

УДК 629.786

## АЭРОСТАТНЫЙ ЗОНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

© 2025 г. К. В. Сысоев<sup>a\*</sup>, Д. С. Хмель<sup>a</sup>, Е. Н. Слюта<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Акционерное общество “Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина”,  
Московская область, г. Химки, Россия

<sup>b</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,  
Москва, Россия

\*e-mail: sysoevvk@laspace.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024 г.

После доработки 22.04.2024 г.

Принята к публикации 15.08.2024 г.

На основании успешных посадок на поверхность посадочных аппаратов (ПА) и ввода в плавание аэростатных зондов (АЗ) обоснована целесообразность исследования Венеры дрейфующим в облачном слое ее атмосферы АЗ с использованием кратковременных снижений и посадок на ее поверхность. Проведено математическое моделирование, подтверждающее реализуемость кратковременных снижения АЗ с комплексом научной аппаратуры (КНА) в термостатированном отсеке для отбора проб грунта, аэрозолей и газов и дистанционного зондирования (ДЗ) в различных, удаленных друг от друга регионах у поверхности планеты Венера для их анализа в течение длительного дрейфа на высоте облачного слоя. На примере отдельных приборов КНА для геохимических и геофизических исследований пород Венеры показаны сценарий и возможности АЗ, которые значительно расширяют как диапазон решаемых научных задач, так и возможности самой научной аппаратуры.

**Ключевые слова:** атмосфера, Венера, спускаемый аппарат, аэростат, конденсация пара, дрейф, снижение, всплытие, пробы грунта, пенетратор, грунтозаборное устройство

DOI: 10.31857/S0320930X24060023, EDN: NIJYJF

### ВВЕДЕНИЕ

НПО Лавочкина успешно осуществило запуск межпланетных космических аппаратов (МКА) серии В-72 Венера-7 и -8 к Венере с посадкой спускаемых аппаратов (СА) на поверхность планеты, запущенные затем МКА серии 4В Венера-9, -10 и серии 4В1 Венера-11, -12, а также серии 4В1М Венера-13, -14, осуществили ввод и торможение в верхних слоях атмосферы СА, которые после сброса оболочки с теплозащитным покрытием (ТЗП), отделяли посадочные аппараты (ПА), осуществлявшие посадку на поверхность Венеры. КА серии 5ВК (ВЕГА) при вводе СА, кроме ПА отделили аэростатный модуль (АМ) с аэростатным зондом (АЗ), после наполнения оболочки которого,

в плавание была введена плавающая аэростатная станция (ПАС), которая совершила дрейф в течение более двух суток в атмосфере Венеры на высоте около 55 км при температуре атмосферы менее 55°C (Sagdeev и др., 1986; Воронцов, Пичхадзе, 2009). Схема функционирования ПА и ПАС в атмосфере представлена на рис. 1. После отделения от СА ПА снижался на парашюте до высоты 50 км, а в дальнейшем — на тормозном щитке (Шубин, 2018). Датчики бортового комплекса научной аппаратуры (КНА) регистрировали данные атмосферы в условиях интенсивного нагрева. Около часа термоизолированный отсек обеспечил работу бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА), поглощая поток тепла при плавлении эйкозана.

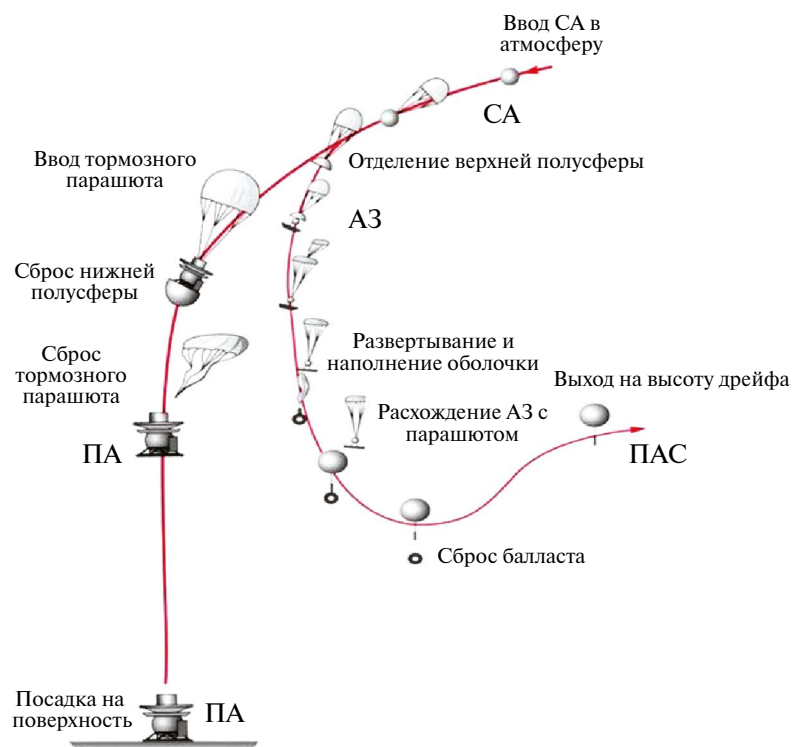


Рис. 1. Схема движения СА и ПА КА ВЕГА (Sagdeev и др., 1986; Воронцов, Пичхадзе, 2012).

Аэростатный зонд (АЗ) отделился от СА, с использованием парашютной системы (ПС) снизил скорость до 5 м/с. После извлечения оболочки из контейнера и наполнения ее гелием ПАС отделилась от АЗ и после сброса балласта всплыла на равновесную высоту. При дрейфе на высоте свыше 54 км в течение 48 ч бортовая аппаратура не перегревалась и проводила исследования параметров атмосферы (Воронцов и др., 2012).

