

Эволюция межпланетных миссий радиолокационных исследований планет Солнечной системы с учетом развития бортовых радиолокационных средств космических аппаратов

© А.П. Панеева, Н.А. Голов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведен подробный ретроспективный обзор радиоисследований планет Солнечной системы. Рассмотрены история миссий и эволюция космических аппаратов радиолокационных исследований. Проанализированы варианты построения существующих радиолокационных средств космических аппаратов для проведения межпланетных исследований. На основе этого анализа предложен облик радиолокационной аппаратуры нового поколения для межпланетных исследовательских миссий. Определены принципы построения и технические решения для создания бортовой радиолокационной аппаратуры перспективных исследовательских космических аппаратов. Проведен анализ перспективных миссий радиолокационного исследования Венеры и предложены подходы к построению радиолокационной аппаратуры для космического аппарата на основе современных технических решений.

Ключевые слова: межпланетная миссия, радиолокационное исследование Венеры, космический аппарат радиолокационного исследования планет, радиолокатор с синтезированной апертурой

Введение. Одним из основных методов дистанционного исследования планет Солнечной системы является изучение их поверхности в оптическом, радио- и инфракрасном диапазонах. К преимуществам оптических исследований относятся высокая детализация и наглядность представления получаемых материалов, но при этом имеются существенные ограничения в случае плотной оптически непрозрачной атмосферы.

Исследования в инфракрасном диапазоне позволяют получать более детальные снимки, чем при оптической и радиолокационной съемке, но при этом такие исследования нельзя проводить на большой дальности от поверхности из-за сильного затухания волн в атмосфере.

Исследования планет Солнечной системы наземными и космическими средствами позволяют получить наиболее полную информацию о планетах для точного планирования межпланетных миссий и разработки космических аппаратов (КА).

Радиоисследования планет с Земли начались в 1930-х годах, а с 1946 г. исследования стали проводить радиолокационными средствами [1]. Хронология радиоисследований представлена на рис. 1.

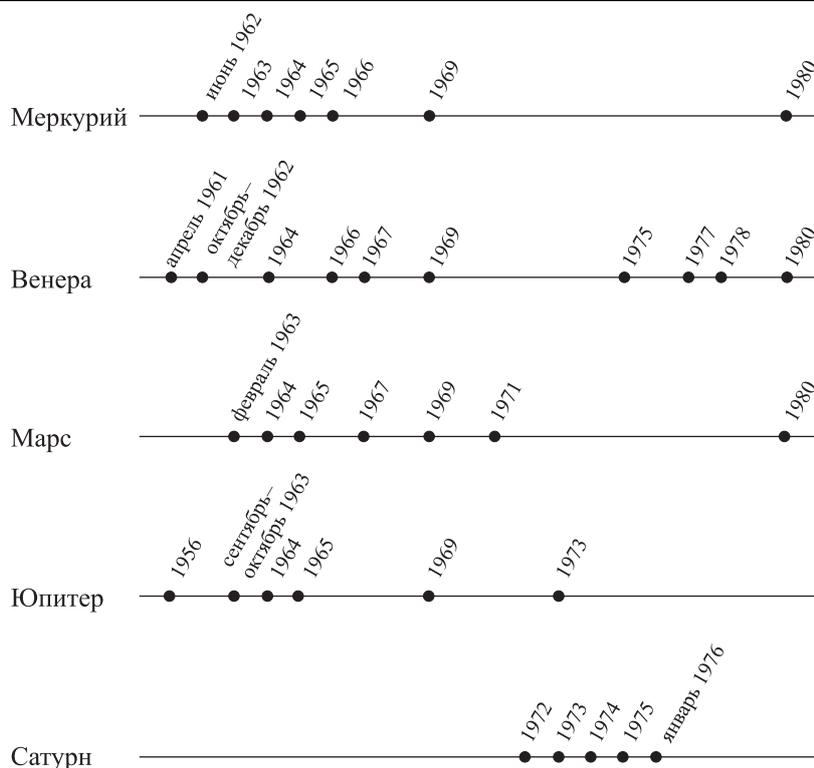


Рис. 1. Основные периоды времени радиоисследований планет Солнечной системы с Земли

Радиоисследования с Земли не давали полного представления о планетах, поскольку не позволяли подробно изучить состав и строение атмосфер, а также сформировать карты рельефа, на основании которых можно было бы рассчитать наилучшее место посадки космических аппаратов. Для того чтобы получить более подробные сведения о планетах, стали планировать миссии для картографирования поверхности, зондирования атмосферы и подповерхностного слоя специальными радиолокационными средствами.

Радиолокационные исследования с КА позволяют:

- получить радиолокационные изображения, которые не зависят от погоды и естественной освещенности, где облачный покров препятствует оптической или инфракрасной съемке;
- определить диэлектрические свойства поверхностного и подповерхностного слоя исследуемой планеты;
- составить высотные профили поверхности;
- составить высотные профили состава атмосферы.

Несмотря на ряд миссий к планетам Солнечной системы, и в настоящий момент остаются актуальными научные задачи высокодетального картографирования их поверхности, получения данных

о структуре поверхности и подповерхностном слое планет, зондирования их атмосферы. Данные, полученные с помощью радиолокационной съемки, позволяют, прежде всего, составить карты поверхностей планет, благодаря которым можно планировать места посадки межпланетных миссий.

В данной работе приведен ретроспективный анализ межпланетных миссий радиолокационного наблюдения (РЛН) планет Солнечной системы. Представлены задачи и описаны особенности картографирования поверхности планет радиолокационными средствами. Дан анализ современного состояния и перспектив развития радиолокационных средств для межпланетных миссий.

Цель данной работы — определение ключевых особенностей и принципов построения перспективного радиолокационного модуля КА для высокодетального картографирования, полученного на основании опыта, приобретенного во время предыдущих межпланетных миссий, и опыта, накопленного при создании средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [2], который можно использовать в целях разработки радиолокационной аппаратуры нового поколения для межпланетных исследовательских миссий.

Исследование Меркурия. Исследование планеты с помощью радиолокационных методов проводилось только с Земли. Космические аппараты, которые запускались к Меркурию, исследовали планету в оптическом и инфракрасном диапазоне длин волн: Mariner 10 — в 1973 г., MESSENGER — в 2004 г. и BepiColombo — в 2018 г. Аппарат Mariner 10 выполнял съемку поверхности с помощью телевизионных камер, MESSENGER исследовал поверхность с применением оптической камеры и лазерного высотомера, а BepiColombo осуществит (после выхода на орбиту в 2025 г.) исследование поверхности с использованием лазерного высотомера [3].

