

**Анализ отработки посадки космических аппаратов  
«Венера-9–14» и «Вега-1, -2» на венерианский грунт  
для разработки перспективных космических аппаратов  
«Венера-Д»**

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

АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Московская область, 141400, Россия

*Рассмотрены вопросы и перспективы посадки будущих космических аппаратов на грунт Венеры в новой венерианской местности, получившей название «тессера» и имеющей сложный рельеф. Под посадкой подразумевается заключительный этап перелета космических аппаратов на планету — ударное контактное взаимодействие посадочного аппарата с грунтом планеты. Проведено сравнение рельефа в районах прошлых посадок космических аппаратов на Венеру и в районах возможных мест посадки в будущем. Приведено краткое описание проводившихся ранее испытаний посадки на грунты — аналоги венерианских грунтов — и проанализировано их применение для перспективных проектов. Охарактеризована математическая модель для изучения динамики ударного контактного взаимодействия посадочного устройства с деформируемыми венерианскими грунтами, которая использовалась при отработке посадочных аппаратов «Венера-9, -14» и «Вега-1, -2». По результатам анализа их посадки и проводившегося физического и математического моделирования этого процесса разработаны рекомендации для его реализации перспективным космическим аппаратом «Венера-Д» в районах Венеры со сложным рельефом.*

**Ключевые слова:** посадка на грунт, посадочный аппарат, бросковые испытания, модель посадки на грунт

**Введение.** Посадкой космического аппарата «Вега-2» 15 июня 1985 г. завершилась 15-летняя серия успешных посадок десяти советских аппаратов на поверхность Венеры. Повторных посадок космических аппаратов на венерианский грунт с тех пор и до настоящего времени больше не проводилось. Одной из причин этого можно назвать очень сложные внешние условия у поверхности планеты (высокие значения давления и температуры). Кроме того, были успешно выполнены все ранее поставленные задачи.

В настоящее время актуализировался интерес к изучению поверхности Венеры и ученые рассматривают различные варианты будущих долгоживущих космических аппаратов для посадки на поверхность Венеры [1–9]. Изучается возможность исследования Венеры совместными усилиями российских и американских специалистов [7, 10], в том числе с использованием посадочных аппаратов. Этому способствуют и определенные успехи, достигнутые в деле разработки радио-

электронных компонентов, выдерживающих высокие значения температуры в венерианской атмосфере [8, 9, 11–14]. Интерес специалистов-планетологов привлекают такие районы для будущих посадок космических аппаратов, в которых местность сформировалась в результате тектонических процессов [15] и получила название «тессера», что в переводе с греческого означает «черепица». По завершении тектонических процессов, неоднократно происходивших в этих районах в прошлом, по мнению ученых, на поверхность выходят древние породы планеты, и их изучение позволит получить новые научные результаты.

Поскольку рельеф местности тессера существенно отличается от рельефа в прежних местах посадок советских космических аппаратов, осуществить посадку в ее пределах значительно сложнее, в частности, космический аппарат может перевернуться.

Местность тессера представляет собой совокупность пересекающихся гряд и борозд, высота гряд может достигать 1–2 км, уступов — до 1 км, а углы склонов поверхности —  $30^\circ$  [16–18]. Учитывая то, что советские венерианские аппараты были спроектированы для посадок на склоны только до  $10^\circ$ , становится ясно, что посадка перспективных космических аппаратов на поверхность Венеры в районах тессеры представляет собой проблему, и ее решение является актуальным [19].

Цель настоящей работы — анализ результатов посадки космических аппаратов «Венера-9–14» и «Вега-1, -2» и их наземной отработки в АО «НПО Лавочкина» для формулирования рекомендаций относительно разработки будущих космических аппаратов с посадкой в новых районах Венеры.

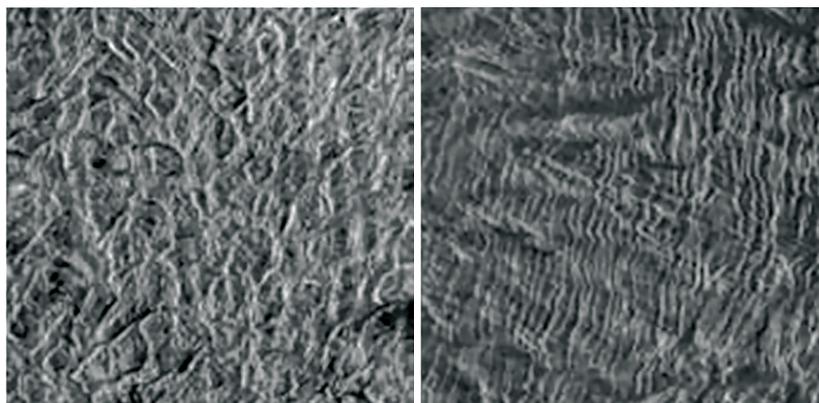
**Поверхность Венеры в районах посадок советских космических аппаратов и возможных районах посадки в местности тессера.** Данные о рельефе поверхности Венеры в местах посадок советских космических аппаратов «Венера-8–10, -13, -14» и «Вега-1, -2» (таблица) [16] показывают процентное содержание разных типов местности в районе каждой посадки.

Все советские космические аппараты осуществляли посадку в районах с преобладанием равнинных типов местности *Pl*, *Pwr*, *Psh* и только в районах посадки космических аппаратов «Венера-9, -10, -13» была вероятность сложного рельефа типа тессера, составлявшая 15, 15 и 0,3 % соответственно. Именно посадка на сложный рельеф местности типа *Tt* больше всего вызывает интерес ученых. По проекту «Магеллан» сделаны фотоснимки местности тессера (рис. 1), на которых отчетливо видна расчлененная структура поверхности рельефа, представляющая сложность для посадки.

**Рельеф и его процентное содержание в районе посадки космических аппаратов «Венера-8-10, -13, -14» и «Вега-1, -2»**

Рельеф	«Венера»					«Вега»	
	8	9	10	13	14	1	2
<i>Cu</i>	–	–	–	–	0,5	–	–
<i>RT</i>	–	–	–	–	14	–	–
<i>Pl</i>	8	–	21	3	52	–	0,8
<i>Pwr</i>	16	60	59	91	27	98	99
<i>Psh</i>	75	4	0,7	3	5	0,6	–
<i>FB</i>	0,5	–	–	–	1	–	–
<i>Pfr</i>	–	21	1	1	–	–	0,1
<i>Pdf</i>	0,4	–	3	1	0,5	1	–
<i>Tt</i>	–	15	15	0,3	–	–	–
<i>Итого:</i>	99,9	100	99,7	99,3	100	99,7	99,9

Примечание. *Cu* — ударные кратеры; *RT* — рифтовые зоны; *Pl*, *Pwr*, *Psh*, *Pfr*, *Pdf* — равнины разного типа; *FB* — трещиноватые пояса; *Tt* — тессера.