Экстремальные условия на поверхности Венеры и ограниченная несколькими часами живучесть БРЭО ПА не позволяют осуществлять необходимые долговременные исследования состава и свойств пород Венеры в соответствии с требованиями современных научных задач и с учетом применяемых в КНА физических методов анализа и накопления данных измерений. Например, в рентгеновском дифрактометре и флуоресцентном спектрометре, чем больше время экспозиции анализа образца, тем выше разрешение и точность измерений. Ситуация еще более усугубляется, когда требуется забор и анализ нескольких различных образцов (пыли, измененных и неизмененных пород), что накладывает крайне жесткие условия на чувствительность прибора с зарядовой

связью, т.е. ПЗС-матрицы, и на алгоритмы усиления параметра “полезный сигнал/шум”. Короткоживущие стационарные посадочные аппараты также значительно ограничивают или делают невозможным проведение геофизических измерений на поверхности Венеры, требующих, например, перемещения антенн и размещения детекторов в разных местах на поверхности.

На современном этапе исследования Венеры требуется разработка проектов аэростатных зондов (АЗ) нового поколения, которые позволили бы в течение одной миссии обеспечить после спуска на СА в атмосферу Венеры выполнение следующих приоритетных научных задач.

1. Опробование разных геологических структур, характеризующихся разной высотой и рельефом (тессеры, вулканические структуры различных размеров, короны, вулканические равнины и др.).

2. Долговременный анализ собранных образцов пород Венеры с первичной обработкой данных в условиях герметичного отсека.

3. Анализ приповерхностных газов в местах отбора образцов породы для изучения геохимического выветривания пород при взаимодействии с газами атмосферы.

4. Проведение геофизических контактных измерений (теплофизические и электромагнитные свойства пород, геоэлектромагнитная структура и строение пород на глубину десятков и сотен метров, сейсмическая активность и пр.) с перемещением антенн на поверхности и размещением в местах посадок простейших автономных геофизических детекторов (термодатчиков, электромагнитных датчиков, геофонов) с ресурсом работы в условиях Венеры от одних земных суток до 1–2 месяцев.

5. Проведение анализа химического, молекулярного и изотопного состава газов и аэрозоля атмосферы на разных высотах для каждого цикла снижения аэростата до поверхности, а также измерение профилей основных параметров атмосферы (температура, давление и т.д.).

6. Долговременное исследование на высоте полета 50–60 км химического, молекулярного и изотопного состава газов, а также аэрозолей, углеводородных и органических соединений. Вышеперечисленные научные задачи в комплексе позволят получить ответ на многие фундаментальные проблемы геологической эволюции Венеры (Wilson и др., 2022; Widemann и др., 2023).

В рамках данной работы рассматривается проект комбинированного аэростатного зонда нового поколения, который позволит совместить функции аэростата для исследования атмосферы Венеры и многоразового посадочного аппарата для геохимических и геофизических исследований пород на поверхности, и который удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям приоритетных научных задач исследования Венеры на современном этапе.

#### НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ АЭРОСТАТА С ФУНКЦИЕЙ МНОГОРАЗОВОГО ПОСАДОЧНОГО АППАРАТА

Прежде всего, после отделения от СААМ введет в плавание аэростат на высоте от 60 до 50 км где температура атмосферы Венеры находится в пределах  $\pm 50^\circ\text{C}$  (рис. 2) (Crisp, Titov, 1997; Лемешевский и др., 2017; Воронцов и др., 2010).

Цель предлагаемого аэростата изучать атмосферу и поверхность Венеры на различных высотах, долготях и широтах.

Задача аэростата обеспечивать работу научных приборов и передачу данных на ретранслятор в течение продолжительного дрейфа в нормальных температурных условиях на высоте свыше 50 км с периодическими снижениями

к поверхности в течение трех часов в нагретые до  $470^\circ\text{C}$  слои атмосферы Венеры с посадкой на поверхность для забора образцов грунта и последующим всплытием на высоту, где температура не превышает  $70^\circ\text{C}$ .

Возможность создания стойкой оболочки, наполненной гелием для плавания в широком диапазоне высот от поверхности до облачного слоя Венеры с удельной массой материала около  $0.5 \text{ кг/м}^3$ , обоснована исследованиями по созданию термостойких тканепленочных материалов (Yavrouian и др., 1999) для мягких оболочек и с использованием жесткого металлического силофона (Yavrouian и др., 2012).

Во время кратковременных спусков на поверхность в термостатированном отсеке гондолы необходимо поддерживать условия, приемлемые для функционирования систем электроснабжения и аппаратуры, предназначенной для исследования проб атмосферы, грунта, видеосъемки поверхности Венеры и других научных задач (Kerzhanovich и др., 2005). При посадке на поверхность должен производиться забор образцов грунта и газа у поверхности, должны проводиться контактные геофизические измерения теплофизических и электромагнитных свойств пород, и, при необходимости, сброс на поверхность малой автономной геофизической станции. В течение длительного дрейфа аэростата на высоте обеспечивается проведение длительных исследований отобранных проб пород и газов и сбор научных данных в облачном слое в нормальных температурных условиях с энергоснабжением от солнечных батарей.

Грунтозаборное устройство должно обеспечивать забор образца отложений пыли на поверхности, забор образца корки выветривания породы на глубину до 0.5 см в виде измельченного буровой коронкой шлама, и образца шлама неизменной породы. С помощью грунтопередаточного устройства образцы грунта перемещаются в герметичный контейнер и распределяются для анализа между приборами КНА, например, рентгеновским дифракционным и флуоресцентным спектрометром, мессбауэровским спектрометром, лазерным ионизационным масс-спектрометром, газовым хроматографом — масс-спектрометром, рамановским спектрометром высокого разрешения и др. КНА для анализа грунта формируется из приборов в зависимости от их приоритета, который оценивается по каждому прибору, исходя из решения основной задачи — наиболее полного анализа химического и минерального состава