Исследование Венеры. Радиолокационные исследования Венеры начали проводить с Земли. Наиболее детальные радиолокационные изображения (РЛИ) ее поверхности были получены радиоастрономической обсерваторией в Аресибо. С помощью антенны с неподвижным зеркалом сферической формы диаметром 300 м и передатчика мощностью 450 кВт было проведено зондирование на длине волны 13 см. Достигнуто пространственное разрешение РЛИ от 10 до 20 км.

Запуски КА советской серии «Венера» и «Вега», американских серий Mariner и Pioneer Venus значительно расширили знания о планете.

Космические аппараты серии «Венера». На борту первых аппаратов «Венера-1» (1961), «Венера-2» (1965) и «Венера-3» (1965) были установлены приборы, предназначенные для изучения параметров атмосферы планеты и околопланетного пространства. На «Венере-4» (1967) был установлен радиовысотомер, однако из-за его дефекта

показания высоты оказались неверными. «Венера-5» (1969) и «Венера-6» (1969) были оснащены усовершенствованными радиовысотомерами, с помощью которых удалось построить высотные профили температуры и давления. После запусков «Венеры-7» (1970) и «Венеры-8» (1972) были составлены высотные профили горизонтальной скорости и направления ветра в атмосфере. Благодаря этим аппаратам, запущенным в 1960-х и 1970-х годах, была получена информация об околопланетном пространстве, о венерианских облаках, составе атмосферы, температуре, давлении и освещенности на поверхности, а также построены высотные профили температуры, давления и ветра [1].

Проекты «Венера-9» и «Венера-10» (1975) имели радиолокационную систему для исследований топографии Венеры, кроме того, были проведены эксперименты по радиопросвечиванию атмосферы [4]. Радиокomплекс работал на длинах волн 8 и 32 см, были получены высотные профили температуры и давления атмосферы на высотах от 40 до 80 км. Эксперимент по бистатической радиолокации позволил построить карту 55 полос на поверхности Венеры от 100 до 200 км в ширину и от 400 до 1200 км в длину с линейным разрешением радиолокационного изображения по наземной дальности порядка 10 км. Параметры КА «Венера-9» и «Венера-10» указаны в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры космических аппаратов «Венера-9» и «Венера-10»

Параметр	Значение/Описание
Стартовая масса, кг: «Венера-9» «Венера-10»	4936 5033
Габариты, м: диаметр высота (вместе с посадочным аппаратом)	1,1 2,8
Антенна: тип диаметр, м	Зеркальная параболическая, 1,6
Рабочая радиочастота радиорелейной линии, МГц	769
Тип передаваемого сигнала	Импульсно-кодовая модуляция
Скорость передачи сигнала, кбит/с	3
Орбита КА «Венера-9»: период, ч первоначальная, км наклонение, град итоговая, км наклонение, град	48,3 1500 × 111 700 34,17 1547 × 112 144 34,15

Параметр	Значение/Описание
Орбита КА «Венера-10»:	
период, ч	49,38
первоначальная, км	1500 × 114 000
наклонение, град	29,50
итоговая, км	1651 × 113 923
наклонение, град	29,10

Космические аппараты «Венера-11» и КА «Венера-12» (1978) не выполнили полностью поставленных перед ними задач: в ходе спуска получен большой объем информации об атмосфере, но измерения на поверхности практически сорвались. Проекты «Венера-13» и «Венера-14» (1981) позволили с помощью оптических камер получить цветные изображения с поверхности Венеры и проанализировать образцы породы, добытые с помощью бура.

В 1983 г. к Венере были направлены «Венера-15» и «Венера-16», которые вместо посадочных аппаратов имели радиолокатор. Аппараты предполагалось использовать для съемки Венеры методом бистатической радиолокации с целью картирования не менее четверти всей поверхности планеты с разрешением 2 км и лучше. Каждый КА был оснащен радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) «Полюс-В», работающим на длине волны 8 см, а также параболической антенной радиовысотомера «Омега». В итоге была построена карта от 30° с. ш. до полюса планеты с разрешением от 1 до 2 км. Радиолокационная съемка и картирование Венеры привели к важным открытиям рельефа и свойств поверхности планеты. Параметры КА «Венера-15» и «Венера-16» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16»

Параметр	Значение/Описание
Стартовая масса, кг:	
«Венера-15»	5250
«Венера-16»	5300
Габариты, м:	
диаметр	1,1
высота	5
Зона охвата луча радиовысотомера, км:	
вдоль траектории	
в перпендикулярном направлении	70
(низкое разрешение при первоначальной орбите)	40
с ошибкой 1 км (высокое разрешение, после корректировки орбиты)	10 × 40

Параметр	Значение/Описание
Тип передатчика Мощность, Вт	Лампа бегущей волны 80
Антенна: <i>тип 1</i> диаметр, м масса, кг <i>тип 2</i> диаметр, м <i>тип 3</i> диаметр, м	Зеркальная параболическая (параболический цилиндр) с синтезированной апертурой 1,4 × 6 (эквивалентный размер антенны — 70 м) 300 Параболическая антенна радиовысотомера 1 Параболическая антенна радиолинии (рабочая длина волны — 5 см) 2,6
Тип передаваемого сигнала Скорость передачи сигнала, кбит/с	Импульсно-кодовая модуляция 108
Орбита КА «Венера-15», «Венера-16»: угол наклона орбитальных плоскостей друг к другу, град период, ч наклонение, град размеры, км	Около 4 24 87,5 1000 × 65 000
Пространственное разрешение радиолокатора с синтезированной апертурой, км	1
Точность определения высоты, м	230

Космические аппараты серии Pioneer Venus. Рельеф Венеры до посадки «Венера-9» и «Венера-10» изучался только методом наземной радиолокации. Панорамы, переданные «Венера-9» и «Венера-10», оставались единственными изображениями поверхности планеты до запуска серии Pioneer Venus в 1978 г., в которую вошли космические аппараты Pioneer Venus Orbiter (Pioneer Venus 1) и Pioneer Venus Multiprobe (Pioneer Venus 2). Первый аппарат предназначался для исследований с орбиты Венеры, второй — для доставки на планету четырех зондов с целью проведения измерений в атмосфере.

С помощью радиолокационных средств в составе Pioneer Venus Orbiter удалось получить карту более 90 % площади планеты с точностью определения по высоте около 200 м. На РЛИ различались детали около 100 км, а в экваториальных районах — около 30 км. Съемка не затронула лишь области вблизи полюсов. Зондирование поверхности Венеры показало различные типы рельефа. В итоге были составлены карты и создан глобус Венеры. Параметры КА Pioneer Venus Orbiter даны в табл. 3.