0  250 км

*a*

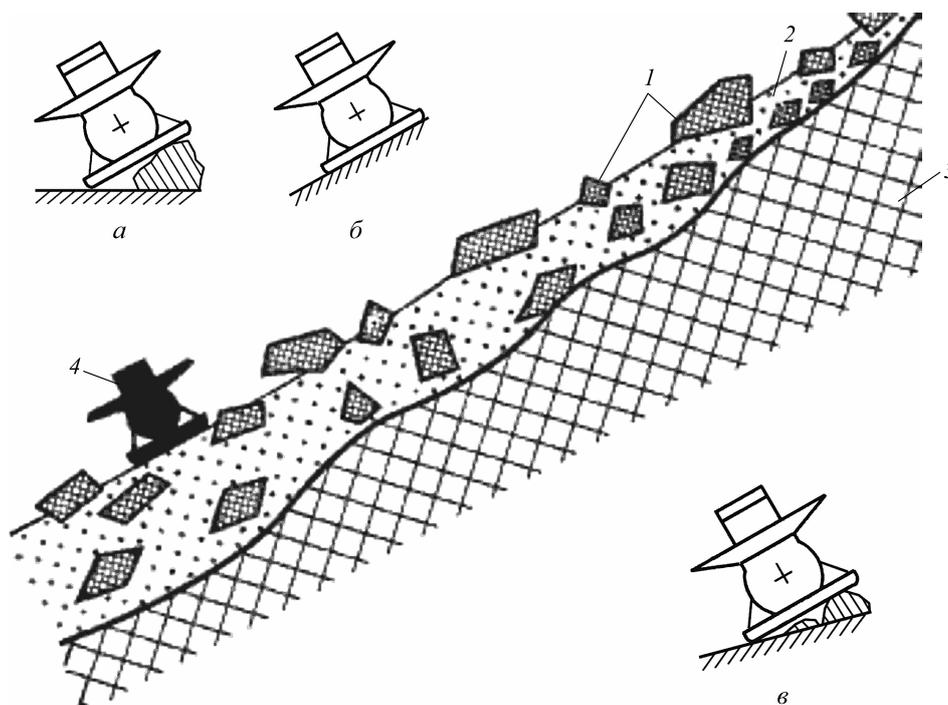
*б*

**Рис. 1.** Варианты (*a*, *б*) типичного рельефа местности тессера

Результаты посадки космических аппаратов «Венера-9, -10» до сих пор интересуют проектантов и испытателей, поскольку бортовой наклономер аппарата «Венера-9» зафиксировал наклон спускаемого аппарата после посадки на угол около 30°. В то же время расчеты и испытания показывали, что удачная посадка на склон с углом наклона 30° была маловероятна при модели грунта Венеры, принятой при проектировании.

Проведена дешифровка панорамных изображений местности [20], проанализировано положение горизонта на них, рассмотрена структура элементов рельефа, изучено положение отдельных частей аппаратов (часть кольцевой опоры посадочного аппарата, датчик гамма-плотнмера, отстреленная секционная крышка иллюминатора телекамеры) на грунте. По размерам этих деталей космических аппаратов была дана оценка размерам и геометрическим формам расположенных поблизости образований венерианской поверхности.

В результате анализа признано, что большой наклон аппарата мог быть следствием трех ситуаций (рис. 2), т. е. аппарат осуществил посадку: *а*) на большой камень, лежащий на горизонтальной поверхности грунта; *б*) на наклонную поверхность, наклон которой совпадал с наклоном аппарата; *в*) на комбинацию наклонной поверхности и лежащего на ней одного или нескольких камней. Наиболее вероятны ситуации *б* и *в*, в которых угол наклона склона — места посадки аппарата «Венера-9» — мог составлять 20...30°.



**Рис. 2.** Положение космического аппарата «Венера-10» на приповерхностном разрезе грунта по результатам анализа панорамных снимков:

1 — обломки коренных пород; 2 — рыхлый материал (реголит); 3 — коренные породы; 4 — космический аппарат; *а-в* — варианты посадки (см. текст)

Угол наклона космического аппарата «Венера-10» составлял всего несколько градусов, и аналогичная обработка его панорамных снимков показала, что космический аппарат сел на относительно ровную поверхность.

Поверхность вблизи мест посадки обоих аппаратов была покрыта камнями до 50...70 см в поперечнике и несколькими каменными глыбами размером в поперечнике около 3 м. Камни относительно невысокие, а глыбы имеют уплощенную форму. Промежутки между камнями и глыбами, видимо, заполнены мелкозернистым пористым грунтом.

На основании полученных результатов можно утверждать, что при посадке космического аппарата «Венера-10» часть энергии аппарата во время удара была поглощена деформируемым поверхностным слоем грунта Венеры — как при деформации самого материала грунта, так и при возможном смещении камней или других фрагментов в поверхностном слое грунта. Такая структура венерианского грунта существенно отличалась от модели недеформируемого абсолютно твердого грунта, принятой ранее при разработке советских венерианских космических аппаратов.

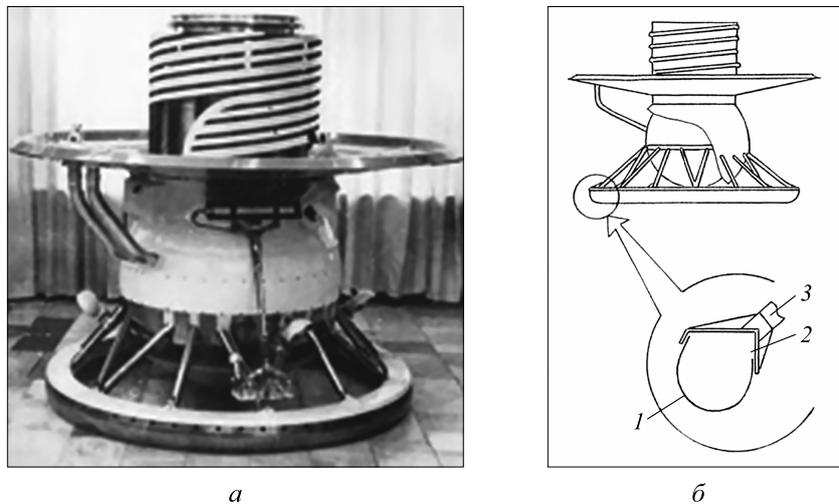
**Отработка посадки космических аппаратов «Венера-9–14» и «Вега-1, -2» на грунт.** При разработке посадочного устройства космических аппаратов «Венера-8–10, -13, -14» и «Вега-1, -2» была принята следующая модель поверхности Венеры: поверхность в точке посадки считалась плоской с максимальным углом склона  $10^\circ$ ; грунт считался недеформируемым (абсолютно твердым) и имел только одну характеристику — коэффициент трения скольжения материала конструкции космического аппарата о поверхность грунта. Все расчеты посадки и испытания посадочных аппаратов на стендах проводились при этих допущениях.

К моменту начала работ над космическим аппаратом «Вега» конструкция посадочного устройства была уже выбрана, отработана и представляла собой амортизирующую тороидальную оболочку. Оболочка с помощью шпангоута и фермы крепилась к корпусу посадочного аппарата (рис. 3).