пород Венеры. Например, рентгеновский дифракционный и флуоресцентный спектрометр (РДРФС), разрабатываемый в ГЕОХИ РАН для посадочного модуля КА Венера-Д, имеет один из наиболее высоких приоритетов и совмещает два метода — качественный рентгено-флуоресцентный анализ основных петрохимических элементов (кроме Na) с пределом обнаружения около 1% и количественный рентгеноструктурный анализ минеральных фаз с пределом обнаружения около 3%. В процессе работы коллимированный рентгеновский луч от рентгеновской трубки направляется через измельченный материал образца весом около 150 мг, расположенный в специальном держателе, на чувствительную к рентгеновским лучам ПЗС-матрицу, которая фиксирует дифракцию и флуоресценцию исследуемого образца. Время экспозиции пробы и накопления импульсов в ПЗС-матрице в РДРФС на предлагаемом аэростате не ограничивается одним часом, как на короткоживущем стационарном посадочном аппарате, а оптимизируется для получения данных с максимальным разрешением для каждого образца. Количество держателей образцов вместо четырех для стационарного посадочного аппарата, включая один стандартный образец для калибровки, может быть увеличено без существенного увеличения массы прибора до нескольких десятков для анализа образцов с десяти и более мест посадок. В отличие от измерений на посадочных автоматических станциях Венера-13, Венера-14 и ВЕГА-2 с приборами предыдущего поколения, разработанными в ГЕОХИ АН СССР (Сурков, 1985), прибор РДРФС впервые позволит определить не только качественный состав основных петрохимических элементов, но и количественный минеральный состав, который необходим для точного определения типа породы, и, соответственно, условий ее образования и эволюции локальных и региональных геологических структур Венеры в районе посадки АЗ. Определение химического и минерального состава породы также позволит выяснить степень и характер выветривания данной породы и проследить геохимическую эволюцию выветривания пород и выявить основные факторы среды, влияющие на преобразование горных пород на поверхности.

Для исследования подповерхностной структуры пород Венеры ГЕОХИ РАН в кооперации с ООО “Таймер” рассматривает моноимпульсный сверхширокополосный георадар (Gulevich и др., 2021). Достижение максимально

возможной глубины и высокой разрешающей способности метода зондирования достигается следующими основными способами:

- 1) использованием мощного моноимпульсного передатчика с наносекундным передним фронтом зондирующего импульса;

- 2) регистрацией сигнала в его собственном спектре частот, без стробоскопического преобразования сигнала в область низких частот;

- 3) использованием антенн с распределенной резистивной нагрузкой (Суворова и др., 2023). Для исследования подповерхностных структур на глубину до 100 м и более аппаратура должна иметь динамический диапазон около 180 дБ и две антенны длиной от 4 до 10 м (лента с дорожками), размещенных параллельно, которые аэростатный зонд должен протащить по поверхности несколько десятков метров по ветру во время посадки или взлета.

Для контактных электромагнитных исследований пород предлагается датчик магнитной восприимчивости (ДМВ) в плоском исполнении размером  $5 \times 10$  см, принцип работы которого основан на регистрации изменений резонансной частоты электромагнитного контура при попадании минеральных магнитных частиц (магнетит, металлическое железо) в активную зону датчика. Для измерений достаточно опустить датчик на поверхность на несколько секунд или минут. Аналогичный датчик в скважинном исполнении разрабатывается в ГЕОХИ РАН для лунного каротажного зонда (Слюта и др., 2021). Магнитные свойства пород определяются содержанием ферромагнитных минералов и частиц (магнетит, металлическое железо) и парамагнитных породообразующих минералов с содержанием в составе железа  $\text{Fe}^{+2}$ . В земных породах основным носителем остаточной намагниченности является магнетит ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}$  72.4%), а его содержание в разных типах пород разное. Кроме информации о наличии и содержании в породах Венеры ферромагнитных минералов и о типе породы будут получены данные о магнитных свойствах пород в экстремальных условиях Венеры.

Датчик диэлектрической проницаемости (ДДП) в плоском исполнении и аналогичных размеров с ДМВ располагается в одном блоке вместе с датчиком ДМВ. Принцип работы датчика основан на регистрации напряжения на выходе RC-делителя, которое зависит от емкости конденсатора — активной зоны датчика (Слюта и др., 2021). Основная задача ДДП — определение коэффициента диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  пород Венеры на поверхности.

В измерительном блоке электромагнитных датчиков также устанавливаются два термодатчика для определения температуры пород на поверхности. При контакте с породой ДМВ, ДДП и термодатчики проводят измерения циклически по очереди.

Одной из важных научных задач также является измерение векторной величины трех компонент магнитного поля у поверхности, обусловленного, например, остаточной намагниченностью пород Венеры, несущих информацию о существовании и свойствах древнего магнитного поля во время их образования и его ориентировки относительно локальных и региональных геологических структур. Для векторных измерений наиболее простым, удобным и технологичным является феррозондовый трехкомпонентный магнитометр, который устанавливается на выносной штанге.

Следует отметить, что вышеописанные полноценные геофизические измерения электромагнитных свойств пород в разных местах посадок возможны только на комбинированном аэростатном зонде. Результаты измерений термодатчиков совместно с данными ДМВ, ДДП, магнитометра, георадара, РДРФС и других приборов будут использоваться для анализа химического и минерального состава и оценок электромагнитных и других физических свойств пород Венеры.

КНА для исследования атмосферы должен обеспечивать измерение профилей основных параметров атмосферы (температура, давление, степень освещенности и т.д.) на разных высотах для каждого цикла снижения аэростата до поверхности и исследование химического, молекулярного и изотопного состава газов атмосферы, а также аэрозолей и углеводородных и органических соединений в облачном слое. В состав КНА для исследования атмосферы могут быть включены метеокомплекс, спектрометр аэрозольных частиц, диодно-лазерный спектрометр, газовый хроматограф, газовый анализатор-масс-спектрометр, прибор для регистрации грозových разрядов, ИК- и УФ-спектрометры и др.

