

УДК 629.78

Проблемы моделирования посадок венерианских космических аппаратов для различных грунтов-аналогов

Буслаев С.П.*, Воронцов В.А., Графодатский О.С.*****

НПО имени С.А. Лавочкина,

ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия

* e-mail: se.bouslaev@yandex.ru

** e-mail: vorontsov@laspacespace.ru

*** e-mail: grafodatsky@laspacespace.ru

Аннотация

В статье рассматриваются проблемы, которые возникают при физическом и математическом моделировании посадки космических аппаратов на грунт Венеры. В этом случае для моделирования процесса посадки используются земные грунты-аналоги. В работе сравниваются районы посадок советских космических аппаратов «Венера -9, -14» и «Вега 1-2» и перспективные районы для посадки на Венеру будущих аппаратов, рассматриваются некоторые физические и математические модели, применявшиеся при разработке посадочных аппаратов. Целью данной работы является анализ проблем, возникающих при моделировании посадки космических аппаратов в новых районах Венеры, обсуждается возможность использования опыта, накопленного в АО «НПО Лавочкина».

Ключевые слова: посадка на Венеру, посадка на грунт, грунты-аналоги, бросковый стенд, модель посадки.

Введение

В последние годы российские и зарубежные учёные вновь проявляют интерес к изучению поверхности Венеры и прежде всего к изучению венерианского грунта [1, 2]. Этот интерес объясняется предположениями учёных, что в местах тектонических процессов, деформировавших поверхность планеты в прошлом, удастся обнаружить выходы древних пород Венеры, которые помогут пролить свет на историю формирования планеты. В связи с этим в настоящее время рассматриваются различные проекты для доставки космических аппаратов к Венере, чтобы осуществить посадки на грунт в районах, где отмечены следы происходивших в прошлом тектонических процессов [3, 4, 5]. Следует заметить, что эти районы являются гораздо более сложными и опасными для посадки на грунт, чем это было при предыдущих посадках.

Целью настоящей работы является рассмотрение некоторых проблем, возникающих при осуществлении будущих посадок аппаратов в новых районах Венеры и при наземном моделировании посадок, а также анализ опыта, накопленный в АО «НПО Лавочкина» при проведении испытаний и при реализации посадок КА «Венера 9-14» и «Вега -1, -2». Этот опыт может оказать помощь при подготовке будущих экспедиций к Венере.

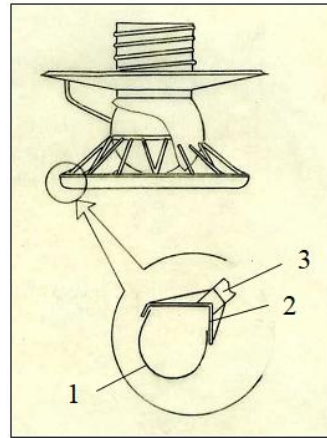
Посадки советских космических аппаратов на Венеру и новые районы посадки

Посадка КА «Вега-2» 15 июня 1985 года завершила пятнадцатилетнюю серию успешных посадок из десяти советских аппаратов на поверхность Венеры. С тех пор

прошло уже более 30 лет и до настоящего времени повторных посадок космических аппаратов на венерианский грунт больше не было. Общий вид посадочных аппаратов типа «Венера 9-14» и «Вега -1, -2» показан на рисунке 1.



a



б

Рис. 1. Посадочный аппарат «Венера 8-14» и «Вега 1-2»:
a – фотография посадочного аппарата; *б* – схема посадочного устройства: 1 – деформируемая оболочка, 2 – шпангоут, 3 – ферма крепления

Конструктивно посадочный аппарат крепился к амортизирующей тороидальной оболочке, которая при ударе о грунт деформировалась и поглощала кинетическую энергию КА.

Анализ радиолокационных снимков поверхности Венеры показал, что все советские космические аппараты сели в районах с преобладанием равнинных типов венерианской местности. Рельеф этой местности отличается от рельефа местности с новыми районами посадки. Местность с новыми районами посадки получила название «тессера», что в переводе с греческого означает черепица. Рельеф тессеры представляет собой совокупность пересекающихся гряд и борозд, высота гряд может достигать 1-2 км, уступов до 1 км, а углы склона поверхности могут доходить

до 30 градусов [6,7,8]. Примеры местности тессеры показаны на радиолокационных снимках поверхности Венеры на рисунке 1.