Основные параметры космического аппарата Pioneer Venus Orbiter

Параметр	Значение/Описание
Стартовая масса, кг	517
Габариты, м: диаметр высота	2,54 4,5
Антенна: тип диаметр, м	Зеркальная параболическая 1
Рабочий радиочастотный диапазон	X-диапазон
Орбита: период, ч первоначальная, км наклонение, град	24 ч 150 × 66 600 105

Космический аппарат Magellan. С помощью средств, установленных на борту КА Magellan, была создана первая радиолокационная карта поверхности планеты с высоким разрешением, качество которой было близко к фотографическому. В верхней части космического аппарата располагалась остронаправленная антенна для радиолокационной съемки диаметром 3,7 м. Передача информации осуществлялась на двух длинах волн: телеметрическая, о состоянии аппарата в S-диапазоне (12,6 см) со скоростью 1,2 кбит/с, а в X-диапазоне (3,6 см) со скоростью 268,8 кбит/с транслировались радиолокационные данные. Для приема команд с Земли использовалась еще одна антенна с широкой (до 90°) диаграммой направленности. Антенна высотометра представляла собой прямоугольный рупор (ширина диаграммы направленности — 29°).

Радиолокационная система функционировала в трех режимах:

- радиолокационного синтезирования аппаратуры (РСА) — радиолокатор позволял осуществлять картографирование с разрешением вдоль трассы полета до 120 м, поперек — с разрешением от 120 до 360 м на длине волны 12,6 см;

- «высотомер» — измерялись высотные профили с разрешением от 30 до 50 м;

- радиометрическом — предназначен для регистрации уровня естественного теплового радиоизлучения поверхности планеты.

На Землю были переданы несколько тысяч изображений, охватывающих Венеру от полюса до полюса. Изначально планировалось исследовать 70 % поверхности, но после 5300 витков вокруг Венеры более 98 % ее поверхности было отснято КА Magellan. Оставшееся

пространство на севере было заполнено изображениями с аппаратов, ранее выполнявших съемку поверхности. Параметры КА Magellan представлены в табл. 4.

Таблица 4

Основные параметры космического аппарата Magellan

Параметр	Значение
Стартовая масса, т	3,5
Габариты, м:	
длина	6,4
высота	4,6
Углы обзора, град	От 18 до 55
Орбита:	
первоначальная, км	8000 × 257 000
наклонение, град	85,3
период, ч	3,15
итоговая, км	6300 × 14 500
наклонение, град	85,5
период, ч	3,25

Космический аппарат Venus Express. С помощью данного КА было проведено подробное изучение атмосферы Венеры. Радиолокатор, работающий в диапазоне длин волн 3,6 и 13 см с антенной диаметром 1,3 м, использовался для научного эксперимента Venus Express (VeRa). Эксперимент по радиозондированию Венеры VeRa (Venus Radio Science Experiment) заключался в зондировании венерианской атмосферы для определения профилей плотности, давления и температуры с разрешением по высоте лучше 100 м, а также для исследования ионосферы. Исследовалась поверхность Венеры в конкретных районах с использованием бистатической локации (проведено девять экспериментов) [5, 6]. В настоящее время сообщается о планировании новых миссий для исследования Венеры и радиолокационного картографирования ее поверхности.

Космический аппарат Shukrayaan-1 (2024). В состав миссии входят орбитальный аппарат и атмосферный зонд, общая масса КА — 2500 кг. Орбитальный аппарат будет иметь радиолокатор с синтезированной апертурой, работающий в L- и S-диапазонах. Картографирование поверхности планируется с разрешением от 30 до 40 м [7]. Орбитальный аппарат в зависимости от окончательной конфигурации будет нести научную полезную нагрузку массой около 100 кг при доступной мощности 500 Вт. Ожидается, что начальная эллиптическая орбита вокруг Венеры будет иметь параметры: 500 × 60 000 км. В течение следующего года планируется корректировка орбиты до 200 × 600 км. Эта орбита будет последней, используемой для научных

наблюдений [8], и по своим параметрам она близка к орбитам, используемым аппаратами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Космический аппарат VERITAS (2026). Этот космический аппарат предназначен для составления карты Венеры в высоком разрешении. Изображения с планеты будут получены с помощью радиолокатора VISAR X-диапазона (длина волны 3,8 см) с синтезированной апертурой. Аппарат VERITAS будет отображать топографию поверхности с пространственным разрешением 250 м и точностью 5 м по высоте, получать изображения с разрешением 30 м в глобальном масштабе и с разрешением 15 м для примерно 15 % поверхности планеты. Система будет работать в полосе пропускания 20 МГц, разрешение по дальности составит около 7,5 м [9].

Космический аппарат «Венера-Д» (планируется не ранее 2029). Этот КА будет включать орбитальный и спускаемый аппараты. Основной целью орбитального аппарата является проведение исследований планеты с использованием радиолокатора [10, 11]. Параметры КА «Венера-Д» указаны в табл. 5.

Таблица 5

Основные параметры космического аппарата «Венера-Д»

Параметр	Значение
Стартовая масса КА, кг	4796
Масса орбитального аппарата, кг	990
Рабочие диапазоны частот	X- и Ka-диапазоны (длины волн 1,13–0,75 см)
<i>Транспортирование Земля–Венера</i> Мощность, Вт: сервисных систем орбитального аппарата обогрева спускаемого аппарата сервисных систем спускаемого аппарата полезной нагрузки	 700 (max 1100) 400 (max 500) 25 (max 50) 25 (max 50)
<i>Работа орбитального аппарата</i> Мощность, Вт: сервисных систем полезной нагрузки	 650 (max 1250) 100 (max 250)
Функциональные орбиты, км:	300–500
наклонение, град	90
период, ч	24

Космический аппарат EnVision (2030). Аппарат будет производить радиолокационное и оптическое картографирование с высоким разрешением и выполнять атмосферные исследования [12]. В составе КА будет применяться радиолокатор с синтезированной апертурой

(VenSAR), работающий на частоте 3,2 ГГц в S-диапазоне (длина волны 9,4 см). Тип антенны — фазированная антенная решетка [13]. Параметры КА EnVision приведены в табл. 6.