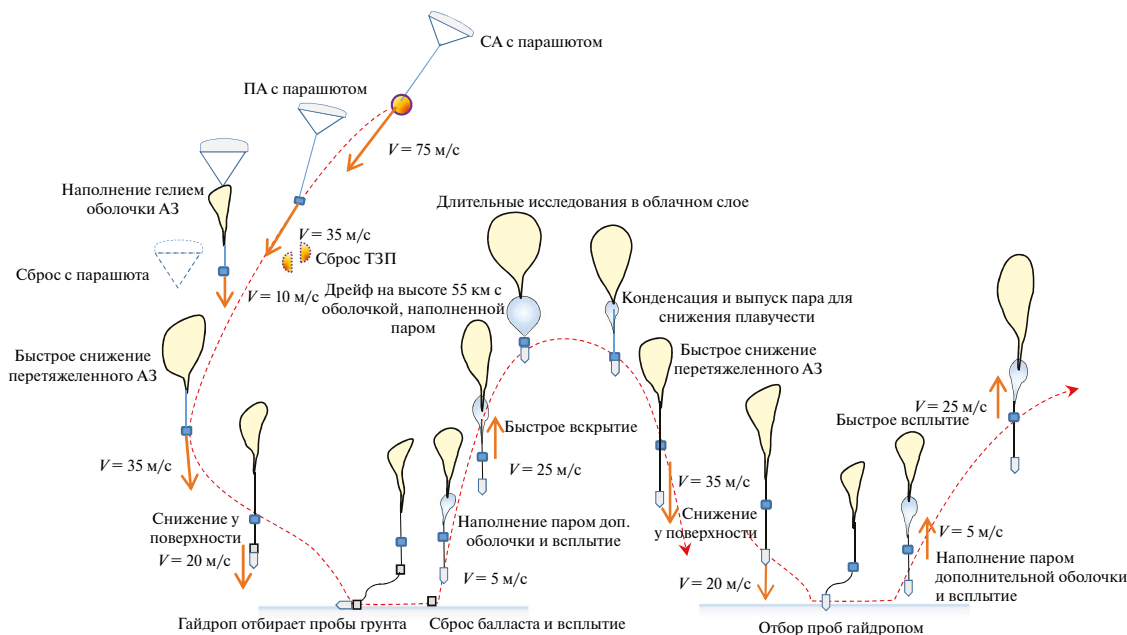
## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ АЭРОСТАТА

Снижение плавучести может достигаться за счет выпуска части несущего газа из оболочки аэростата, а ее увеличение при сбросе запаса балласта. В ряде работ по аэростатам Венеры было предложено (Москаленко, 1978; Кремнев и др., 1985; Подгорный др., 1988) использовать

переход жидкости в пар, происходящий в результате ее нагрева при уменьшении высоты и увеличении температуры для осцилляций высоты в определенном диапазоне за счет циклических фазовых переходов жидкости в пар и обратно (Izutsu и др., 2004; Jones, 1995). В данной статье предложено после снижения на поверхность и забора проб подавать в оболочку перегретый пар для всплытия из прочного и герметичного бака с водой, разогретой до кипения (Dorrington, 2010). После всплытия регулировка количества пара обеспечит поддержание высоты и повторный спуск для отбора проб. Схема плавания аэростата представлена на рис. 2.

Для кратковременного (в течение нескольких минут) отбора проб грунта предлагается использовать закрепленное на свисающем тросе (гайдропе) к ПА пенетрирующее устройство с механическим заборником грунта, снабженное контактными датчиками для исследования грунта при соприкосновении с ним. После расчистки пенетратором поверхностного слоя заборник забирает пробы грунта в виде измельченного буровой коронкой шлама в капсулу для дальнейших исследований и проводит экспресс анализ образцов породы с поверхности, и образца шлама породы с глубины. Для ДЗ при плавании вблизи поверхности предлагается использовать многоканальную спектральную ТВ-камеру высокого разрешения в видимом диапазоне, расположенную в термоизолированном отсеке КНА гондолы аэростата, а также забор проб газов и аэрозолей для анализа состава атмосферы на высотах от 60 км до поверхности Венеры. Для термостатирования БРЭО и бортовые системы закрепляют в вакуумированном отсеке с термоизолирующим покрытием на опорах из поглощающего тепло при плавлении и выделяющем его при затвердевании вещества — теплового аккумулятора, предохраняя их от соприкосновения с нагретыми стенками. Системы термостатирования КНА с использованием теплового аккумулятора, охлаждаемого после всплытия для повторного использования фазового перехода, должны обеспечить отвод тепла в нижних слоях атмосферы в течение двух–трех часов и работу на поверхности в течение 10 мин. Для этого его пребывание в нагретых слоях атмосферы со снижением к поверхности и всплытием должно длиться менее трех часов.

Плавучесть аэростата определяется отношением аэростатической силы к весу аэростата с газом. Моделирование снижения аэростата



**Рис. 2.** Схема движения СА и аэростатного зонда с ПА на гайдропе. Оболочка АЗ показана желтым цветом, гондола — синим, ТЗП СА — оранжевым.

при аэростатической силе, уравнивающей 0.8 веса, показывает, что аэростат через час достигает поверхности Венеры со скоростью около 20 м/с (см. раздел “Математическое моделирование...”).

После отбора проб и кратковременных исследований поверхности и нижних слоев атмосферы Венеры аэростат должен менее чем за два часа всплыть на высоту, где могут длительно функционировать его системы с температурой атмосферы менее 50°C. Для этого из высокопрочного термоизолированного бака с водой, нагретой до температуры 380°C пар воды (рис. 3) подается в дополнительную оболочку для обеспечения избытка плавучести 0.1 от веса за счет увеличения аэростатической силы с 0.8 до 1.1 веса.

