоволн от системы сред “ионосфера-грунт” для частотного диапазона (1.3–2.8 МГц) с центральной частотой 1.8 МГц. Результаты расчета наглядно демонстрируют процесс отражения от ионосферы спектральных компонент сигнала с нижними частотами и прохождения через неё спектральных компонент сигнала с более высокими частотами. Такая зависимость коэффициента отражения позволяет определять критическую частоту максимума электронной концентрации ионосферы Марса в режиме зондирования грунта планеты.

На рис. 4а схематично показан процесс прохождения импульса с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ-импульс) по трассе “ионосфера – грунт – ионосфера”. На рис. 4б представлена зависимость времени задержки отраженного сигнала в зависимости частоты излучения при зондировании грунта с орбиты космического аппарата, находящегося выше плазменной оболочки планеты. Модуль  $|S(f)|$  спектра сигнала, отраженного от однородного грунта с учетом двойного прохождения верхней ионосферы Марса, представлен на рис. 4в. Расчет проведен для реального профиля распределения электронной концентрации ионосферы, полученного по данным радиозатменных измерений для зенитного угла Солнца  $96^\circ$ . Фактически, отраженный сигнал представляет собой два разделенных по частоте ЛЧМ сигнала, разнесенных во времени на величину  $t = 2H/c$ , где  $H$  – высота ионосферы. Первый, с полосой частот от 1.3 МГц до  $f_k$  отразился от ионосферы,  $f_k$  – критическая

частота слоя плазмы, второй, с частотой от  $f_k$  до 2.3 МГц – от грунта.

## 2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ РАДАРА MARSIS

Результаты численного моделирования процесса распространения радиоволн при проведении подповерхностного зондирования грунта Марса позволили отработать методику анализа полученных радаром MARSIS экспериментальных данных. В качестве примера выполнен анализ данных измерений радара MARSIS. Измерения были проведены 26.VI.2005 г. для режима работы SS на трассе 1855. На этой трассе всего было сделано 900 измерений. Вначале были использованы сигналы с центральными частотами 3 и 5 МГц (номера сеансов от 1 до 90). Интересующая нас серия сигналов с центральными частотами 1.8 и 4 МГц имела номера с 91 по 173. Во время проведения этих измерений высота аппарата уменьшалась практически линейно от 960 км до 700 км.

Так как по оценкам моностатических и радиозатменных методов исследования ионосферы верхняя граница ионосферы Марса начинается на высотах ниже 400 км [3–5], сигналы, излучаемые радаром и имеющие длительность 250 мкс, полностью формируются в свободном пространстве.

На рис. 5 представлен спектр отраженного сигнала для сеанса № 94. Это отклик сигнала с центральной частотой 1.8 МГц, полученный при зондировании грунта при зенитном угле Солнца  $93^\circ$ . Согласно выводам, полученным в результате моделирования, сигнал частично отразился от ионосферы, частично от поверхности планеты. Значение критической частоты в максимуме ионосферы соответствует примерно значению 1.7 МГц, что для указанного зенитного угла хорошо согласуется с данными [1]. Учитывая время включения приемной системы радара MARSIS, высота максимума

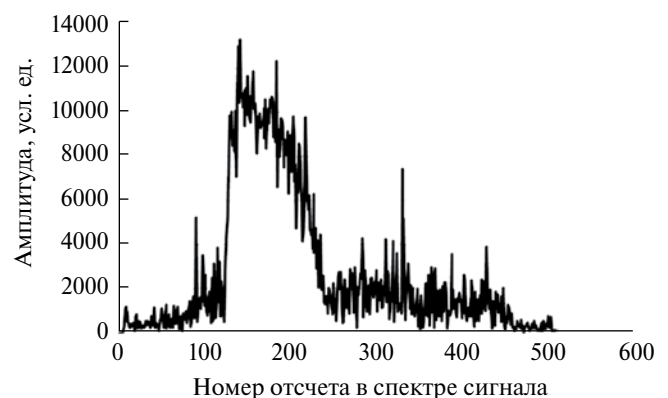


Рис. 5. Модуль спектра отраженного сигнала (измерение 94, трасса 1855, зенитный угол Солнца  $93^\circ$ ).