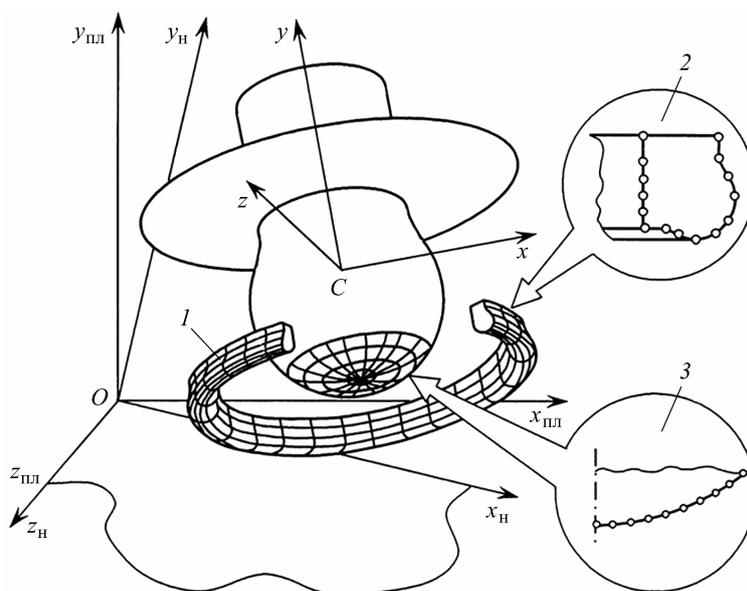
Для этого посадочного устройства была разработана математическая модель посадки космических аппаратов «Венера-9, -14» на недеформируемый грунт и проведены бросковые испытания посадочного аппарата «Венера» на прочные грунты типа скальных пород [21].

В целях изучения посадки космического аппарата «Вега» на грунты с более широким диапазоном свойств и для более адекватного описания динамики его удара о такие грунты позднее была также разработана математическая модель посадки на деформируемые грунты в интервале от сыпучих вплоть до прочных грунтов, переходящих в скальные основания [22].

В математической модели (рис. 4) использованы следующие системы координат:  $S_{хуз}$  — связанная система координат с центром в центре масс космического аппарата;  $Ox_{пл}y_{пл}z_{пл}$  — планетная инерциальная система координат, в которой ось  $Oy_{пл}$  совпадает с местной гравитационной вертикалью;  $Ox_{н}y_{н}z_{н}$  — инерциальная система координат, в которой плоскость  $Ox_{н}z_{н}$  совпадает с плоскостью грунта.



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



**Рис. 4.** Системы координат в математической модели посадки космических аппаратов «Вега-1, -2»:

1 — меридианально-параллельная сетка посадочного устройства; 2 — узлы сетки в меридианальном сечении посадочного устройства; 3 — узлы сетки в меридианальном сечении днища космического аппарата

Уравнение движения центра масс  $C$  космического аппарата в планетной инерциальной системе координат  $Ox_{пл}y_{пл}z_{пл}$  и уравнение вращательного движения аппарата относительно его центра инерции имеют вид

$$m\ddot{\mathbf{R}} = \mathbf{F};$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = I^{-1}[\mathbf{M} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{L}],$$

где  $m$  — масса космического аппарата;  $\ddot{\mathbf{R}}$  — абсолютное ускорение центра масс  $C$ ;  $\mathbf{F}$  — главный вектор внешних сил, действующих на космический аппарат;  $\boldsymbol{\omega}$  — угловая скорость космического аппарата;  $I$  — тензор его инерции;  $\mathbf{M}$  — главный момент внешних сил, действующих на космический аппарат;  $\mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega}$  — главный момент количества движения аппарата относительно центра инерции.

Главный вектор внешних сил  $\mathbf{F}$  в общем случае имеет вид

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{гр}} + \mathbf{F}_{\text{пр}},$$

где  $\mathbf{F}_{\text{гр}}$  — силы реакции деформируемого грунта, действующие на космический аппарат;  $\mathbf{F}_{\text{пр}}$  — прочие внешние силы.

Тороидальная оболочка посадочного устройства является поверхностью вращения, которая была заменена в расчетах кусочно-непрерывной поверхностью, образованной с помощью сетки с узлами в точках пересечения меридиан и параллелей.

При этом грунт представляли упруговязкопластичной средой, заполняющей полупространство под плоскостью  $Ox_n z_n$ . При проникании космического аппарата в грунт на ячейки поверхности аппарата со стороны грунта действуют силы  $\mathbf{F}_{ik}$  с точкой приложения в центре ячейки (рис. 5), которые затем суммируются ( $i$  — порядковый номер параллели,  $k$  — порядковый номер меридиана сетки).

Каждой ячейке ставится в соответствие ее центр, находящийся в центре масс треугольника, и площадь ячейки  $S_{ik}$ . Скорость ячейки при движении в грунте определяем по вектору скорости ее центра  $\mathbf{V}_{ik}$ .

В общем случае грунт представляет собой сложную дисперсную среду — смесь минеральных частиц, жидких и газообразных компонентов. Поскольку для венерианского грунта точные сведения о составе и свойствах твердой, жидкой и газообразной фракций отсутствовали, было предложено при посадке космического аппарата рассматривать силу реакции деформируемого грунта в общем виде [22]:

$$F = a + bV + cV^2,$$

где  $a, b, c$  — коэффициенты, определяемые свойствами грунта и формой внедряемого тела;  $V$  — скорость проникания тела в грунт.

Силу  $\mathbf{F}_{ik}$  представим суммой двух составляющих

$$\mathbf{F}_{ik} = \mathbf{F}_{ik}^n + \mathbf{F}_{ik}^t, \quad (i = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m),$$

где  $\mathbf{F}_{ik}^n$  — сила, действующая на ячейку в направлении оси  $Oy_H$ ;  $\mathbf{F}_{ik}^\tau$  — сила, действующая на ячейку в плоскости  $Ox_H z_H$  в направлении, противоположном скорости движения ячейки  $\mathbf{V}_{ik}^\tau$  (см. рис. 5);  $\mathbf{V}_{ik}^\tau$  — проекция скорости ячейки на плоскость  $Ox_H z_H$  в касательном к поверхности грунта направлении;  $\mathbf{V}_{ik}^n$  — проекция скорости ячейки на ось  $Oy_H$  в нормальном к поверхности грунта направлении.