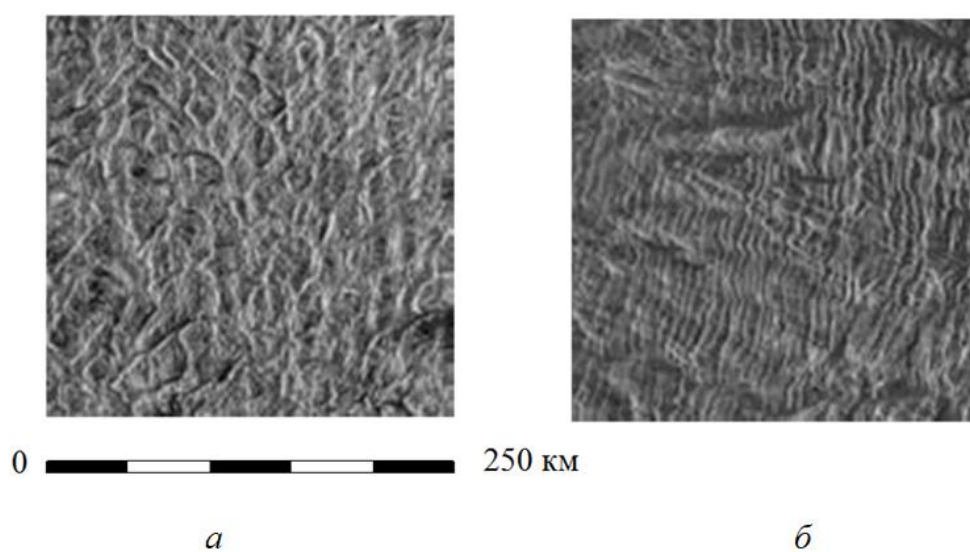


Рис. 2. Типичный рельеф местности типа тессера на снимках Венеры: а, б

На рисунке 2 для сравнения приведён снимок местности в районе равнины Гиневры.

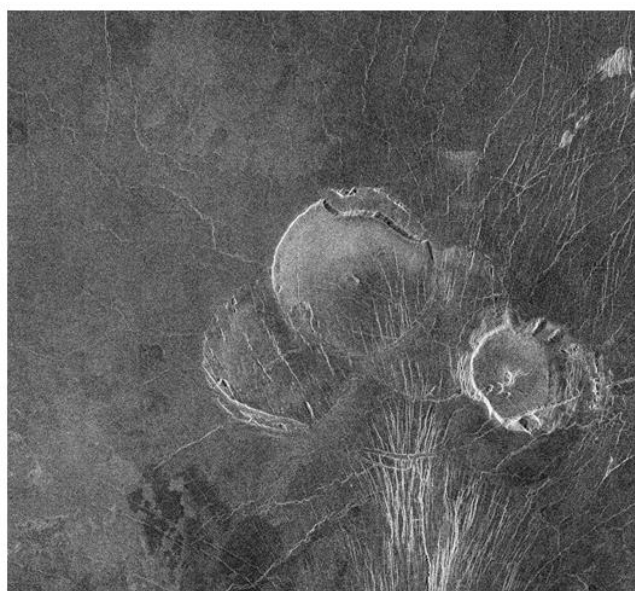


Рис. 3. Рельеф местности в районе равнины Гиневры

Моделирование посадки советских КА «Венера 9-14» и «Вега 1-2»

Отработка посадки космических аппаратов на Венеру происходила на физических и математических стендах. Физические стенды для отработки посадки КА на Венеру представляли собой испытательные стенды для бросковых испытаний посадочных аппаратов. На этих стендах динамически подобная модель посадочного аппарата поднималась на определённую высоту и сбрасывалась на посадочную площадку, изготовленную из модели грунта Венеры, называемую грунтом-аналогом. В испытаниях варьировался угол наклона продольной оси ПА относительно гравитационной вертикали и угол наклона посадочной площадки, который соответствовали принятой модели макрорельефа Венеры (угол склона).

Основными целями этих испытаний являлось[9]:

- определение устойчивости ПА от переворота при ударе о склон;
- определение перегрузок и проверка конструкции ПА на прочность;
- отработка конструкции посадочного аппарата, выбор конструкции посадочного устройства
- испытания в обеспечение разработки математической модели посадки – калибровка математической модели и т.п.;
- комплексные испытания ПА на функционирование в момент удара о поверхность грунта.
- изучение процесса взаимодействия КА с поверхностью венерианского грунта.