Таблица 6

Основные параметры космического аппарата EnVision

Параметр	Значение
Стартовая масса, кг	2500
Габариты, м	2 x 2 x 3
Антенна (VenSAR): тип размеры, м рабочий диапазон частот	Микрополосковая решетка 5,47 × 0,6 S-диапазон
Полоса пропускания, МГц	182
Угол обзора, град	От 20 до 45
Орбита: итоговая высота, км период, мин	Круговая 259 Около 92
Пиковая мощность передатчика, Вт	115

Для подповерхностного радиолокационного зондирования Венеры будет использована состоящая из множества сенсоров система SRS (Supplemental Restraint System), включающая дипольную антенну, работающую в диапазоне от 9 до 30 МГц. Эта система будет определять границы подповерхностных слоев в различных геологических ландшафтах, которые включают ударные кратеры и их заполнение, равнины, потоки лавы и их края, а также тектонические неоднородности. SRS, зондирующая на глубину от 340 до 750 м (соответственно частотам — от 9 до 30 МГц), сможет отображать подповерхностную структуру планеты с вертикальным разрешением от 5 до 16 м. Режимы картографирования поверхности Венеры представлены в табл. 7.

Таблица 7

Режимы картографирования EnVision

Охват	Покрытие поверхности, %	Размер полосы, км	Разрешение, м
Глобальный	> 95	–	50 000
Зональный	> 95	2500 × 2500	150
Региональный	> 20	1500 × 1500	6
	> 2	100 × 100	6
Локальный	> 0,2	5 × 5	1

Исследование Марса. Поверхность Марса исследовалась с помощью радиорефракционных экспериментов, радиоастрономических измерений с Земли и космических аппаратов. Учитывая разреженную атмосферу Марса и отсутствие облаков, которые на долгий период закрывали бы поверхность планеты от наблюдателя, съемка поверхности производилась преимущественно в оптическом и инфракрасном диапазоне. Информация о подповерхностных слоях Марса была получена с помощью радиофизических измерений. Первые эксперименты по радиолокационному исследованию Марса осуществлялись аппаратами «Маринер-6» и «Маринер-7» в 1969 г. и «Викинг-1 и «Викинг-2» в 1975 г. [14].

Непосредственное радиолокационное исследование поверхности и подповерхностного слоя планеты началось с запуска аппарата Mars Express в 2003 г., который имел на борту радиолокационную систему MARSIS для зондирования ионосферы и глубинных слоев (до 5 км) марсианской поверхности. В 2006 г. был запущен Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), который стал работать в паре с Mars Express. Радиолокатор SHARAD, входящий в состав MRO, предназначен для подповерхностного зондирования. Разрешение РЛИ, полученных при исследовании, составляет от 0,3 до 3 км, причем на высоте около 10 м. Антенна SHARAD представляет собой два излучателя длиной по 5 м, направленных в сторону от трассы полета. Обе миссии функционируют до сих пор — в 2023 г.

В 2020 г. КНР был запущен «Тяньвэнь-1», который состоит из орбитального и спускаемого аппаратов (марсоход «Чжужун»). Орбитальный аппарат оснащен радиолокатором MOSER, имеющим два рабочих диапазона: от 10 до 20 МГц и от 30 до 50 МГц, для зондирования подповерхностной структуры и поиска льда, а также MOSER используется и как радиовысотомер. Марсоход имеет подповерхностный радиолокатор SPR с низкочастотным каналом, работающим в диапазоне частот 15...95 МГц, и с высокочастотным с диапазоном 0,45...2,15 ГГц [15]. Хронология радиоисследований Марса показана на рис. 2.

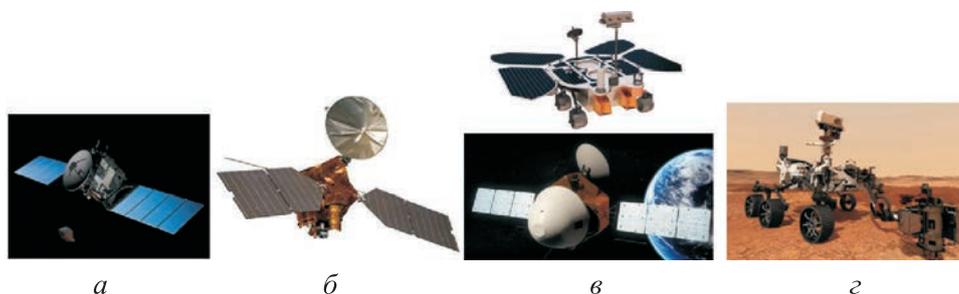


Рис. 2. Хронология радиоисследований Марса:

a — Mars Express (2003); *б* — Mars Reconnaissance Orbiter (2006); *в* — «Тяньвэнь-1» (2020);
г — Perseverance (2021)

Исследование Юпитера. Радиоисследования Юпитера начались с Земли. Юпитер — сложный для радиолокационных исследований объектом, так как его атмосфера сильно поглощает радиоволны. Поэтому съемка планеты осуществлялась преимущественно в оптическом и инфракрасном диапазонах. Успешные дистанционные исследования Юпитера были проведены пролетными миссиями Pioneer 10 и Pioneer 11 в 1972 г. Оба аппарата проводили радиозондирование атмосферы и получили изображения Юпитера и его спутников. В состав состоявшейся в 1977 г. следующей миссии Voyager 1 и Voyager 2 входила телевизионная камера, позволяющая получать снимки в более высоком разрешении по сравнению с Pioneer 10 и Pioneer 11.

Космический аппарат Galileo (1989 г.) стал первым орбитальным аппаратом Юпитера, он осуществлял съемку планеты с помощью оптических камер. В 1997 г. был запущен космический аппарат Cassini, имевший на борту многоканальную зеркальную антенну диаметром 10 м. Она была предназначена, помимо приема команд и передачи на Землю научных данных, для радиолокационной съемки Титана при пролете мимо Юпитера. Этот КА дал возможность получить с помощью камеры более подробные снимки планеты, включая детальное глобальное цветное изображение Юпитера.

Перспективной научной задачей является подповерхностное радиолокационное зондирование лун Юпитера: Ганимеда, Каллисто, Европы и Ио, которые, по сведениям, полученным в результате миссий на Юпитер, имеют скопления жидкости под поверхностью. С исследовательскими целями планируется в 2023 г. запуск космического аппарата Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE), который будет нести на борту радиолокатор, основные характеристики даны в табл. 8 [16].