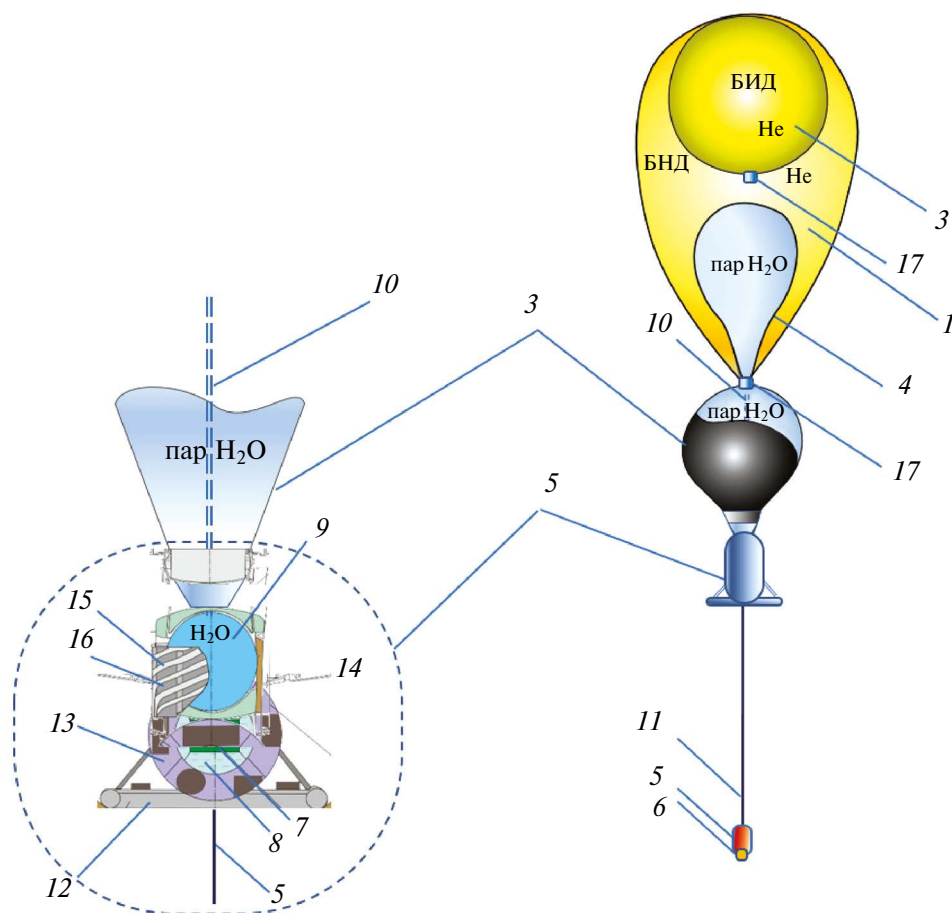
При увеличении высоты свыше 50 км снижение температуры атмосферы ниже 100°C и охлаждение пара приводит к тому, что он конденсируется, а избыток плавучести снижается с 0.1 до 0.05 от веса. При этом аэростат достигнет равновесной высоты после наполнения оболочки баллона избыточного давления (БВД) полностью.

На высоте свыше 53 км термоизоляция охлаждается, а вещество с обратимым фазовым переходом в тепловом аккумуляторе застывает. После всплытия до облачного слоя при

температуре атмосферы  $\pm 25^\circ\text{C}$  капсула с пробами грунта перемещается из пробоотборника пенетратора в термостатированный отсек КНА для проведения анализа и передачи полученных данных по каналам связи бортового радиокomплекса. Кроме того, при плавании в облачном слое приборы КНА осуществляют отбор и анализ аэрозолей облачного слоя, контактные исследования и ДЗ.

Нагрев солнечным светом дополнительной оболочки с высокой поглощающей способностью  $As > 0,75$  до  $90^\circ\text{--}100^\circ\text{C}$  будет способствовать нагреву пара. Тем не менее плавание в атмосфере, нагретой ниже  $100^\circ\text{C}$ , приведет к тому что пар будет конденсироваться, и конденсированная вода будет натекает в расположенный в нижней части оболочки аппендикс, из которого для снижения плавучести воду необходимо подавать в высокопрочный термоизолированный бак (рис. 3). Для увеличения плавучести вода из бака подается в змеевиковый радиатор, где за счет высокой поглощающей способности  $As > 0.75$  поверхности радиатора она нагревается и выделяет пар в оболочку. Поддержание температуры и объема пара обеспечит поддержание плавучести и всплытие на равновесную высоту с полностью наполненным БВД.

При дрейфе на ночной стороне температура дополнительной оболочки снижается



**Рис. 3.** Схема аэростата с посадочным аппаратом и грунтозаборником-пенетратором на гайдропе: 1 – баллон нулевого давления (БНД) с гелием с отражательной способностью его поверхности  $As < 0.15$ ; 2 – баллон избыточного давления при наполнении; 3 – дополнительная оболочка с паром воды из темного материала с  $As > 0.75$  с аппендиксом; 4 – отсек основной оболочки для наполнения паром и конденсирования пара; 5 – гондола с системами и амортизатором; 6 – пенетратор с грунтозаборным устройством и датчиками для контактного анализа грунта; 7 – БРЭО и КНА; 8 – крепление БРЭО и КНА с использованием плавления затвердевания вещества опор; 9 – термоизолированный бак с водой; 10 – подвес с трубопроводом для подачи воды в бак (9) с водой; 11 – гибкий гайдроп; 12 – торовая опора посадочного аппарата; 13 – внешняя термоизоляция отсека БРЭО; 14 – термоизоляция бака воды; 15 – спиральные трубы радиатора для нагрева воды; 16 – спиральная антенна бортового радиокомплекса; 17 – газперекачивающий агрегат с клапаном для впуска и выпуска газа.

до температуры окружающей среды и в результате конденсации пара аэростат теряет плавучесть и опускается в слой, нагретые свыше  $100^{\circ}\text{C}$ . В результате нагрева воды в змеевом радиаторе происходит парообразование и плавучесть возрастает. Это приводит к тому, что аэростат осуществляет всплытие до высоты, на которой БИД наполняется и ограничивает дальнейшее всплытие до высоты 55 км или выше в более холодные слои атмосферы, где температура атмосферы близка к  $0^{\circ}\text{C}$ . За счет конвективного теплообмена оболочка и радиатор охлаждаются, что вновь

приводит к уменьшению объема пара и потере плавучести аэростатом. Во время периодических снижений высоты при нагреве термостатируют отсек с БРЭО отводом тепла тепловым аккумулятором, который после всплытия на высоту, где температура атмосферы существенно меньше остывает. В результате аэростат периодически осуществляет осцилляции высоты – то поднимается на высоту свыше 55 км, то вновь опускается в нагретые слои атмосферы, регулируя избыток плавучести и объем пара в дополнительной оболочке в процессе генерации пара.

Аэростат дрейфует в потоках циркуляции атмосферы и переносится ветром на тысячи километров, что обеспечивает увеличение пространственной выборки отобранных образцов грунта при повторных посадках на поверхность Венеры.