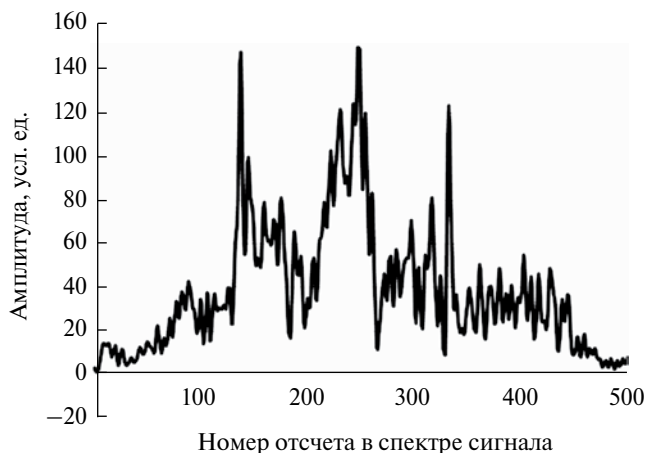


Рис. 6. Модуль спектра отраженного сигнала (измерение 95, трасса 1855, зенитный угол Солнца 93°).



Рис. 8. Модуль спектра отраженного сигнала (измерение 92, трасса 1855, зенитный угол Солнца 93°).

ионосферы для данного зенитного угла составляет не более 150–120 км, что также соответствует данным радиозатменных измерений [3, 4].

В соответствии с результатами численного моделирования (см. рис. 3) коэффициент отражения от ионосферы соответствует 1, а коэффициент отражения от грунта, примерно, 0.25–0.3. Поэтому диэлектрическая проницаемость грунта может находиться в диапазоне от 2.8 до 3.5.

Спектр отраженного сигнала в следующем сеансе измерений (95-м) имеет качественно иной вид (см. рис. 6). Для того, чтобы приобрести такой осциллирующий вид спектра, сигнал должен отразиться от двух отражателей, например, как показано на рис. 7. В этом случае частота осцилляций связана с высотой ионосферы. По баллистическим данным высота ионосферы соответствует примерно 100–120 км. Так как измерения последовательные и расстояние между ними не более 10 км, второй отражатель можно интерпретировать как более низкий плотный слой ионосферы, не диагностируемый сверху. Наличие возможных слоев в ионосфере можно проследить по результатам сеанса зондирования № 92 (см. рис. 8). По

форме спектра отраженного сигнала, полученного во время этого сеанса измерений можно предположить, что радиоволны частотой от 1.3 до 1.8 МГц отразились от более высокого слоя (180–150 км), а радиоволны с частотой от 1.8 до 2.3 МГц от лежащего под ним на высоте 100–120 км нижнего слоя ионосферы. Таким образом, анализ спектров отраженного сигнала позволяет идентифицировать наличие возможных слоев в ионосфере Марса по данным работы радара MARSIS в режиме зондирования грунта SS.

При использовании излучаемых сигналов с частотами выше критической частоты в максимуме ионосферы происходит отражение только от грунта планеты. Собственно, только при соблюдении этого условия возможно зондирование подповерхностной структуры грунта планет, обладающих плазменной оболочкой. Поэтому нижняя частота зондирующего сигнала должна быть несколько выше критической частоты в максимуме ионосферы планеты, что в свою очередь приводит к уменьшению глубины зондирования грунта. Однако наличие отраженного от грунта сигнала может быть также использовано для определения полного электронного содержания. Эта возможность основана на следующем.