Таблица 8

**Основные параметры радиолокационной системы
космического аппарата JUICE**

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	9
Антенна: Тип	Дипольная
Длина, м	16
Масса, кг	11,7
Максимальная глубина сканирования, км	9
Разрешение, км: поперек трассы полета	От 2 до 10
вдоль трассы полета	От 0,3 до 1,0
Частота повторения импульсов, Гц	От 200 до 500
Длина импульса, мкс	От 50 до 100
Разрешение по вертикали, м (лед)	От 50 до 140

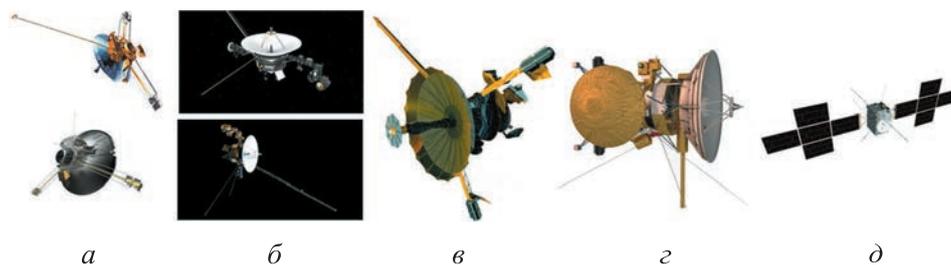


Рис. 3. Хронология исследований Юпитера:

a — Pioneer 10&11 (1972); *б* — Voyager 1 и Voyager 2 (1977); *в* — Galileo (1989);
г — Cassini (1997); *д* — JUICE (2023)

Хронология исследований Юпитера показана на рис. 3.

Исследование Сатурна. Первые радиолокационные наблюдения Сатурна проводились с Земли, длина волны зондирующего сигнала составляла 12,5 см. Исследования Сатурна из космоса выполнялись аппаратами Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2 и Cassini.

Первым пролетевшим мимо Сатурна стал КА Pioneer 11. Были получены оптические изображения низкого качества. После того как аппарат пролетел мимо Юпитера, к Сатурну приблизились Voyager 1 и Voyager 2, которые также провели съемку планеты, но уже в высоком разрешении, а также им удалось получить изображения его спутников. С аппаратом Voyager 2 произведено радиозондирование атмосферы для получения данных о ее температуре и плотности.

В 1997 г. к Сатурну был запущен КА Cassini (табл. 9), который в 2004 г. достиг планеты. Его полезной нагрузкой стала радиолокационная система Cassini radar, предназначенная для картографирования поверхности Титана и измерения высот поверхности [17]. Разрешение РСА составило от 0,35 до 1,7 км.

Таблица 9

Параметры космического аппарата Cassini

Параметр	Значение
Рабочая частота	Ku-диапазон, 13,78 ГГц
Стартовая масса, кг	5712
Тип антенны	Зеркальная параболическая

Хронология исследований Сатурна приведена на рис. 4.

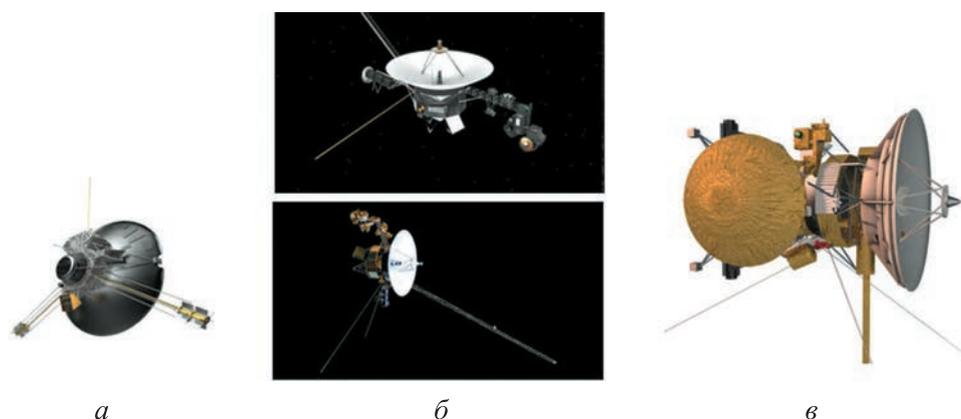


Рис. 4. Хронология исследований Сатурна:

а — Pioneer 10&11 (1972); б — Voyager 1 и Voyager 2 (1977); в — Cassini (1997)

Исследование Урана, Нептуна и Плутона. Радиолокационные исследования поверхности Урана и Нептуна не проводили. Voyager 2 пролетел мимо Урана в январе 1986 г. и мимо Нептуна в августе 1989 г. Зонд двигался слишком быстро, и ему не хватало топлива, чтобы замедлиться и выйти на орбиту. Исследования Урана и Нептуна проводились с помощью телескопов и Voyager 2. Исследование Плутона выполнялось аппаратом New Horizons в 2015 г. Съемка планеты проходила с помощью камеры в видимом диапазоне, также был проведен эксперимент по радиозондированию атмосферы.

Анализ перспектив межпланетных миссий РЛН. Исследования в оптическом, инфракрасном и радиодиапазоне позволили получить обширную информации об атмосфере и поверхности планет Солнечной системы. Исследование планет Солнечной системы с использованием КА имеет продолжительную историю, но не для всех планет Солнечной системы применялись радиолокационные методы. Наиболее актуальны эти методы исследования для изучения Венеры, поскольку ее атмосфера существенно затрудняет исследования в оптическом и инфракрасном диапазонах. Благодаря данным, полученным КА серии «Венера» в 1960-х и 1970-х годах, в результате радиоисследований стал известен химический состав основных компонентов атмосферы планеты и составлены высотные профили температуры и давления, что позволило в дальнейшем корректировать тактико-технические характеристики миссий. Кроме того, выявлено сильное ослабление радиоволн в атмосфере в определенных диапазонах (резкое уменьшение радиоярких температур в миллиметровом диапазоне и в коротковолновой части сантиметрового диапазона), что указывает на наличие поглощающих компонент в составе атмосферы Венеры. Анализ данных, полученных с помощью как наземных радиоизмерений, так и КА, позволил определить диапазоны длин волн, при которых

результаты измерений слабо зависят от состава атмосферы при исследовании поверхности Венеры. Поэтому во многих миссиях на Венеру космическими аппаратами, имеющими в составе радиолокационную систему, исследования проводились в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин волн, преимущественно в L-, S-, C- и X-диапазонах.

По результатам миссий на Венеру изменялся вид радиолокационной системы. Если раньше КА имели в составе достаточно габаритную антенну, то впоследствии их стали оснащать антеннами с лучшими массогабаритными параметрами, благодаря использованию метода синтеза апертуры. Многотонные КА с габаритными зеркальными антеннами стали вытесняться более легкими аппаратами. В результате стало возможным создание малого КА для радиолокационного картографирования Венеры. При этом менялся и тип антенной системы. Если раньше в состав КА входили лишь зеркальные антенны, то в настоящее время все актуальнее становится создание КА с антенной решеткой (АР). Данное техническое решение уже предлагается реализовать на КА EnVision, запуск которого планируется на 2030 г. Использование в составе КА системы с антенной решеткой имеет несомненные преимущества перед применением зеркальных антенн, а именно:

- возможность создания на их основе принципиально новых интегрированных радиоэлектронных комплексов (РЭК), обеспечивающих многофункциональность, гибкое управление пространственными характеристиками и высокий энергетический потенциал, тем самым удовлетворяя растущие требования к силовым и массогабаритным характеристикам антенных систем;

- высокий уровень излучаемой мощности, обеспечиваемый суммированием в пространстве многих маломощных сигналов;

- высокая надежность, обеспечиваемая наличием избыточных элементов и их функциональностью;

- широкий диапазон частот, предоставляющий возможность создания широкополосной антенной системы.