На рисунке 4 показан стенд для испытаний посадки физической модели посадочного аппарата «Вега-1,-2» на деформируемые грунты [10]. Этот стенд использовался для калибровки и отладки математической модели ударного внедрения посадочного аппарата в грунт. Для этих бросковых испытаний не использовалась полностью динамически подобная модель - была взята модель с геометрическим масштабным коэффициентом $K_L=1/8$.

Испытательный стенд состоял из несущего каркаса 1, маятниковой подвески 2, фонового щита с нанесённой координатной сеткой 4 и контейнера с имитатором грунта 5. Электромагнит 3 или механический замок, установленный на маятниковой подвеске, фиксирует модель КА 6 на подвеске и отделяет модель в определённый момент времени. Маятниковая подвеска позволяет получать вертикальную скорость 2,9-3,9 м/с и горизонтальную скорость 0,35-0,46 м/с, поворотный контейнер с имитатором грунта может устанавливаться под разными углами к горизонтальной плоскости. В момент соударения модели с грунтом измерялась перегрузки в направлении её продольной оси.

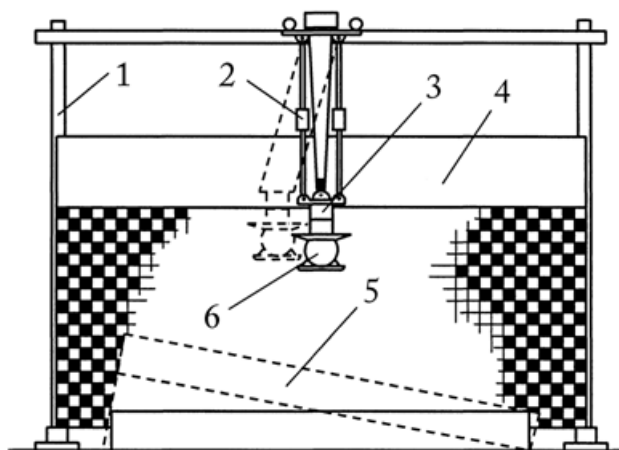


Рис. 4. Стенд для отработки математической модели посадки КА «Вега-1,-2» на деформируемые грунты

В испытаниях модель сбрасывалась на несколько типов грунтов-аналогов, которые получались различными комбинациями песчаного основания, пенопластовой плиты, второго слоя песка поверх пенопластовой плиты и блоков пенобетона размером $0,04 \times 0,04 \times 0,02$ м, лежащих на втором слое песка. В качестве рыхлого грунта применялся мелкозернистый песок с размером частиц песка до $8 \cdot 10^3$ м.

Как и следовало ожидать, модель грунта-аналога существенно влияла на динамику движения КА при ударе о грунт и на результаты посадки – уровень перегрузок при ударе, устойчивость аппарата (переворот или не переворот КА).

Наряду с физическими стендами для испытаний физических моделей посадочных аппаратов применялись математические модели процесса посадки на грунты. Использование математических моделей проиллюстрировано на рисунке 5. На рисунке показано: *а* – представление деформируемой оболочки при посадке на недеформируемый грунт-аналог; *б* – диаграмма деформации (обжатия) элемента

деформируемой оболочки; *в* – представление деформируемой оболочки и корпуса КА при посадке на деформируемые грунты-аналоги; 1 – фрагмент, вырезанный из деформируемой оболочки; 2 – представление фрагмента в модели деформируемой оболочки; 3 – узлы сетки деформируемой оболочки; 4 – узлы сетки днища КА.