При распространении в однородной плазме фаза спектральной компоненты сигнала определяется произведением  $\varphi(\omega, z) = k(\omega) \cdot z$ ,  $\omega = 2\pi f$ . В случае неоднородной по высоте плазмы, какой является ионосфера, плазменная частота является функцией координат и, соответственно, функцией координат оказывается волновое число

$$k(\omega, z) = \frac{\omega}{c} n(\omega, z) = \frac{1}{c} \sqrt{\omega^2 - \omega_p^2(z)}, \quad (4)$$

где  $\omega_p$  – плазменная частота ионосферы.

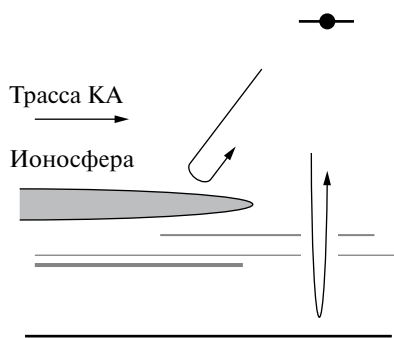


Рис. 7. Схема распространения сигнала (измерение 95, трасса 1855, зенитный угол Солнца 93°).

Следует также отметить, что вблизи критической частоты сигнал подвержен сильным дисперсионным искажениям. Эти эффекты и способы их учета при зондировании подповерхностной структуры грунта Марса достаточно подробно рассмотрены в работах [7–9] и здесь мы их рассматривать не будем.

Условие  $\omega_p/\omega < 1$  позволяет пренебречь поглощением радиоволн в плазме. Для этого случая справедливо разложение [10]

$$k(\omega) \cong \frac{\omega}{c} - \frac{\omega_p^2}{2\omega c} - \frac{\omega_p^4}{8\omega^3 c}. \quad (5)$$

Соответственно, групповая скорость  $V_g(\omega)$  как функция частоты может быть определена из соотношения

$$\frac{1}{V_g(\omega)} = k'(\omega) \cong \frac{1}{c} \left( 1 + \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} + \frac{3\omega_p^4}{8\omega^4} \right). \quad (6)$$

Учитывая, что  $\omega_p/\omega < 1$ , разность времени распространения сигнала в среде и в вакууме можно оценить соотношением

$$\Delta\tau_g(\omega) = z \left( \frac{1}{v_g(\omega)} - \frac{1}{c} \right) \cong \frac{z\omega_p^2}{2c\omega^2}. \quad (7)$$

Заметим, что это выражение получено для однородной плазмы. Для неоднородной по высоте плазмы, какой является ионосфера, плазменная частота является функцией координат. Поэтому групповое время задержки следует определять по формуле

$$\Delta\tau_g(\omega) \cong \frac{1}{2c\omega^2} \int_0^\infty \omega_p^2(z) dz. \quad (8)$$

Плазменная частота ионосферы  $\omega_p(z)$  на высоте  $z$  определяется значением электронной концентрации  $N(z)$  на этой высоте, а именно

$$\omega_p^2(z) = \frac{4\pi e^2}{m} N(z), \quad (9)$$

где  $e$  – заряд электрона и  $m$  – его масса.

При проведении подповерхностного зондирования необходимо учесть двойное прохождение ионосферы. С учетом этого групповое время запаздывания можно определить следующим выражением

$$\Delta\tau_g(f) \cong 2.69 \cdot 10^{-3} \frac{1}{f^2} \int_0^\infty N(z) dz. \quad (10)$$

Заметим, что значение интеграла  $N_t = \int_0^\infty N(z) dz$  есть не что иное, как полное электронное содержание. Таким образом, зная частоту

сигнала и время его прихода, можно определить полное электронное содержание вдоль луча пространства. Следует заметить, что при излучении сигналов на двух когерентных частотах нет необходимости знать абсолютное время группового запаздывания. Используя разность времен прихода двух когерентных сигналов легко определить полное электронное содержание ионосферы по следующей формуле:

$$N_t \cong 372 \cdot (\tau_g(f_1) - \tau_g(f_2)) \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}. \quad (11)$$