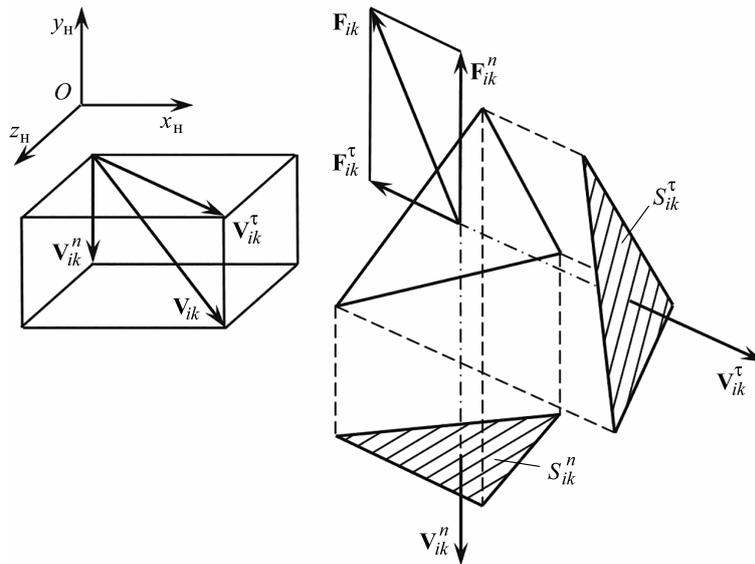


Рис. 5. Силы, действующие на ячейку поверхности космического аппарата при его проникании в грунт

Окончательно сила реакции грунта, действующая на космический аппарат, определяется суммированием всех ее составляющих по всем ячейкам, проникшим в грунт:

$$\mathbf{F}_{\text{гр}} = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^m (\mathbf{F}_{ik}^n + \mathbf{F}_{ik}^\tau),$$

где  $\mathbf{F}_{ik}^n$  и  $\mathbf{F}_{ik}^\tau$  — элементарные силы, которые имеют вид

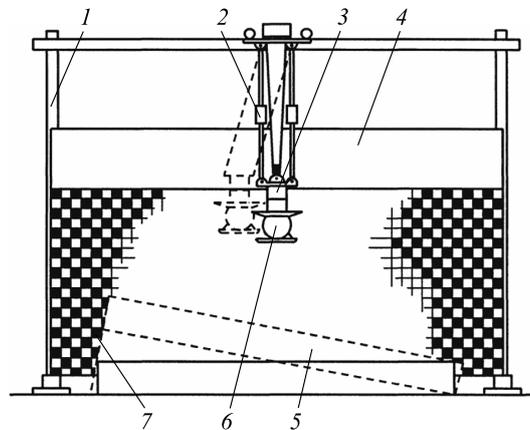
$$F_{ik}^n = S_{ik}^n \left[ a^n + b^n V_{ik}^n + c^n (V_{ik}^n)^2 \right];$$

$$F_{ik}^\tau = S_{ik}^\tau \left[ a^\tau + b^\tau V_{ik}^\tau + c^\tau (V_{ik}^\tau)^2 \right],$$

где  $S_{ik}^n$  и  $S_{ik}^\tau$  — проекции площади ячейки на плоскость  $Ox_H z_H$  и в направлении скорости  $\mathbf{V}_{ik}^\tau$  соответственно (см. рис. 5).

Коэффициенты  $a^n, b^n, c^n$  и  $a^\tau, b^\tau, c^\tau$  в общем случае могут различаться вследствие различных процессов деформации грунта в нормальном и касательном направлении. Некоторые из этих коэффициентов, в свою очередь, могут иметь функциональную зависимость, например, от глубины проникания в грунт.

Специально для калибровки и отладки этой математической модели был создан физический стенд (рис. 6), на котором изучалось ударное внедрение космического аппарата «Вега-1, -2» в деформируемые грунты [23]. Для бросковых испытаний на стенде не использовалась полностью динамически подобная модель — была выбрана модель с геометрическим масштабным коэффициентом  $K_L = 1/8$ .



**Рис. 6.** Стенд для отработки и исследований математической модели посадки космического аппарата «Вега-1, -2» на деформируемые грунты (объяснение условных обозначений см. в тексте)

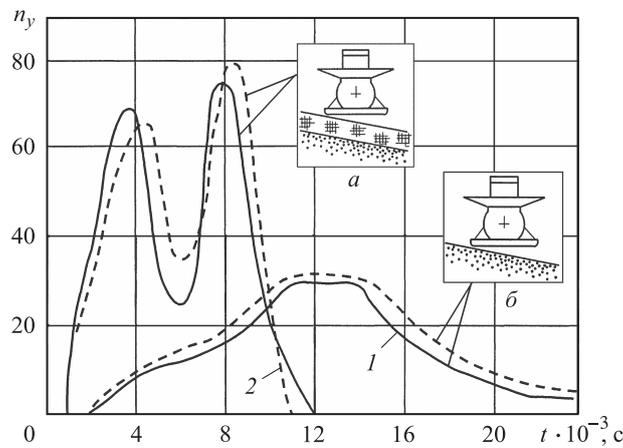
Испытательный стенд состоял из несущего каркаса 1, маятниковой подвески 2, фонового щита 4 с нанесенной координатной сеткой 7 и контейнера с имитатором грунта 5. Электромагнит 3, или механический замок, установленный на маятниковой подвеске, фиксирует модель космического аппарата 6 на подвеске и отделяет модель в определенный 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 перегрузка в направлении ее продольной оси.

В испытаниях модель сбрасывалась на несколько типов грунтов-аналогов, которые получали различными комбинациями песчаного основания, пенопластовой плиты, второго слоя песка поверх пенопластовой плиты и блоков пенобетона размером 0,04×0,04×0,02 м,

лежащих на втором слое песка. В качестве рыхлого грунта применялся мелкозернистый песок с размером частиц песка до  $8 \cdot 10^{-3}$  м.

Представим экспериментальные результаты бросковых испытаний и расчетные результаты для значений перегрузки вдоль продольной оси модели  $C_y$  (рис. 7) [23]. Начальные условия сбросов:

Вертикальная скорость центра масс $\dot{R}_{пл,y}$ , м/с .....	-3,9
Горизонтальная скорость $\dot{R}_{пл,x}$ , м/с .....	0
Угол тангажа модели $\vartheta$ , град .....	0
Угол склона $\alpha_{гр}$ , град .....	10



**Рис. 7.** Результаты бросковых испытаний модели космического аппарата на грунты-аналоги:  
*a* — пенопласт поверх мелкозернистого песка; *б* — мелкозернистый песок; *1* — бросковые испытания; *2* — расчетные результаты

Для теоретической кривой на рис. 7 для случая *a* были подобраны следующие значения параметров  $a^n$ ,  $b^n$ ,  $c^n$ :

$$a^n = a^{n1} |y_e| + a^{n2},$$

$$\text{где } a^{n1} = 1374 \left[ 1 + \text{sign} \left( 2,142 \cdot 10^{-4} + y_e \right) \right] \text{ МПа};$$

$$a^{n2} = 0,2943 \left[ 1 - \text{sign} \left( 2,142 \cdot 10^{-4} + y_e \right) \right] \text{ МПа};$$

$$b^n = 0;$$

$$c^n = 0,$$

где  $y_e$  — координата центра ячейки на оси  $Oy_H$ .