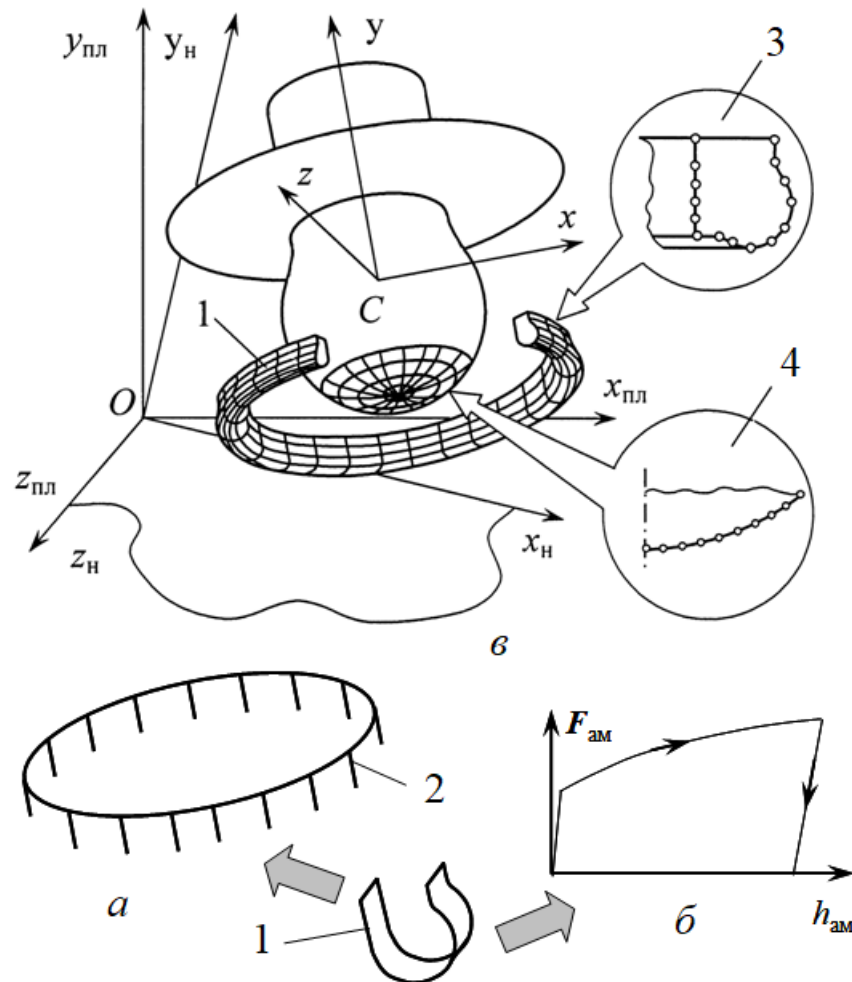


Рис. 5. Схема применения математического моделирования посадки «Вега-1,-2» для различных грунтов аналогов

Для моделирования посадки аппаратов на недеформируемый грунт (*а*) амортизирующая оболочка посадочного устройства разбивалась на совокупность фрагментов 1, каждый из которых представлялся деформируемым стержнем 2 с диаграммой обжатия, получаемой при физической деформации фрагмента. В случае

посадки на деформируемый грунт (рис. 5, в) считалось, что оболочка посадочного устройства не деформируется и деформируемым является грунт. В этом случае тороидальная оболочка посадочного устройства представлялась сеткой, для ячеек которой определялись реакции грунта.

Здесь на рисунке $S_{хуz}$ – связанная система координат с центром в центре масс КА; $O_{пл}u_{пл}z_{пл}$ – планетная инерциальная система координат, в которой ось $O_{у_{пл}}$ совпадает с местной гравитационной вертикалью; $O_{х_н}u_{н}z_{н}$ – инерциальная система координат, в которой плоскость $O_{х_н}z_{н}$ совпадает с плоскостью грунта.

Уравнения движения центра масс C космического аппарата в планетной инерциальной системе координат $O_{х_{пл}}u_{пл}z_{пл}$ и уравнения вращательного движения аппарата относительно его центра инерции, имеют вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{\mathbf{R}} &= \mathbf{F}, \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} &= I^{-1}[\mathbf{M} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{L}], \end{aligned} \quad (1)$$

где m – масса КА; $\ddot{\mathbf{R}}$ - абсолютное ускорение центра масс C ;

\mathbf{F} – главный вектор внешних сил, действующих на КА;

$\boldsymbol{\omega}$ - угловая скорость КА; I – тензор инерции КА;

\mathbf{M} – главный момент внешних сил, действующих на КА;

$\mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega}$ - главный момент количества движения аппарата относительно центра инерции.

Главный вектор внешних сил $\bar{\mathbf{F}}$ в общем случае может иметь вид:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{ep} + \mathbf{F}_{am} + \mathbf{F}_{np} \quad (2)$$

где \mathbf{F}_{ep} - силы реакции деформируемого грунта, действующие на КА;

$F_{ам}$ - силы амортизаторов посадочных опор ПУ; F_{np} - прочие внешние силы.