Данная процедура широко используется при определении полного электронного содержания ионосферы Земли по данным двухчастотных навигационных систем [11, 12]. Её же можно применить для определения полного электронного содержания ионосферы Марса, используя данные радара MARSIS в режиме подповерхностного зондирования и особенности его параметров, а именно, широкополосность излучаемых сигналов. Для определения полного электронного содержания можно использовать время распространения отдельных спектральных компонент сигнала. Однако, учитывая, что принятый сигнал имеет достаточно сложную форму (см., например, рис. 5, 6), эту процедуру реализовать практически невозможно. Здесь можно использовать следующий подход: условно разделить спектр принятого сигнала пополам и сформировать спектр сигналов, пришедших на двух разных частотах. Среднюю несущую частоту можно определить по формуле [13]

$$\bar{f} = \frac{\int_0^\Omega fP(\Omega) d\Omega}{\int_0^\Omega P(\Omega) d\Omega}, \quad (12)$$

где  $P(\Omega)$  – огибающая спектра сигнала,  $\Omega$  – полосу излучаемого сигнала. Аналогичным образом можно определить и групповое время прихода каждого сигнала:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^T tW(t) dt}{\int_0^T W(t) dt}, \quad (13)$$

где  $W(t)$  – мгновенная мощность принятого сигнала в момент времени  $t$ .

Вид сигналов радара MARSIS и соответствующие им спектры для каждого диапазона частот представлен на рис. 9 (серым цветом показана действительная часть сигнала, черным – его огибающая). Для наглядности каждый спектр разделен на две части: спектр нижних частот и спектр верхних частот. Граница между этими частями спектра вычислялась по формуле (12) так, чтобы энергии