При этом важно упомянуть и недостатки включения АР в состав исследовательского КА:

- высокая стоимость (на порядок и более) при проектировании и при изготовлении;

- сложность конструкции АР, обусловленная наличием дополнительных элементов (фазовращателей, усилителей, управляемых аттенюаторов);

- трудности с обеспечением теплового режима в полотне антенной решетки, а также радиационной стойкости [18].

При исследовании Венеры важно определить разрешение, с которым будет проводиться картографирование поверхности, и интересующую область планеты для радиолокационной съемки.



Рис. 5. Процент поверхности Венеры, картографированной с помощью радиолокации с КА:
1 — Pioneer Venus Orbiter, 90 % (1978); 2 — «Венера 15» и «Венера 16», 25 % (1983); 3 — Magellan, 98 % (1989)

По результатам проведенных миссий на Венеру в совокупности была отснята практически вся ее поверхность (рис. 5).

Улучшалось и качество получаемых РЛИ. Если в ранних миссиях на Венеру разрешение при картографировании составляло порядка нескольких километров и сотен метров (рис. 6), то в настоящее время планируются миссии, которые позволят добиться разрешения порядка нескольких метров (рис. 7).

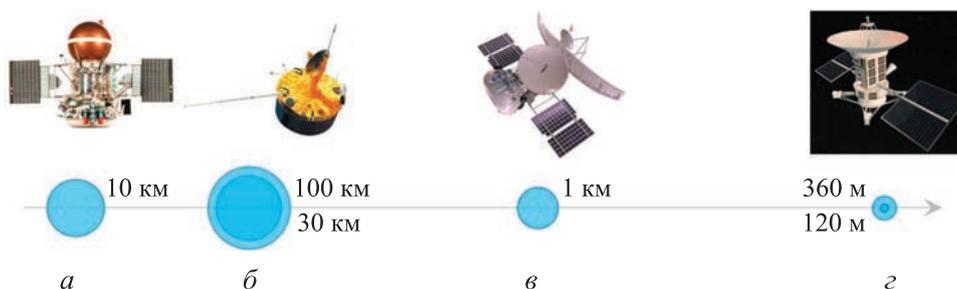


Рис. 6. Эволюция разрешения радиолокационной съемки поверхности Венеры:
а — «Венера 9» и «Венера 10» (1975); б — Pioneer Venus Orbiter (1978); в — «Венера 15» и «Венера 16» (1983); г — Magellan (1989)

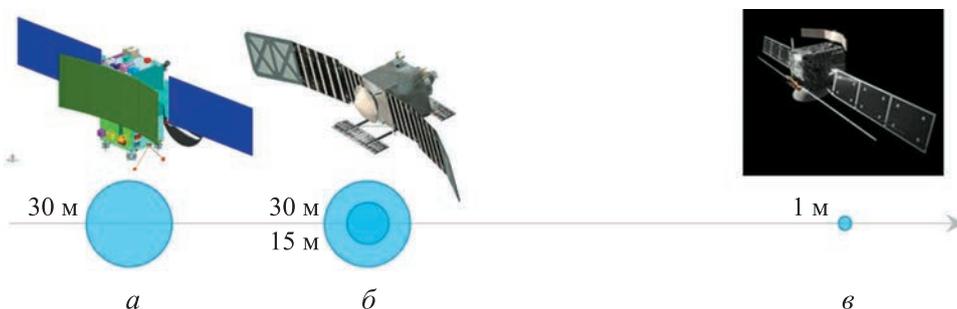


Рис. 7. Миссии, планируемые с целью осуществления радиолокационной съемки поверхности Венеры:
а — Shukrayaan-1 (2024); б — VERITAS (2026); в — En Vision (2030)

В ближайшее десятилетие запланирован ряд орбитальных миссий к Венере, включая отечественный проект «Венера-Д», что позволяет судить об актуальности создания радиолокационного комплекса нового поколения, который может существенно повысить детализацию изучения поверхности планеты, а также провести подповерхностные исследования.

Заключение. Исходя из опыта предыдущих миссий, учитывая тенденции развития КА межпланетных исследований, а также основываясь на современном уровне развития радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли, можно определить следующие основные особенности и принципы построения перспективного радиолокационного модуля картографирования поверхности:

- базовый системный облик радиолокатора на основе активной фазированной антенной решетки, работающей в режиме синтеза апертуры;
- возможные рабочие L-, S-, C- и X-диапазоны частот для режима высокдетального картографирования, а также, вполне вероятно, реализация многодиапазонного режима работы;
- улучшенные по сравнению с аппаратами предыдущих поколений массогабаритные характеристики — возможно создание радиолокационной аппаратуры массой не более 100 кг;
- повышенная надежность и расширенный срок службы в результате применения антенных решеток;
- разрешение картографирования поверхности не хуже 10...20 м на низких орбитах (от 500 до 1200 км), а в случае высоких орбит должны предъявляться более жесткие требования к бортовой системе синхронизации и точного времени;
- объем генерируемой информации может в зависимости от параметров орбиты и времени работы радиолокатора изменяться в широких диапазонах, но существующие отечественные решения позволяют обеспечить объем бортового накопителя 1024 Гбит на одном модуле хранения, а для решения задачи накопления большего объема может быть установлено несколько таких модулей, но при этом скорость передачи информации на Землю ожидаемо не превысит 2 Мбит/с;
- планируемый при проектировании срок активного существования бортового радиолокационного модуля должен быть не менее 5 лет с учетом деградации характеристик от действия факторов космического пространства.

Следует заметить, что существующий в настоящее время научно-технический задел на отечественных предприятиях позволяет создать целевую радиолокационную аппаратуру для перспективных миссий на основе осуществляемых разработок средств дистанционного зондирования Земли.