Для увеличения равновесной высоты всплытия объем гелия увеличивают за счет подачи его из наполненного БИД в БНД (Hall и др., 2019). Для повторного снижения к поверхности аэростат вначале должен ее увеличить для всплытия в слои с более холодной атмосферой и интенсификации охлаждения и конденсации пара в воду. Для ускорения конденсации может использоваться выпуск пара из дополнительной оболочки в отсек основной оболочки, температура которой, благодаря высокой отражательной способности ее поверхности  $As < 0.15$ , не превышает  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , где он конденсируется в воду, которая стекает в ее аппендикс у основания и подается в высокопрочный термоизолированный бак. Для повышения интенсивности конденсации пара его прокачивают через радиатор в турбохолодильный агрегат, сконденсированная в нем вода также подается в высокопрочный термоизолированный бак. В результате снижения плавучести аэростата он вновь в течение часа снижается к поверхности планеты (рис. 4).

В результате повторения снижения и всплытия аэростат может многократно осуществлять кратковременные снижения до нижних слоев атмосферы и при необходимости достигать поверхности Венеры, всплывая затем на высоту свыше 50 км для охлаждения систем термостатирования и застывания в них вещества с обратимым фазовым переходом при термоизоляции отсека с БРЭО.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВАНИЯ АЭРОСТАТА

Для расчета высоты  $H(t)$  (м) и скорости  $V = \frac{dH}{dt}$  (м/с) аэростата по вертикали на рис. 4 и 5 в атмосфере Венеры использовалась математическая модель вертикального движения аэростата (Воронцов, Пичхадзе, 2012; Воронцов и др., 1988) как материальной точки под действием сил веса и подъемной силы Архимеда с учетом сопротивления среды, описываемая уравнением

$$(m + k\rho_a U) \frac{d^2 H}{dt^2} = U\rho_a g - mg - \frac{1}{2} c_x S_m \rho_a \left( \frac{dH}{dt} - W \right) \times \left| \frac{dH}{dt} - W \right|, \quad (1)$$

где  $m$  — масса аэростата (вместе с массой  $m_g$  подъемного газа, кг);  $H$  — высота над уровнем

поверхности;  $c_x$  — коэффициент сопротивления аэростата в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$ ;  $S_m$  — характерная площадь аэростата в зависимости от наполненности оболочки газом  $U_g/U_{max}$ ;  $\rho_a$  — плотность атмосферы;  $g$  — ускорение силы тяжести на высоте  $H$  от поверхности;  $k$  — коэффициент присоединенной массы;  $W$  — скорость вертикального ветра (м/с);  $U$  — объем аэростата ( $\text{м}^3$ ). Коэффициент сопротивления аэростата при воздействии потока по вертикали  $c_x$  вычислялся с учетом влияния числа Рейнольдса  $Re$ . В ненаполненной оболочке газ при атмосферном давлении  $P$  (Па) занимает объем  $U_g$ , который определяется массой  $m_g$ , температурой  $T_g$  (К) газа в оболочке и газовой постоянной гелия  $R = 2077$  Дж/(кг×К) в соответствии с уравнением:

$$\begin{aligned} \text{для } U_g < U_{max} \text{ при } P_g = P_a \quad U_g &= \frac{m_g R T_g}{P}; \\ \text{для } U_g = U_{max} \quad P_g &= \frac{m_g R T_g}{U_{gmax}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Объем оболочки увеличивается в пределах ее максимального объема  $U_{max}$ , а после ее заполнения в ней возрастает давление газа  $P_g > P$ , в соответствии с уравнением (2). При дрейфе на одной высоте температура газа оболочки  $T_g$  на ночной стороне близка к температуре атмосферы. При всплытии аэростата с увеличением высоты температура атмосферы  $T_a(H)$  в соответствии с моделью атмосферы VIRA (Avduevsky и др., 1983) уменьшается и перегрев гелия  $T_g/T_a(H)$  в оболочке по отношению к температуре атмосферы на текущей высоте  $T_a(H)$  по мере увеличения высоты до 55 км возрастает до 1.2 — 1.05 при всплытии в течение от 1 до 2 ч. Остывание газа оболочки в более холодной атмосфере с учетом теплообмена описывается уравнением:

$$\begin{aligned} T_g(t) &= T_a(H) + e^{-kt} (T_{g0} - T_a(H)) \\ \text{где } k &= \alpha(H)S / (m_g C_p), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S$  — площадь тела ( $\text{м}^2$ ),  $C_p$  — теплоемкость гелия ( $C_p = 5.2$  кДж/кг),  $m_g$  — масса гелия;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи гелия ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ ) принимает значения от 30,6 ( $476^{\circ}\text{C}$ ) до 14,7 ( $50^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от температуры,  $t$  — время пребывания в слое атмосферы с средней температурой атмосферы  $T_a(H)$ , (с),  $T_{g0}$  — температура газа оболочки.

На рис. 4 приведены высота и скорость погружения аэростата массой 1375 кг с неуравновешенной массой 275 кг с максимальным объемом 1800 м<sup>3</sup> на высоте 58 км и объемом 22.5 м<sup>3</sup> у поверхности для неосвещенной стороны.

На рис. 5 приведены высота и скорость всплытия для аэростата массой 1375 кг с объемом от 22.5 м<sup>3</sup> у поверхности до 1800 м<sup>3</sup> на высоте 58 км с избытком плавучести 0.1 при температуре гелия равной температуре атмосферы и с учетом остывания при всплытии нагретого у поверхности гелия.