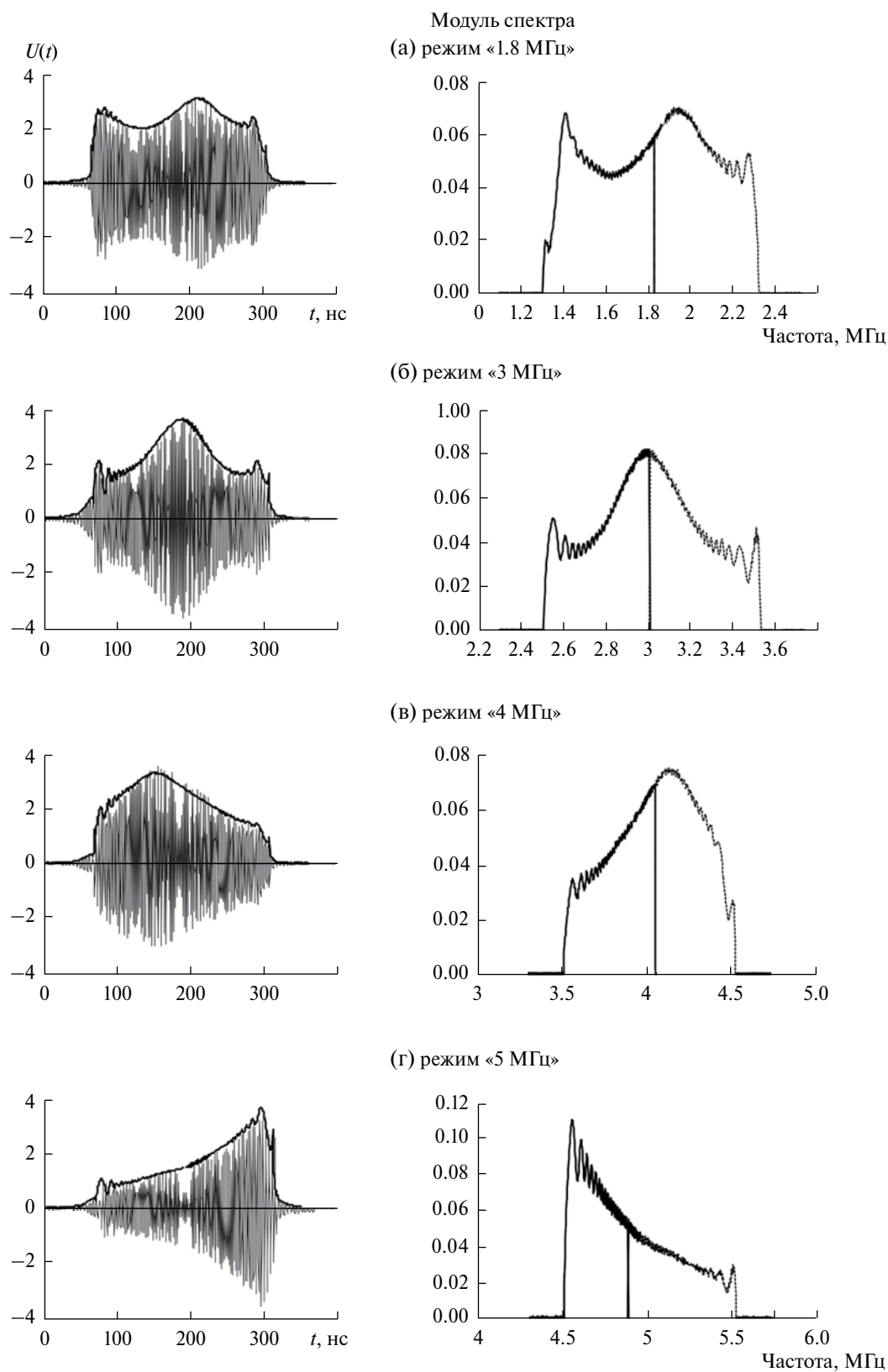
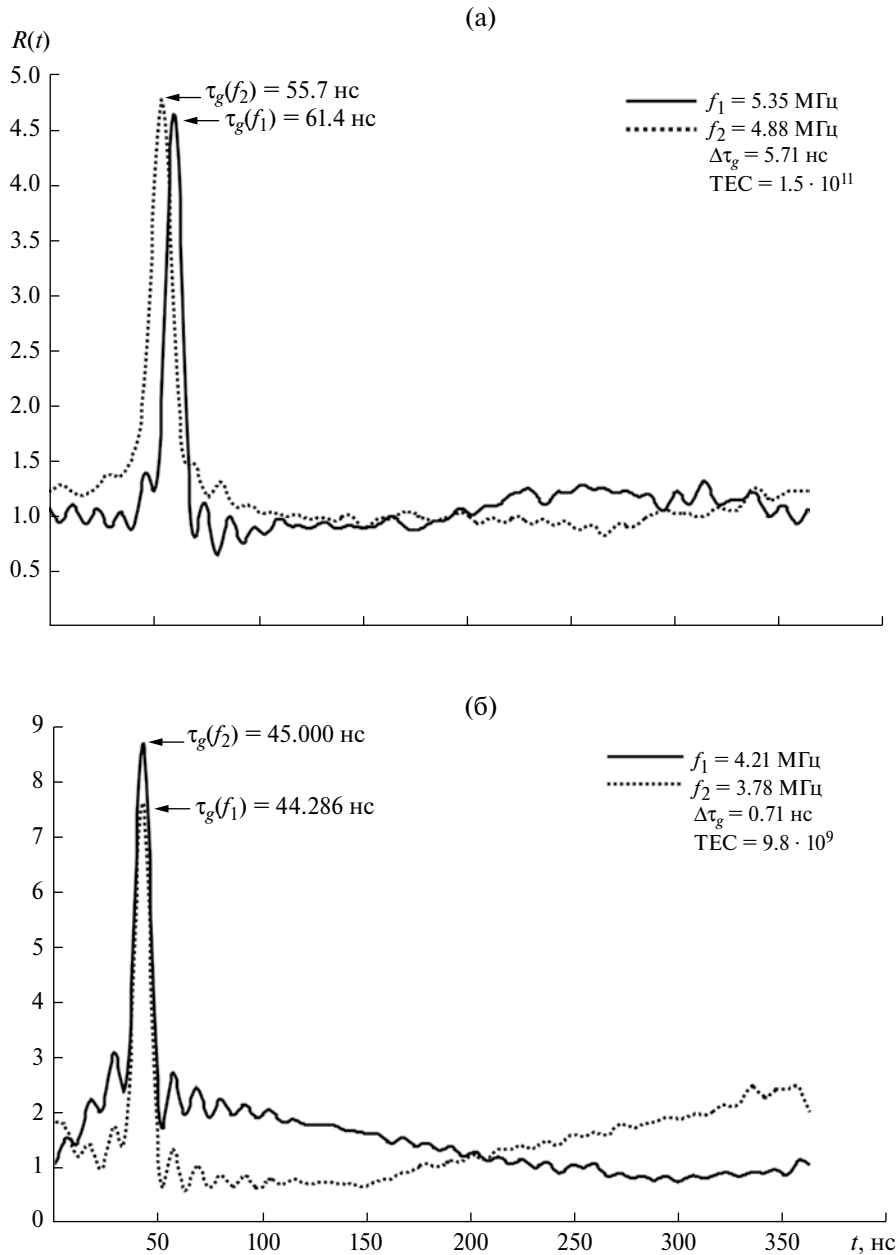