Усилие  $F_{ik}^{\tau}$ , действующее на элемент в направлении, противоположном вектору  $V_{ik}^{\tau}$ , для случая 1 (см. рис. 7) моделируется силой трения с коэффициентом трения 0,25. Для теоретической кривой для случая б (см. рис. 7), соответствующего случаю посадки модели на песок, были подобраны следующие значения параметров  $a^n$ ,  $b^n$ ,  $c^n$ :

$$a^n = \left(-53,14 \cdot y_e^2 + 0,924 |y_e|\right) 10^3 a^{n1} + \\ + \left[3,63 + 171,5 \left(|y_e| - 0,006\right)\right] 10^4 a^{n2};$$

где  $a^{n1} = 0,5 \left[1 + \text{sign}(0,006 + y_e)\right]$  МПа;  $a^{n2} = 0,5 \left[1 - \text{sign} \times \right. \\ \left. \times (0,006 + y_e)\right]$  МПа;  $b^n = -0,2564$  с/м;  $c^{n1} = 0,0657$  с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Усилие  $F_{ik}^{\tau}$  при этом определялось выражением

$$F_{ik}^{\tau} = a^{\tau} S_{ik}^{\tau},$$

где  $a^{\tau} = 5,886 \cdot 10^4$  Па.

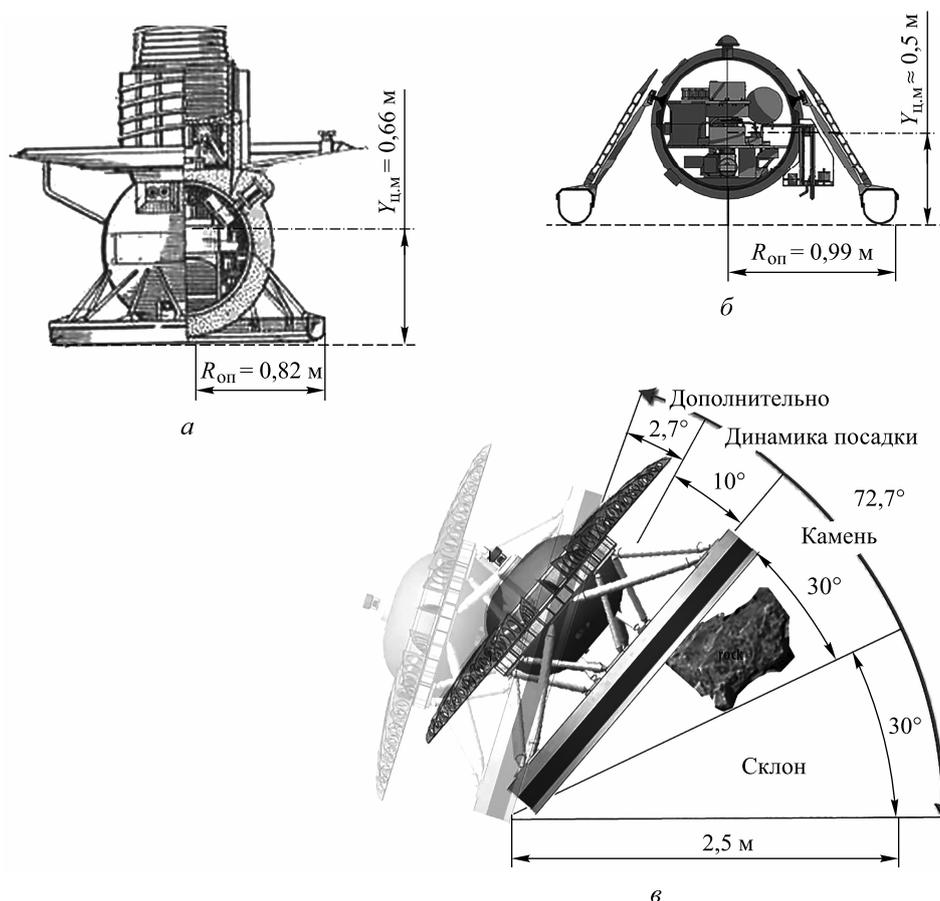
Возможность использования подобранных механических характеристик грунтов для расчета других случаев посадки проверена бросковыми испытаниями модели с другими начальными условиями. Как и следовало ожидать, в экспериментах характеристики грунта существенно влияли на динамику движения модели космического аппарата при ударе о грунт и на результаты посадки — на уровень перегрузок при ударе и на устойчивость модели (перевернется модель или нет).

**Обсуждение вариантов проектов посадки перспективных космических аппаратов в местности тессера.** Успешные посадки аппаратов «Венера-9–14» и «Вега-1, -2» на грунт Венеры показали хорошую надежность спроектированного для них посадочного устройства, которое было разработано для посадки на прочные грунты, переходящие в скальные основания с углом склона до 10°. Как уже упоминалось, такие грунты в проводившихся ранее проектных расчетах были представлены моделью недеформируемого абсолютно твердого грунта.

В настоящее время предполагается, что ожидаемые углы склонов в местности тессера могут достигать 30°. Как показали расчеты, в случае недеформируемых грунтов на таких склонах будет происходить переворот этих космических аппаратов.

Конструктивным показателем устойчивости посадочного аппарата от переворота служит коэффициент устойчивости  $K_{уст}$ , который

равен отношению радиуса выноса опор аппарата  $R_{оп}$  к высоте центра масс  $Y_{ц.м.}$ :  $K_{уст} = \frac{R_{оп}}{Y_{ц.м.}}$  (рис. 8, а, б). Представим посадочный аппарат «Вега-1, -2» с коэффициентом устойчивости  $K_{уст} = 1,24$  (рис. 8, а).



**Рис. 8.** Высота центра масс посадочного аппарата  $Y_{ц.м.}$  и вынос опоры посадочного устройства  $R_{оп}$  для посадочных аппаратов «Вега-1, -2» (а) и из проекта DRM (б); положение посадочного аппарата из проекта VITAL на сложном рельефе типа склон + камень (в)

Для решения проблемы посадки космических аппаратов на крутые склоны в местности тессера предложены проекты посадочных аппаратов с конструктивными решениями, направленными на увеличение коэффициента устойчивости  $K_{уст}$  [24–26]. Для этого увеличили радиус выноса опор (в данном случае радиус тороидальной амортизирующей оболочки) и уменьшили высоту центра масс посадочного аппарата. Так, в проекте A Flagship Mission to Venus (DRM) [24] удалось достичь коэффициента устойчивости 1,98. При этом для большей устойчивости посадочного аппарата помимо амортизирующей

тороидальной оболочки предлагается снабдить аппарат дополнительными опорами, раскрывающимися перед посадкой на грунт с последующим ударом о поверхность (рис. 8, б).

Авторы разработки посадочного аппарата из проекта Venus Intrepid Tessera Lander (ViTaL) [25] (рис. 8, в) утверждают, что он сохраняет устойчивость на сложном рельефе — при склоне  $30^\circ$  и лежащем на нем камне, когда суммарный угол наклона местности достигает  $60^\circ$  (склон + камень).

К сожалению, в обоих проектах не приведены расчеты, подтверждающие устойчивость аппаратов при посадке на указанные склоны местности.