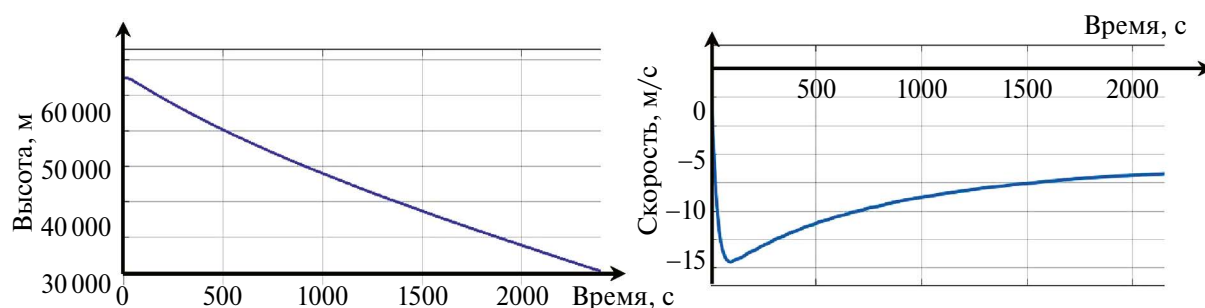
Таким образом, обосновано функционирование аэростата с погружением до поверхности в течение часа и всплытие на высоту в течение двух часов за счет перехода жидкости в пар при ее нагреве в высокотемпературных слоях атмосферы. При необходимости время подъема может быть сокращено до часа при возрастании плавучести до 1.2 при увеличении объема и массы

пара в оболочке. Исследование поверхности при кратковременном (в течение 2–3 ч) спуске может проводиться теплоизолированным с использованием обратимого фазового перехода (плавления) в тепловом аккумуляторе отсека КНА аэростатом.

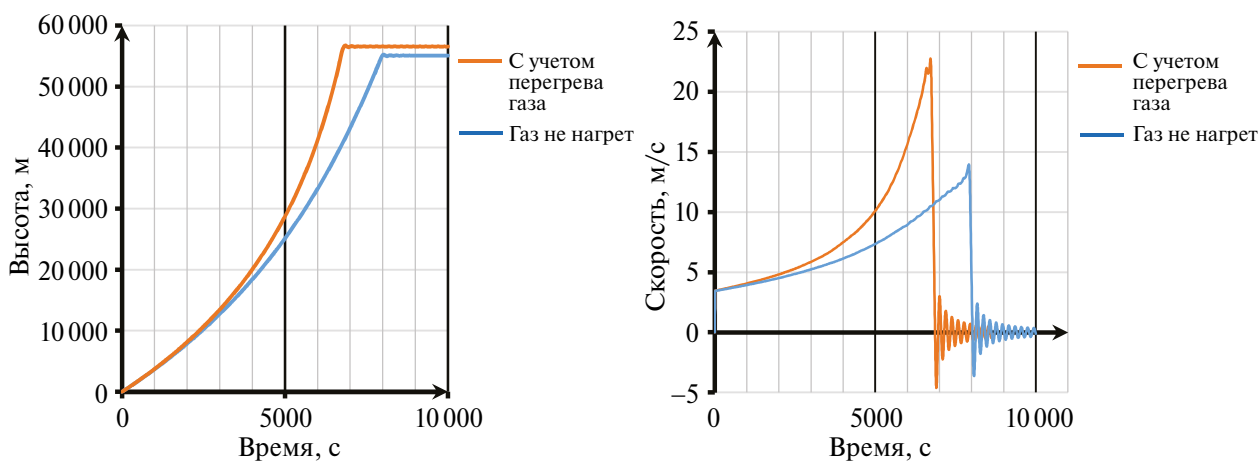
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитано движение аэростата при кратковременном спуске для исследований с отбором проб грунта у поверхности: снижение до поверхности при недостатке аэростатической силы 0.2 (20% от аэростатической силы, уравнивающей вес) в течение часа и всплытие с избытком плавучести 0.1 в течение двух часов для длительного дрейфа в облачном слое.

Предложено использовать для увеличения плавучести генерацию пара при подаче из высокопрочного бака с эндотермически нагретой



**Рис. 4.** Высота (слева) и скорость снижения (справа) при плавучести 0.8 для плавающей массы 1375 кг на ночной стороне.



**Рис. 5.** Высота и скорость всплытия для аэростата на ночной стороне с плавающей массой 1375 кг при избытке плавучести 0.1 и возрастании перегреве газа до 1.05 и для газа с температурой атмосферы (без учета нагрева газа при плавании ниже).

водой в оболочку. Предложено поддержание и регулирование плавучести и высоты при использовании нагретой солнечным светом оболочки с паром для плавания в облачном слое и снижение плавучести при всплытии в холодные слои атмосферы за счет конденсации пара из оболочки.

Для термостатирования БРЭО при многократных снижениях в высокотемпературные слои атмосферы Венеры в течение 2–3 ч предложено использовать термоизолированный отсек с тепловым аккумулятором обратимого типа.

Предложен способ забора грунта с использованием пенетратора подвешенного на гайдропе.

Создание АЗ для ввода в плавание рассмотренного аэростата позволит исследовать состав и параметры нижней атмосферы во время дрейфа, спуска и подъема, исследовать грунт на поверхности и проводить съемку поверхности во время спусков и подъемов, а также проводить анализ собранных с поверхности образцов грунта после всплытия в течение длительного дрейфа.

На примере отдельных приборов КНА для геохимических и геофизических исследований пород Венеры показаны сценарии и возможности АЗ, которые значительно расширяют как диапазон решаемых научных задач, так и возможности самой научной аппаратуры с учетом гораздо более долговременного анализа образцов грунта и данных по сравнению с классическими стационарными посадочными аппаратами.

Создание комбинированного АЗ нового поколения позволит совместить функции аэростата для исследования атмосферы Венеры и многоразового посадочного аппарата для геохимических и геофизических исследований пород на поверхности и обеспечить решение приоритетных научных задач исследования Венеры на современном этапе.