Рис. 9. Вид сигналов радара MARSIS (слева) и их спектров (справа).



**Рис. 10.** Кросскорреляционные функции  $R(t)$  низкочастотной (сплошная линия) и высокочастотной (пунктирная линия) частей спектра с отраженным сигналом для значений зенитного угла Солнца  $Za = 93^\circ$  и  $Za = 112^\circ$  (б).

излученного сигнала в каждой из частей были равны между собой. В результате импульс ЛЧМ-сигнала условно можно разделить на две части: низкочастотную и высокочастотную. Вычисляя кросскорреляционную функцию для каждой из частей, можно определить время запаздывания  $\Delta\tau_g = \tau_g(f_1) - \tau_g(f_2)$  одного полуимпульса относительно другого и далее вычислить значение электронной концентрации по формуле (11). Кросскорреляционная функция вычислялась с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) для каждой из полос частот, затем положение ее максимума выравнивалось с учетом

коррекционных поправок, вычисленных на основе навигационных данных баллистического сопровождения эксперимента (учитывающих рельеф местности и ошибки определения высоты). Эти данные накапливались за большой период измерений, и затем вычислялась электронная концентрация для усредненного за этот период значения зенитного угла Солнца. Результаты расчетов, выполненных для различных значений зенитного угла Солнца, для данных орбиты 1855 приведены на рис. 10. Здесь также прослеживается тенденция к убыванию электронной концентрации с ростом зенитного угла Солнца. Результаты расчетов полного



**Таблица 1.** Зависимость ПЭС для разных значений зенитного угла Солнца

$Z_a$ , град	93	100	108	112
$f_1$ , МГц	5.35	4.21	5.35	4.21
$f_2$ , МГц	4.88	3.78	4.88	3.78
$\Delta t$ , нс	5.71	2.14	0.71	0.71
ПЭС, эл/м <sup>2</sup>	$1.5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{10}$	$1.9 \cdot 10^{10}$	$9.8 \cdot 10^9$