Главными научно-техническими задачами для создания такой аппаратуры являются создание высокостабильного бортового блока времени и частоты, а также эффективной бортовой системы обработки радиолокационной информации. Бортовой блок времени и частоты должен обеспечить формирование и сличение высокоточной шкалы времени и опорной частоты с относительной стабильностью синхросигнала в 1 Гц на суточном интервале не хуже 5×10^{-13} сут и среднеквадратической точностью автономного хранения шкалы времени на интервале 24 ч не хуже 50 нс. Система обработки радиолокационной информации может быть построена на основе применения технологий радиофотоники [19], что позволит реализовать высокоскоростную обработку широкополосных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Маров М.Я., Хантресс У.Т. *Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия*. 2-е изд., испр. и доп. Москва, Физмалит, 2017, 612 с. ISBN 928-5-9221-1741-8
- [2] Голов Н.А., Усачев В.А., Корянов В.В., Топорков А.Г. Перспективные технологии создания космического комплекса радиолокационного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и ракет-носителей легкого класса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 5 (89), с. 9. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1881>. EDN WBNBCT.
- [3] Kasaba Y., Bougeret J.-L., Blomberg L.G., Kojima H. The Plasma Wave Investigation (PWI) onboard the BepiColombo/MMO: First measurement of electric fields, electromagnetic waves, and radio waves around Mercury. *Planetary and Space Science*, January 2010, vol. 58 (1-2), pp. 238–278. DOI: 10.1016/j.pss.2008.07.017
- [4] Колосов М.А., Яковлев О.И. Результаты радиопросвечивания нейтральной атмосферы Венеры и бистатической локации ее поверхности при помощи спутников «Венера — 9, 10». *УФН*, 1977, т. 123, № 4, с. 697–698.
- [5] *Развитие систем и методов двухпозиционного зондирования атмосфер, поверхностей, грунта Венеры, планет и их спутников, с помощью бортовых и наземных радиосредств, а также мощных источников километрового и дециметрового радиоизлучения (Солнце, Земля, Юпитер, Сатурн и др. Отчет о НИР (заключительный)*. Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал). А.Г. Павельев, рук. Фрязино, 2015, 32 с. № ГР 01201268739. URL: <http://cplire.ru/rus/reports/2014/0030-2014-0090.pdf> (дата обращения 23.02.2023)
- [6] Häusler B., Pätzold M., Tyler G.L., Simpson R.A. Radio science investigations by VeRa onboard the Venus Express spacecraft. *Planetary and Space Science*, 2006, vol. 54 (13–14), pp. 1315–1335. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.04.032>
- [7] Nigar Shaji. *Venus Orbiter Mission to study surface, atmosphere and plasma environment*, 2019. URL: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/meetings/archive/vexag-17/presentations/Nigar.pdf> (дата обращения 23.02.2023).
- [8] Shukrayaan-1: News and Updates. *Strategic Front Forum*. URL: <https://www.strategicfront.org/forums/threads/shukrayaan-1-news-and-updates.3622/> (дата обращения 15.02.2023).

- [9] Hensl S., Smrekar S., Shaffer S., Paller M. *VISAR: A Next Generation Interferometric Radar for Venus Exploration*. September 2015. California Institute of Technology, Venus Lab and Technology Workshop At Houston, TX.
DOI: 10.1109/APSAR.2015.7306225
- [10] *Проработка предварительной программы экспериментов на орбитальном, спускаемом-посадочном аппаратах и субспутнике проекта «Венера-Д».* Итоговый научно-технический отчет о НИР «Венера-Д». Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Л.В. Засова, рук. Москва, ИКИ РАН, 2012, 220 с. № ГР Ф 40946.
URL: <http://venera-d.cosmos.ru/uploads/media/Venera-D-2012.pdf> (дата обращения 23.02.2023)
- [11] Zasova L., Gregg T., Burdanov A., Economou T. Venera-D: expanding our horizon of terrestrial Planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *EPSC Abstracts*, 2019, vol. 13, EPSC-DPS2019-1938-1.
- [12] Ghail R.C., Wilson F., Widemann T. EnVision M5 Venus Orbiter Proposal: Opportunities and Challenges. *American Astronomical Society, DPS meeting #48*, vol. 48, 01.10.2016.
- [13] Ghail R.C., Wilson C.F., Widemann T. VenSAR, the Revolutionary Radar for the EnVision Mission to Venus. In: *48th Lunar and Planetary Science Conference*, held 20–24 March 2017, at the Woodlands, Texas, 48, 2805.
- [14] Крупенио Н.Н. *Радиофизические исследования Луны и планет*. Москва, Знание, 1976, 64 с.
- [15] Bin Zhou, Shaoxiang Shen, Wei Lu, Qing Liu. The Mars rover subsurface penetrating radar onboard China's Mars 2020 mission. *Earth and Planetary Physics*, July 2020, vol. 4 (4), pp. 1–10. DOI: 10.26464/epp2020054
- [16] Witasse O., the JUICE Teams. JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer): A European mission to explore the emergence of habitable worlds around gas giants. In: *Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct., 2020*. EPSC2020-76, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-76>, 2020
- [17] RADAR. Cassini Orbiter. NASA
URL: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/mission/spacecraft/cassini-orbiter/radio-detection-and-ranging/radar-technical-write-up/> (дата обращения 15.02.2023).
- [18] Братчиков А.Н., Васин В.И., Василенко О.О. и др. *Активные фазированные антенные решетки*. Д.И. Воскресенский, А.Н. Канащенков, ред. Москва, Радиотехника, 2004, 488 с.
- [19] Голов Н.А., Савченко В.П., Усачев В.А. Радиофотоника в перспективных радиолокационных системах. *Радиотехника*, 2022, т. 86, № 8, с. 132–145. DOI: 10.18127/j20700784-202012-02. EDN SSR0UT

Статья поступила в редакцию 02.03.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Панеева А.П., Голов Н.А. Эволюция межпланетных миссий радиолокационных исследований планет Солнечной системы с учетом развития бортовых радиолокационных средств космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-5-2276>

Панеева Александра Павловна — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: pap191075@student.bmstu.ru

Голов Николай Александрович — начальник отдела Центра перспективных междисциплинарных исследований МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: golov@bmstu.ru

Evolution of the radar research interplanetary missions on the Solar System planets taking into account development of the spacecraft onboard radar systems

© A.P. Paneeva, N.A. Golov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper gives a detailed retrospective review of radio studies of the Solar system planets. The history of missions and the evolution of the spacecraft designed for radar research are considered. It presents analysis of the options in constructing the existing spacecraft radar facilities for interplanetary research. On the basis of this analysis, the appearance of a new generation of radar equipment for interplanetary research missions is proposed. Principles of construction and technical solutions for creation of the onboard radar equipment for the promising research spacecraft were determined. Promising missions of the Venus radar survey were analyzed, and approaches to construction of the spacecraft radar equipment based on the advanced technical solutions were proposed.