**Заключение.** Посадка космического аппарата на поверхность Венеры в районах местности тессера будет происходить в более тяжелых условиях, чем это имело место ранее у советских космических аппаратов. Это объясняется более сложным рельефом местности. Существуют три общих варианта реализации посадки на рельеф местности тессера:

1) модификация использовавшихся посадочных аппаратов и посадочных устройств типа «Венера-9–16» и «Вега-1, -2» для возможности посадки на склоны с углом наклона  $30^\circ$ ;

2) использование в посадочном устройстве космических аппаратов иных способов поглощения их кинетической энергии при ударе о грунт и предотвращения переворота космического аппарата, отличных от примененных относительно аппаратов «Венера-9–16» и «Вега-1, -2», например, надувных амортизирующих баллонов (как на космическом аппарате «Луна-9»), якорей-пенетраторов и двигателей прижатия, как на долгоживущей автономной станции (ДАС) [23], и др.;

3) разработка интеллектуальной системы выбора наиболее безопасного места посадки в реальном режиме времени внутри эллипса рассеивания спускаемого аппарата на траектории спуска и обеспечение посадки в выбранном месте.

В первом случае учитывается опыт разработки экспериментальной и математической отработки посадки космических аппаратов «Венера-9–14» и «Вега-1, -2» на грунт. Это наиболее дешевый и реализуемый в настоящее время вариант. Во втором — разрабатывается принципиально новая конструкция посадочного устройства, что повлечет за собой и создание нового посадочного аппарата, а следовательно, потребуется увеличение и объемов финансирования и времени на реализацию проекта.

В случае третьего варианта для выбора безопасного места посадки на этапе спуска потребуются создание некоторых новых систем космического аппарата с электронными компонентами, функционирующими при температуре  $400^\circ$ , что в настоящее время проблематично. Необходимо также решить задачу горизонтального маневра

спускаемого аппарата при выборе района посадки во время спуска в плотной атмосфере Венеры. Для всего этого потребуется разработка новой конструкции спускаемого аппарата и изменение концепции посадки.

При реализации первого наиболее осуществимого варианта посадки рекомендуется соблюдение следующих принципов:

- посадочное устройство типа «Венера-9–14» и «Вега-1, -2» должно быть оборудовано дополнительными опорами для увеличения базы посадочного устройства в целях предотвращения переворота космического аппарата;
- в качестве грунтов-аналогов необходимо использовать новые — со свойствами, более близкими к свойствам реальных венерианских грунтов в местности тессера, точнее учитывающими физико-механические характеристики и фрагментарную структуру поверхностного слоя;
- обработку математической модели ударного взаимодействия деформируемой оболочки посадочного устройства с деформируемой поверхностью грунта требуется осуществлять и в дальнейшем;
- при обработке посадочного устройства следует использовать вероятностные модели характеристик грунта и макро- и микрорельефа, описывающие поверхность в районе посадки [27]; вероятность посадки космического аппарата на грунт должна оцениваться на всех этапах его разработки [28].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воронцов В.А., Буслаев С.П. Схемные решения посадки долгоживущего модуля на поверхность Венеры. *Актуальные проблемы российской космонавтики: Тр. XXXIII академических чтений по космонавтике* (Москва, 26–30 января 2009 г.). Москва, Комиссия РАН по разраб. науч. наследия пионеров освоения космического пространства, 2009, с. 470–477.
- [2] Буслаев С.П., Воронцов В.А. Проектирование схем посадки космических аппаратов как продолжение схем спуска и разработка сопутствующего математического обеспечения. *Системный анализ, управление и навигация. Сб. тез. докладов 14-й Междунар. науч. конф.* Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009, с. 18–19.
- [3] Venus Lander Mission Concepts. *IPPW 6 Short Course Venus Lander Team Georgia Tech Conference Center. Atlanta, 2008.* Georgia Tech Conference Center Publ. URL: <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/26347/153-248-1-PB.pdf?sequence=1> (дата обращения 03.03.2018).
- [4] *Venus Sample Return Mission.* Virginia Polytechnic and State University. Design Team. URL: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/courses/aoe4065/OldReports/venus.pdf> (дата обращения 01.03.2018).
- [5] Hall J.L. *Venus Environmental Challenges. Venus Seismology Study: Short Course. Part II: Exploring Venus with Landers, Orbiters and Balloons.* JPL-Caltech, June 2, 2014. URL: <http://kiss.caltech.edu/workshops/venus/presentations/hall.pdf> (дата обращения 11.06.2017).

- [6] Hunter G.W. *Long-lived Venus lander technologies*. NASA Glenn Research Center.  
URL: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/oct2009/presentations/hunterVenusLanderTechnologies.pdf> (дата обращения 11.03.2018).
- [7] Wall M. *Russia, US Mulling Joint Mission to Venus*. January 17, 2017. URL: <http://www.space.com/35333-russia-nasa-venus-mission-venera-d.html> (дата обращения 14.05.2017).
- [8] Grossman L. What will it take to go to Venus? *Science News*, vol. 193, no. 4, March 3, 2018, p. 14. URL: <https://www.sciencenews.org/article/what-will-it-take-go-venus> (дата обращения 10.04.2018).
- [9] Wilson C., Zetterling C.-M., Pike W.T. *Venus Long-Life Surface Package (VL2SP)*. Cornell University Library.  
URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.03365.pdf> (дата обращения 10.04.2018).
- [10] *NASA Studying Shared Venus Science Objectives with Russian Space Research Institute*. NASA, JPL. March 10, 2017.  
URL: [https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6774&utm\\_source=iContact&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=NASAJPL&utm\\_content=daily20170310-1](https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6774&utm_source=iContact&utm_medium=email&utm_campaign=NASAJPL&utm_content=daily20170310-1) (дата обращения 11.06.2017).
- [11] Zetterling C.-M. *Ultimate limits in high-temperature operation of semiconductors (not just SiC)*. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. URL: <http://www.ece.stonybrook.edu/~serge/ARW-8/ABSTRACTS/Zetterling-2.pdf> (дата обращения 19.03.2018).
- [12] Neudeck Ph.G., Meredith R.D., Chen L., Spry D.J., Nakley L.M., Hunter G.W. Prolonged silicon carbide integrated circuit operation in Venus surface atmospheric conditions. *AIP Advances* 6. 125119 (2016). URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4973429> (дата обращения 19.05.2017).
- [13] *NASA demonstrates electronics for longer Venus surface missions*. February 10, 2017, NASA. URL: <http://phys.org/news/2017-02-nasa-electronics-longer-venus-surface.html> (дата обращения 19.04.2017).
- [14] Anthony S. *We finally have a computer that can survive the surface of Venus*. Arstechnica. 02.08.2017. URL: <https://arstechnica.com/science/2017/02/venus-computer-chip/> (дата обращения 19.04.2018).
- [15] Буслав С.П., Вернигора Л.В., Воронцов В.А., Пичхадзе К.М. Посадка на поверхность планеты Венера. Особенности предлагаемых мест посадки. К 25-летию осуществления проекта «Вега». *Системный анализ, управление и навигация: Тез. докл. 15-й Междунар. науч. конф.* Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, с. 16–17.
- [16] Abdrakhimov A.M. Geologic mapping of “Venera” and “Vega” landing site areas on Venus. *ГЕОХИ. Внеземная картография*, с. 426–428. [Электронный ресурс]. URL: [http://planetmaps.ru/files/2002\\_11.pdf](http://planetmaps.ru/files/2002_11.pdf) (дата обращения: 19.05.2017).
- [17] Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Head J.W., Aittola M., Raitala J. Landing on Venus: past and future. *Planetary and Space Science*, 2007, vol. 55, pp. 2097–2112.
- [18] Базилевский А.Т., Бурба Г.А., Бобина Н.Н. и др. Исследование геологического строения и истории планеты Венера путем составления глобальной геологической карты. *Материалы Междунар. конф. «ГИС для устойчивого развития территорий “INTERCARTO-8”»* (Хельсинки — Санкт-Петербург, 2002). Санкт-Петербург, 2002, с. 419–424.  
URL: [http://planetmaps.ru/files/2002\\_9.pdf](http://planetmaps.ru/files/2002_9.pdf) (дата обращения: 19.05.2017).