Проблемы моделирования посадки КА в новых рассматриваемых районах посадки для разных грунтов-аналогов

Проблемы моделирования посадки космических аппаратов для грунтов-аналогов в новых районах Венеры объясняются сложностью рельефа в местности тессера. Посадка предыдущих советских космических аппаратов на Венеру рассматривалась для максимального угла склона, равного 10 градусов. Для этого угла склона местности проводились расчёты посадки, физическое и математическое моделирование, испытания на бросковом стенде. В результате советскими инженерами было разработано посадочное устройство венерианских аппаратов, позволившее совершить успешные посадки всех запущенных космических аппаратов в равнинных типах местности. При этом для расчётных случаев в качестве грунта-аналога принималась модель недеформируемого грунта, когда вся кинетическая энергия при ударе поглощалась деформируемой тороидальной оболочкой посадочного устройства и рассеивалась дополнительно при преодолении сил трения материала оболочки о недеформируемый грунт.

В районах планируемых будущих посадок в местности тессеры ожидается появление склонов с углом 30 градусов. При таких углах склонов существует опасность переворота посадочного аппарата и появляется необходимость рассматривать возможность появления грунтов с более реальными характеристиками, то есть рассматривать грунты как деформируемые, когда часть

кинетической энергии посадочного аппарата будет поглощаться также и материалом венерианского грунта.

При этом для грунта-аналога существуют две наиболее общие основные проблемы:

- выбор гипотетического грунта Венеры в местности тессеры, на который предполагается совершить посадку;

- выбор земного грунта-аналога, соответствующего гипотетическому грунту Венеры в районе посадки.

На рисунке 6 показана последовательность математических моделей по мере их усложнения от самой простой модели, когда рассматривается плоское движение посадочного аппарата, а грунт-аналог представлен недеформируемой плоской поверхностью. Наиболее сложной моделью является модель с реальным описанием сложного рельефа Венеры, а грунт-аналог является деформируемым и представлен упруго-вязко-пластической средой. На рисунке имеют место следующие обозначения: а) – плоское движение КА; б) – пространственное движение КА; в) – недеформируемый грунт; г) – деформируемый грунт; д) – поверхность СА описывается упрощёнными геометрическими конструктивными примитивами; е) сложная поверхность СА; ж) – рельеф представлен упрощёнными геометрическими примитивами; з) – рельеф соответствует реальной форме поверхности грунта