Keywords: interplanetary mission, Venus radar survey, planetary radar survey spacecraft, synthetic aperture radar

REFERENCES

- [1] Marov M.Ya., Huntress W.T. *Soviet robots in the Solar system. Technologies and discoveries*. Springer Praxis Books, 2011 [In Russ.: Marov M.Ya., Khantriss U.T. *Sovetskie roboty v Solnechnoy sisteme. Tekhnologii i otkrytiya*. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017, 612 p., ISBN 928-5-9221-1741-8].
- [2] Golov N.A., Usachev V.A., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Perspektivnye tekhnologii sozdaniya kosmicheskogo kompleksa radiolokatsionnogo zondirovaniya Zemli na baze malykh kosmicheskikh apparatov i raket-nositeley legkogo klassa [Promising technical solutions for the space complex of the Earth's radar sensing based on small spacecraft and light-class launch vehicles]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 5 (89), p. 9. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1881>. EDN WBNBCT.
- [3] Kasaba Y., Bougeret J.-L., Blomberg L.G., Kojima H. The plasma wave investigation (PWI) onboard the BepiColombo/MMO: First measurement of electric fields, electromagnetic waves, and radio waves around Mercury. *Planetary and Space Science*, January 2010, vol. 58(1–2), pp. 238–278. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.07.017>
- [4] Kolosov M.A., Yakovlev O.I. Resultaty radioprosvechvaniya neytralnoy atmosfery Venery i bistaticheskoy lokatsii ee poverkhnosti pri pomoschi sputnikov “Venera–9, 10” [Results of radio sounding of the neutral atmosphere of Venus and bistatic radar study of its surface with the aid of the satellites “Venera–9, 10”]. *UFN – Physics Uspekhi*, 1977, vol. 123, no. 4, pp. 697–698.
- [5] *Razvitie sistem i metodov dvukhpositsionnogo zondirovaniya atmosfer, poverkhnostey, grunta Venery, planet i ikh sputnikov, s pomoschyu bortovykh i nazemnykh radiosredstv, a takzhe moschnykh istochnikov kilometrovogo i dekametrovogo radioizlucheniya (Solntse, Zemlya, Yupiter, Saturn i dr.)* [Development of systems and methods of two-position sounding of atmospheres, surfaces, soil of Venus, planets and their satellites, using airborne and ground-based

- radio equipment, as well as powerful sources of kilometer and decameter radio emission (Sun, Earth, Jupiter, Saturn, etc.). *Otchet o NIR (zaklyuchitelnyi)* [Research report (final)]. No. GR 01201268739. V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch). A.G. Pavelyev, works supervisor. Fryazino, 2015, 32 p. Available at: <http://cplire.ru/rus/reports/2014/0030-2014-0090.pdf> (accessed: February 23, 2023).
- [6] Häusler B., Pätzold M., Tyler G.L., Simpson R.A. Radio science investigations by VeRa onboard the Venus Express spacecraft. *Planetary and Space Science*, 2006, vol. 54 (13–14), pp. 1315–1335. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.04.032>
- [7] Nigar Shaji. *Venus orbiter mission to study surface, atmosphere and plasma environment*, 2019. Available at: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/meetings/archive/vexag-17/presentations/Nigar.pdf> (accessed February 23, 2023).
- [8] Shukrayaan-1: News and Updates. *Strategic Front Forum*. Available at: <https://www.strategicfront.org/forums/threads/shukrayaan-1-news-and-updates.3622/> (accessed February 15, 2023).
- [9] Hensl S., Smrekar S., Shaffer S., Paller M. VISAR: A Next Generation Interferometric Radar for Venus Exploration. California Institute of Technology, Venus Lab and Technology Workshop at Houston, TX, September 2015. <https://doi.org/10.1109/APSAR.2015.7306225>
- [10] *Prorabotka predvaritel'noy programmy eksperimentov na orbital'nom, spuskaemom-posadochnom apparatakh i subsputnile proekta "Venera-D". Itogovyi nauchno-tekhnicheskiy otchet o NIR "Venera-D"* [Elaboration of the preliminary program of experiments on the orbital, descent-landing vehicles and subsatellite of the Venera-D project. Final scientific and technical report on the "Venera-D" R&D]. No. GR F 40946. Federal State Budgetary Institution of Science Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (SRI RAS). Moscow, SRI RAS Publ., 2012, 220 p. Available at: <http://venera-d.cosmos.ru/uploads/media/Venera-D-2012.pdf> (accessed February 23, 2023).
- [11] Zasova L., Gregg T., Burdanov A., Economou T. Venera-D: expanding our horizon of terrestrial Planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *EPSC Abstracts*, 2019, vol. 13, EPSC-DPS2019-1938-1.
- [12] Ghail R.C., Wilson F., Widemann T. EnVision M5 Venus Orbiter Proposal: Opportunities and Challenges. *American Astronomical Society, DPS meeting #48*, vol. 48, 01.10.2016.
- [13] Ghail R.C., Wilson F., Widemann T. VenSAR, the Revolutionary Radar for the EnVision Mission to Venus. In: *48th Lunar and Planetary Science Conference*, held 20–24 March 2017, at The Woodlands, Texas, 48, 2805.
- [14] Krupenio N.N. *Radiofizicheskie issledovaniya Lunny i planet* [Radiophysical studies of the Moon and planets]. Moscow, Znanie Publ., 1976, 64 p.
- [15] Bin Zhou, Shaoxiang Shen, Wei Lu, Qing Liu. The Mars rover subsurface penetrating radar onboard China's Mars 2020 mission. *Earth and Planetary Physics*, July 2020, vol. 4(4), pp. 1–10. <https://doi.org/10.26464/epp2020054>
- [16] Witasse O., the JUICE Teams: JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer): A European mission to explore the emergence of habitable worlds around gas giants. In: *Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September–9 Oct 2020*. EPSC2020-76. <https://doi.org/10.5194/epsc2020-76>
- [17] RADAR. Cassini Orbiter. NASA. Available at: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/mission/spacecraft/cassini-orbiter/radio-detection-and-ranging/radar-technical-write-up/> (accessed February 15, 2023).

- [18] Bratchikov A.N., Vasin V.I., Vasilenko O.O., et al. *Aktivnye fazirovannye antennye reshetki* [Active phased array antennas]. D.I. Voskresenskiy, A.N. Kanaschenkov, eds. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004, 488 p.
- [19] Golov N.A., Savchenko V.P., Usachev V.A. Radiofotonika v perspektivnykh radiolokatsionnykh sistemakh [Radiophotonics in perspective radar systems]. *Radiotekhnika — Radioengineering*, 2022, vol. 86, no. 8, pp. 132–145. <https://doi.org/10.18127/j20700784-202012-02>. EDN SSROUT.

Paneeva A.P., Student, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: pap191075@student.bmstu.ru

Golov N.A., Department head, Research center for Advanced Interdisciplinary Research, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: golov@bmstu.ru