- [19] Буслаев С.П. Различные модели окружающей среды на Венере и проблемы посадки будущих венерианских КА на грунт. *Системный анализ, управление и навигация: Тез. докл. 15-й Междунар. науч. конф.* Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2015, с. 124–127.
- [20] Флоренский К.И., Базилевский А.Т., Пронин А.А., Бурба С.А. Результаты геолого-морфологического анализа панорам Венеры. *Первые панорамы поверхности Венеры.* Москва, Наука, 1979, с. 107–127.
- [21] Базилевский А.Т., Григорьев Е.И., Ермаков С.Н., Карягин В.П., Пичхадзе К.М., Черемных С.В. *Проектирование спускаемых автоматических космических аппаратов: опыт разработки диалоговых процедур.* Москва, Машиностроение, 1985, 264 с.
- [22] Буслаев С.П., Стулов В.А., Григорьев Е.И. Математическое моделирование и экспериментальное исследование посадки межпланетных станций «Венера 9–14» на деформируемые грунты. *Космические исследования*, 1983, т. 21, вып. 4, с. 540–544.
- [23] Буслаев С.П. Моделирование посадки космических аппаратов на грунты Венеры и Фобоса. *Общероссийский науч.-техн. журн. «Полет»*, 2011, № 1, с. 35–40.
- [24] *Venus Flagship Mission Study: Report of the Venus Science and Technology Definition Team.* Task Order NMO710851. NASA, April, 17, 2009, 292 p. URL: <http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/venusFlagshipMissionStudy090501.pdf> (дата обращения: 19.05.2017).
- [25] *Venus Intrepid Tessera Lander: Mission Concept Study Report to the NRC Decadal Survey Inner Planets.* NASA-GSFC, NASA-ARC. March, 19, 2010. URL: <http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/VenusIntrepidTesseraLander.pdf> (дата обращения: 19.05.2017).
- [26] Glaze L., Baker C., Adams M. et al. *Venus Mobile Explorer: A Mission Concept for the National Research Council Planetary Decadal Survey.* 7<sup>th</sup> Int. Planetary Probe Workshop 12–18, 2010, Barcelona, 27 p. URL: <http://www.planetaryprobe.eu/IPPW7/proceedings/IPPW7%20Proceedings/Presentations/Session2/pr385.pdf> (дата обращения: 19.05.2017).
- [27] Буслаев С.П. Применение правила дискриминации для прогнозирования успешной посадки космического аппарата на поверхность небесного тела. *Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина»*, 2011, № 1, с. 32–37.
- [28] Буслаев С.П. Имитационные и интерактивные процедуры в задаче поиска параметров посадочных устройств АМС типа «Вега-1, -2». *Космические исследования*, 1988, т. 26, вып. 1, с. 41–48.

Статья поступила 24.05.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Буслаев С.П., Воронцов В.А., Графодатский О.С. Анализ отработки посадки космических аппаратов «Венера-9–14» и «Вега-1, -2» на венерианский грунт для разработки перспективных космических аппаратов «Венера-Д». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1790>

**Буслаев Сергей Петрович** — канд. техн. наук, инженер АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование посадочных устройств, динамика посадки космических аппаратов, автоматическое управление движением планетоходов, искусственный интеллект планетоходов на основе технического зрения. Автор более 100 научных публикаций. e-mail: se.bouslaev@yandex.ru

**Воронцов Виктор Александрович** — д-р техн. наук, профессор, руководитель дирекции АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование непилотируемых космических аппаратов. Автор 297 научных публикаций.  
e-mail: vorontsov@laspace.ru

**Графодатский Олег Сергеевич** — д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование непилотируемых космических аппаратов. Автор более 300 научных публикаций. e-mail: grafodatsky@laspace.ru

## **Analysis of the landing practice of the “Venus-9–14” and “Vega-1, -2” spacecrafts on the Venusian soil for the development of promising “Venus-D” spacecraft**

© S.P. Buslaev, V.A. Vorontsov, O.S. Grafodatsky

Lavochkin Research and Production Association, Khimki, Moscow region, 141400, Russia

*The article considers problems and prospects of landing future space vehicles on the ground of Venus in a new Venusian area, called “tessera” and having a complex terrain. The landing means the final stage of the spacecraft flight to the planet, i.e. the impact contact interaction of the spacecraft with the ground of the planet. The terrain in the areas of past landing of spacecrafts on Venus is compared with areas of possible landing sites in the future. A brief description of earlier tests of landing on grounds - analogues of Venusian ones is given and their application for perspective projects is analyzed. A mathematical model for studying the dynamics of the impact contact interaction of the landing gear with deformed Venusian soils is described. This model was used in the development of the “Venera-9–14” and “Vega-1, -2” landing vehicles. Based on the results of the analysis of their landing and the physical and mathematical simulation of the landing process, recommendations were developed for the implementation of the landing of the advanced Venera-D spacecraft in the regions of Venus with a complex terrain.*

**Keywords:** *grounding, the landing gear, drop tests, model of grounding*

### REFERENCES

- [1] Vorontsov V.A., Buslaev S.P. Skhemnye resheniya posadki dolgozhivushchego modulya na poverkhnost Venery [Schematics for landing a long-lived module on the surface of Venus]. *Trudy XXXIII akademicheskikh chteniy po kosmonavtike “Aktualnye problemy rossiyskoy kosmonavtiki”*. Moskva, 26–30 yanvarya 2009 [Proceedings of the XXXIII academic readings on cosmonautics “Actual problems of Russian cosmonautics”. Moscow, January 26–30, 2009]. Moscow, Komissiya RAN po razrabotke nauchnogo naslediya pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva [Commission of RAS on the research of scientific heritage of outer space exploration pioneers] Publ., 2009, pp. 470–477.
- [2] Buslaev S.P., Vorontsov V.A. Proektirovanie skhem posadki kosmicheskikh apparatov kak prodolzhenie kchem spuska i razrabotka sopushtvuyushchego matematicheskogo obespecheniya [Designing space vehicle landing patterns as an extension of the descent schemes and the development of related mathematics]. *Sistemnyy analiz, upravlenie i navigatsiya. Sbornik tezisov dokladov 14-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [System analysis, control and navigation. Collection of abstracts of the 14th International scientific conference]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2009, pp. 18–19.
- [3] Venus Lander Mission Concepts. *Short Course on Extreme Environments Technologies. Short Course Venus Lander Team. 6th International Planetary Probe Workshop, Atlanta, Georgia. June 22, 2008*. Georgia Tech Conference Center Publ. Available at: <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/26347/153-248-1-B.pdf?sequence=1> (accessed March 03, 2018).
- [4] *Venus Sample Return Mission*. Virginia Polytechnic and State University. Design Team Publ. Available at: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/courses/aoe4065/OldReports/venus.pdf> (accessed March 01, 2018).