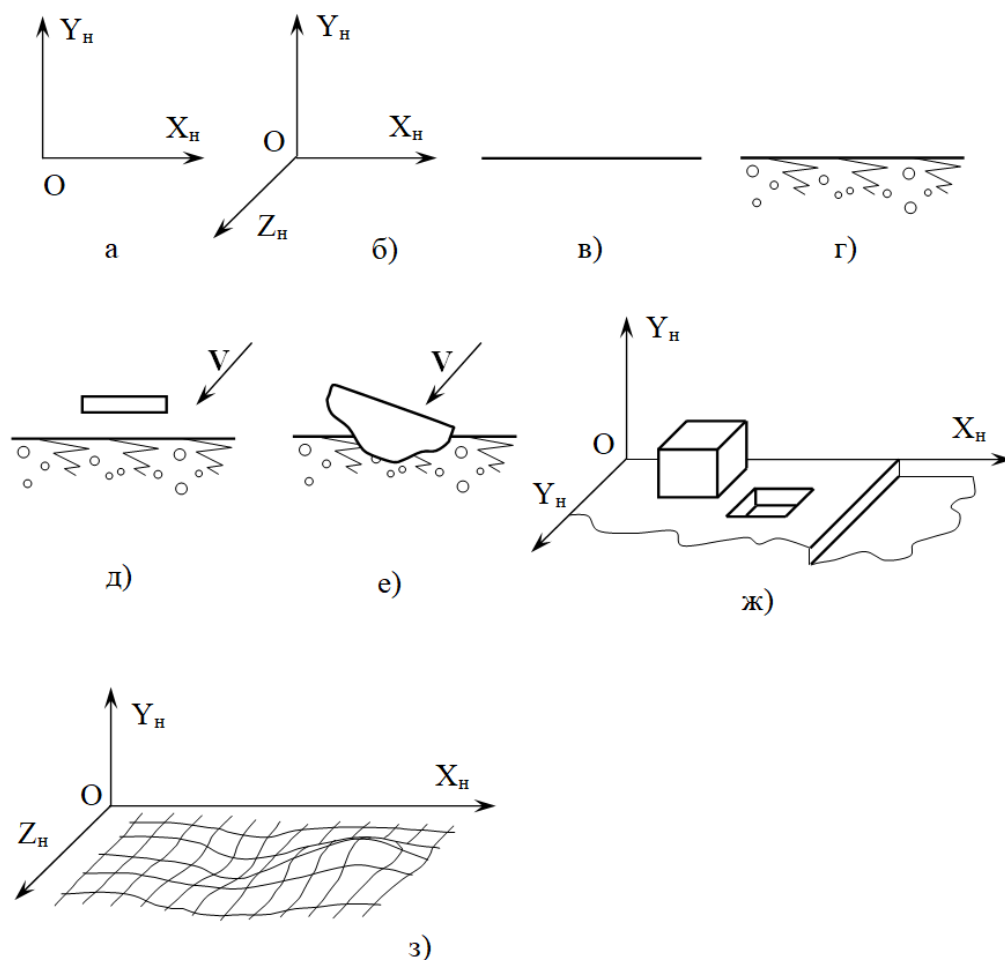


Рис. 6. Последовательность математических моделей

Заключение

В НПО Лавочкина были разработаны [11] физические стенды и математические модели для реализации физических бросковых испытаний и проведения вычислительных экспериментов для обеспечения посадки космических аппаратов «Венера -9, -14» и «Вега 1-2» на поверхность Венеры. Важной составной частью этих испытаний и моделирования посадки на грунт является применение грунтов-аналогов Венеры.

Задача выбора и использования грунтов-аналогов приобретает особую актуальность при планировании и разработке новых венерианских экспедиций для

посадки на поверхность Венеры в местности тессеры. Это объясняется сложностью рельефа в этой местности, что увеличивает вероятность аварийной посадки.

Необходим подробный анализ возможных венерианских грунтов в местности тессеры, подбор соответствующих земных грунтов-аналогов, изучение их физико-механических характеристик и механизма контактного ударного взаимодействия с грунтами-аналогами.

Библиографический список

1. Воронцов В.А., Буслаев С.П. Схемные решения посадки долгоживущего модуля на поверхность Венеры // Труды XXXIII академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики», Москва, Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2009. - 470 с.
2. Буслаев С.П., Воронцов В.А. Проектирование схем посадки космических аппаратов как продолжения схем спуска и разработка сопутствующего математического обеспечения // 14-я международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Тезисы докладов. – М: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. С.18 - 19.
3. Venus Flagship Mission Study: Report of the Venus Science and Technology Definition Team / Task Order NMO710851. NASA, 17 April 2009. URL: <http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/venusFlagshipMissionStudy090501.pdf>.
4. Venus Intrepid Tessera Lander. Mission Concept Study Report to the NRC Decadal Survey Inner Planets, NASA-GSFC, NASA-ARC. 19 March 2010, URL:

<http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/VenusIntrepidTesseraLander.pdf>

5. Glaze L., Baker C., Adams M. et al. Venus Mobile Explorer (VME): A Mission Concept for the National Research Council Planetary Decadal Survey // 7TH International Planetary Probe Workshop, 12-18 2010, Barcelona, URL:

<http://www.planetaryprobe.eu/IPPW7/proceedings/IPPW7%20Proceedings/Presentations/Session2/pr385.pdf>

6. Abdrakhimov A.M. Geologic mapping of “Venera” and “Vega” landing site areas on Venus, URL: http://planetmaps.ru/files/2002_11.pdf.

7. Basilevsky A., Ivanov M., Head J., Aittola M., Raitala J. Landing on Venus: Past and future // Planetary and Space Science. 2007. Vol. 55, issue 14, pp. 2097-2112.

8. Базилевский А.Т., Бурба Г.А., Бобина Н.Н., Шаикина В.П., Иванов М.А., Крючков В.П., Пронин А.А., Шалимов И.В., Дж. У. Хэд. Исследование геологического строения и истории планеты Венера путём составления глобальной геологической карты // Материалы Международной конференции «ГИС для устойчивого развития территорий «INTERCARTO-8», 2002, Хельсинки – Санкт-Петербург, С. 419-424.

9. Малышев В.В., Старков А.В., Титков М.А. Имитация мягкой посадки в земных условиях // Труды МАИ. 2015. № 79. URL:

<http://www.trudymai.ru/published.php?ID=55790>

10. Буслаев С.П. Моделирование посадки космических аппаратов на грунты Венеры и Фобоса // Полёт. 2011. № 1. С. 35-40.

11. Воронцов В.А., Крайнов А.М., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М. и др. Предложения по расширению программы исследования Венеры с учетом опыта

проектных разработок НПО им. С.А.Лавочкина // Труды МАИ. 2012. № 52. URL:

<http://www.trudymai.ru/published.php?ID=29449>