Работа выполнена при поддержке госзадания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов В.А., Дерюгин В.А., Карягин В.П., Кремнев Р.С., Кузнецов В.В., Ланкин В.М., Пичхадзе К.М., Роговский Г.Н., Тертерашивили А.В. Метод исследования планеты Венера с помощью плавающих аэростатных станций. Математическая модель // Космич. исслед. 1988. Т. 26. Вып. 3. С. 430–433.
2. Воронцов В.А., Пичхадзе К.М. Проектирование аэростатных зондов для исследования планет Солнечной системы. М.: Изд-во МАИ-Принт, 2009. 96 с.
3. Воронцов В.А., Лохматова М.Г., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М., Симонов А.В., Хартов В.В., Засова Л.В., Зеленый Л.М., Кораблев О.И. Перспективный космический аппарат для исследования Венеры. Проект “Венера-Д” // Вестн. “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2010. № 4. С. 62–67.
4. Воронцов В.А., Пичхадзе К.М. Методологические основы формирования схемных решений средств десантирования и дрейфа в атмосферах планет и их спутников // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Т. 1 / Ред.: Ефанов В.В., Пичхадзе К.М.М.: Изд-во МАИ, 2012. С. 9–54.
5. Воронцов В.А., Крайнов А.М., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М., Хартов В.В. Предложения по расширению программы исследований Венеры с учетом опыта проектных разработок НПО им. С.А. Лавочкина // Тр. МАИ. 2012. № 52. С. 13.
6. Кремнев Р.С., Карягин В.П., Балыбердин В.В., Клевцов А.А. Аэростаты в атмосфере Венеры. Киев: Наукова думка, 1985. 105 с.
7. Лемешевский С.А., Графодатский О.С., Карчаев Х.Ж., Воронцов В.А. Космические аппараты для контактных исследований планеты Венеры. Опыт и перспективы // Вестн. “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2017. № 2. С. 52–58.
8. Москаленко Г.М. Механика полета в атмосфере Венеры. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
9. Подгорный А.Н., Балыбердин В.В., Кремнев Р.С. Эндотермические аэростаты. Киев: Наукова думка, 1988. 125 с.
10. Сурков Ю.А. Космохимические исследования планет и спутников. М.: Наука, 1985. 310 с.
11. Слюта Е.Н., Маров М.Я., Дунченко А.Г., Маковчук В.Ю., Морозов О.В., Назаров А.И., Иванов В.В., Погонин В.И., Роскина Е.Г., Сафронов В.В., Харлов Б.Н., Тацкий Л.П. Эксперимент ТЕРМО-ЛР на посадочном аппарате Луна-27: изучение теплофизических, физико-механических и электромагнитных свойств лунного грунта // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 5. С. 454–475. (Slyuta E.N., Marov M.Ya., Dunchenko A.G., Makovchuk V.Yu., Morozov O.V., Nazarov A.I., Ivanov V.V., Pogonin V.I., Roskina E.A., Safronov V.V., Kharlov B.N., Tatsiy L.P. TERMO-LR experiment on the Luna-27 Lander: Study of thermophysical, physicomechanical, and electromagnetic properties

- of the lunar soil // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 55 № 5. P. 446–466.).
12. Суворова З.В., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Ахметов О.И., Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Резников А.Е. Моделирование распространения видеоимпульсных сигналов георадара в литосфере Земли // *Математич. моделир.* 2023. Т. 35. № 12. С. 31–50.
  13. Шубин П.С. Венера. Неукротимая планета. Кемерово: Изд-во “Голос-Пресс”, 2018. 352 с.
  14. Avduevsky V.S., Marov M.Ya., Kulikov Yu.N., Shari V.P., Gorbachevskiy A.Ya., Uspenskiy G.R., Cheremukhina Z.P. Structure and parameters of the Venus atmosphere according to Venera probe data // *Venus*. Tucson: Univ. Arizona Press, 1983. P. 681–765.
  15. Crisp D., Titov D. The thermal balance of the Venus atmosphere // *Venus II* / Eds: Bouger S.W., Hunt-ten D.M., Phillips R.J. Tucson: Univ. Arizona Press, 1997. P. 353–384.
  16. Dorrington G.E. Venus atmospheric platform options revisited // *Adv. Space Res.* 2010. V. 46 (3). P. 310–326.
  17. Gulevich O.A., Kaigorodov E.P., Lyakhov G.A., Reznikov A.E., Varenkov V.V., Volkomirskaya L.B. Experimental study of a deep oil and gas deposit by the method of reflected electromagnetic waves // *Phys. Wave Phenomena*. 2021. V. 29. № 4. P. 311–320.
  18. Izutsu N., Yajima N., Honda H., Imamura T. Venus balloons using water vapor // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. P. 1831–1835.
  19. Hall J.L., Cameron J., Pauken M., Izrailevitz J., Domingues M., Wehage K. Altitude-controlled light gas balloons for Venus and Titan exploration // JPL, California Institute of Technology, Pasadena, CA., 91109 // *AIAA Aviation Forum* 17–21 June 2019. US, Dallas: California Inst. Technology, 2019. P. 1–25.
  20. Jones J.A. Reversible fluid balloon altitude control concepts // *Proc. 11<sup>th</sup> Lighter-Than-Air Systems Tech. Conf.* Clearwater Beach, FL, 1995. <https://doi.org/10.2514/6.1995-1621>.
  21. Kerzhanovich V.V., Hall J.L., Yavrouian A.H., Cutts J.A. Dual balloon concept for lifting payloads from the surface of Venus 2005. DOI: 10.2514/6.2005-7322 <https://www.researchgate.net/publication/24335581>. JPL, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Dr., Pasadena, CA. 91109.
  22. Sagdeev R.Z., Linkin V.M., Blamont J.E., Preston R.A. The VEGA Venus Balloon Experiment // *Science*. 1986. V. 231. P. 1407–1408.
  23. Yavrouian A., Plett G., Yen S.P.S., Cutts J., Baek D. Evaluation of materials for Venus aerobot applications. JPL, California Institute of Technology Pasadena, California, 91109. DOI:10.2514/6.1999-3859.
  24. Yavrouian A., Yen S.P.S., Plett G., Weissman N. High temperature materials for Venus balloon envelopes. JPL California Institute of technology Pasadena, California, 1995 AIAA-95-1617-CD
  25. Wilson C., Widemann T., Ghail R. Venus: key to understanding the evolution of terrestrial planets // *Ex-periment. Astron.* 2022. V. 54. P. 575–595.
  26. Widemann T., Smrekar S.E., Garvin J.B., Straume-Lindner A.G., Ocampo A.C., Schulte M.D. et al. Venus evolution through time: key science questions, selected mission concepts and future investigations // *Space Sci. Rev.* 2023. V. 219. Id. 56.