электронного содержания для четырех значений зенитного угла Солнца, полученные с использованием данного алгоритма, представлены в таблице. Приведенные данные находятся в соответствии с результатами, полученными из радиозатменных измерений, и хорошо отражают влияние Солнца на состояние ионосферы планеты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совпадение результатов численного моделирования процесса распространения радиосигнала в ионосфере Марса с результатами анализа данных радиолокационного радара MARSIS подтвердило возможность использования радаров подповерхностного зондирования для исследования ионосфер планет и адекватность предлагаемых методик. В работе показано, что применяемый для исследования грунта режим работы радара MARSIS может быть использован для диагностики строения нижней части ионосферы: проведенное численное моделирование подтверждено при анализе радиолокационных данных. Использование рассмотренных методик позволяет провести детальное картографирование распределения как диэлектрической проницаемости грунта, так и полной электронной концентрации ионосферы Марса вдоль орбиты полета КА. В работе обоснована возможность проведения калибровки прибора по сигналам, отраженным от ионосферы в случае, когда диапазон изменения плазменной частоты ионосферы совпадает с диапазоном частот радара. Результаты обработки данных измерений радара подповерхностного зондирования показали, что значения полной электронной концентрации ионосферы Марса, полученные предложенным в работе методом, не противоречат данным радиозатменных экспериментов [3–4], полученных при разных значениях зенитного угла Солнца.

Таким образом, данный прибор может быть интересен не только с точки зрения создания и отработки методик проведения измерений и интерпретации получаемых данных о грунте, но и как инструмент дистанционного исследования планеты в целом, в том числе и ионосферы.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам итальянского Национального

института астрофизики (National Institute for Astrophysics (INAF)) Роберто Оросей (Roberto Orosei) и Марко Картацци (Marco Cartacci), а также особую благодарность сотруднику Планетологического института США (Planetary Science Institute (PSI)) Антону Иванову за предоставленные данные радара MARSIS и помощь в их расшифровке.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jordan R. et al.* The Mars express MARSIS sounder instrument // Planetary and Space Science. 2009. V. 57. P. 1975–1986.
2. *Porcello L.J., Adams G.F., Brown W.E. et al.* The Apollo lunar sounder radar system // Proc. IEEE. 1974. V. 62. № 6. P. 769–783.
3. *Kliore A.J., Cain D.L., Levy G.S. et al.* Occultation experiment: results of the first direct measurement of Mars’ atmosphere and ionosphere // Science. 1965. № 149. P. 1243–1248.
4. *Васильев М.Б., Вышков А.С., Колосов М.А. и др.* Предварительные результаты двухчастотного радиопросвечивания ионосферы Марса при помощи станции “Марс” в 1974 г. // Космич. исслед., 1975. Т. 13. № 1. С. 48–54. (Cosmic Research. P. 41).
5. *Gurnett D.A.* Radar soundings of the ionosphere of Mars/ D. A Gurnett et al. // Science. 2005. V. 310. P. 1929–1933.
6. *Андрианов В.А., Юшкова О.В.* Математическая модель для расчета коэффициента отражения от диэлектрически неоднородного полупространства // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 3. № 4. С. 548–552.
7. *Смирнов В.М., Черная Л.Ф., Юшкова О.В., Рыков К.Н.* Радиолокационное зондирование планеты Марс с орбиты автоматической межпланетной станции *Марс-Экспресс* // Космич. исслед. 2006. № 4. С. 332. (Cosmic Research. P. 317).

8. *Armand N.A., Smirnov V.M., Hagfors T.* Distortion of radar pulses by Martian ionosphere // *Radio Sci.* 2003. V. 38. № 5. P. 1090–1101.
9. *Смирнов В.М., Юшкова О.В.* Влияние ионосферы в экспериментах по подповерхностному зондированию грунта Марса и способ его коррекции // *Астрономический вестник.* 2013. Т. 47. № 6. С. 467–474.
10. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург. М.: Наука. 1967.
11. *Hofmann-Wellenhof B.* Global Positioning System. Theory and Practice / В. Hofmann-Wellenhof, В.Н. Lichtenegger, J. Collins. New York: Springer Verlag Wien, 1993.
12. *Андреанов В.А., Арманд Н.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М.* Результаты использования навигационной системы “Навстар” для мониторинга ионосферы Земли // *Исследование Земли из космоса.* 1996. № 2. С. 10.
13. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы. М.: Сов. радио, 1971.