- [5] Hall J.L. *Venus Environmental Challenger. Venus Seismology Study: Short Course. Part II: Exploring Venus with Landers, Orbiters and Balloons*. California Institute of Technology. Jet Propulsion Laboratory Publ., June 2, 2014. Available at: <http://kiss.caltech.edu/workshops/venus/presentations/hall.pdf> (accessed June 11, 2017).
- [6] Hunter G.W. *Long-lived Venus lander technologies*. NASA Glenn Research Center Publ. Available at: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/oct2009/presentations/hunterVenusLanderTechnologies.pdf> (accessed March 11, 2018).
- [7] Wall M. *Russia, US Mulling Joint Mission to Venus*. January 17, 2017. Available at: <https://www.space.com/35333-russia-nasa-venus-mission-venera-d.html> (accessed May 14, 2017).
- [8] Grossman L. *Science News*, vol. 193, no. 4, March 3, 2018, p. 14. Available at: <https://www.sciencenews.org/article/what-will-it-take-go-venus> (accessed April 10, 2018).
- [9] Wilson C., Zetterling C.-M., Pike W.T. *Venus Long-Life Surface Package (VL2SP)*. Cornell University Library. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.03365.pdf> (accessed April 10, 2018).
- [10] *NASA Studying Shared Venus Science Objectives with Russian Space Research Institute*. NASA, JPL Publ., March 10, 2017. Available at: [https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6774&utm\\_source=iContact&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=NASAJPL&utm\\_content=daily20170310-1](https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6774&utm_source=iContact&utm_medium=email&utm_campaign=NASAJPL&utm_content=daily20170310-1) (accessed June 11, 2017).
- [11] Zetterling C.-M. *Ultimate limits in high-temperature operation of semiconductors (not just SiC)*. KTH Royal Institute of Technology Publ., Stockholm, Sweden. Available at: <http://www.ece.stonybrook.edu/~serge/ARW-8/ABSTRACTS/Zetterling-2.pdf> (accessed March 19, 2018).
- [12] Neudeck Ph.G., Meredith R.D., Chen L., Spry D.J., Nakley L.M., Hunter G.W. *AIP Advances*, 2016, no. 6 (12). DOI: 10.1063/1.4973429 Available at: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4973429> (accessed May 19, 2017).
- [13] *NASA demonstrates electronics for longer Venus surface missions*. NASA Publ., February 10, 2017. Available at: <https://phys.org/news/2017-02-nasa-electronics-longer-venus-surface.html> (accessed April 19, 2018).
- [14] Anthony S. *We finally have a computer that can survive the surface of Venus*. Arstechnica Publ., 02.08.2017. Available at: <https://arstechnica.com/science/2017/02/venus-computer-chip/> (accessed April 19, 2018).
- [15] Buslaev S.P., Vernigora L.V., Vorontsov V.A., Pichkhadze K.M. Posadka na poverkhnost planety Venera. Osobennosti predlagaemykh mest posadki [Landing on the surface of the planet Venus. Features of the proposed landing sites]. *Sistemnyy analiz, upravlenie i navigatsiya. K 25-letiu osushchestvleniya proekta “Vega”*. *Sbornik tezisev dokladov 15-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [System analysis, control and navigation. Commemorating the 25th anniversary of the Vega project. Collection of abstracts of 15th International scientific conference]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010, pp. 16–17.
- [16] Abdrakhimov A.M. Geologic mapping of “Venera” and “Vega” landing site areas on Venus. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii ‘GIS dlya ustoychivogo razvitiya territoriy ‘INTERCARTO-8’*. Helsinki — St. Petersburg, 2002 [Proceedings of the International Conference ‘GIS for Sustainable Development of Territories “INTERCARTO-8”’. Helsinki — St. Petersburg, 2002]. St. Petersburg, 2002, pp. 426–429. Available at: [http://planetmaps.ru/files/2002\\_11.pdf](http://planetmaps.ru/files/2002_11.pdf) (accessed May 19, 2017).

- [17] Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Head J.W., Aittola M., Raitala J. *Planetary and Space Science*, 2007, vol. 55, pp. 2097–2112.
- [18] Bazilevsky A.T., Burba G.A., Bobina N.N., Shaikina V.P., Ivanov M.A., Kruchkov V.P., Pronin A.A., Shalimov I.V., Head J. W. Issledovanie geologicheskogo stroeniya i istorii planety Venera putem sostavleniya globalnoy geologicheskoy karty [Investigation of the geological structure and history of the planet Venus by compiling a global geological map]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii ‘GIS dlya ustoychivogo razvitiya territoriy ‘INTERCARTO-8’’. Helsinki — St. Petersburg, 2002* [Proceedings of the International Conference ‘GIS for Sustainable Development of Territories ‘INTERCARTO-8’’. Helsinki — St. Petersburg, 2002]. St. Petersburg, 2002, pp. 419–424. Available at: [http://planetmaps.ru/files/2002\\_9.pdf](http://planetmaps.ru/files/2002_9.pdf) (accessed May 19, 2017).
- [19] Buslaev S.P. Razlichnye modeli okruzhaushchey sredy na Venere i problemy posadki budushchikh venerianskikh KA na grunt [Various environmental models of Venus and the problems of landing future Venus space vehicles on the ground]. *Sistemnyy analiz, upravlenie i navigatsiya. Sbornik tezisov dokladov 20-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [System analysis, control and navigation. Collection of abstracts of 20th International scientific conference]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2015, pp. 124–127.
- [20] Florensky K.I., Basilevsky A.T., Pronin A.A., Burba S.A. *Rezultaty geologomorfologicheskogo analiza panoram Venery. Pervye panoramy poverkhnosti Venery* [Results of the geological and morphological analysis of the Venus panoramas. The first panoramas of the Venus surface]. Moscow, Nauka Publ., 1979, pp. 107–127.
- [21] Basilevsky A.T., Grigoryev E.I., Ermakov S.N., Karyagin V.P., Pichkhadze K.M., Cheremnykh S.V. *Proektirovanie spuskaemykh avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov: opyt razrabotki dialogovykh protsedur* [Design of descent automatic spacecrafts: Experience in developing interactive procedures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 264 p.
- [22] Buslaev S.P., Stulov V.A., Grigoryev E.I. *Kosmicheskije Issledovaniya — Cosmic Research*, 1983, vol. 21, no. 4, pp. 540–544.
- [23] Buslaev S.P. *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskij zhurnal ‘Polyot’ — All-Russian Scientific-Technical Journal ‘Polyot’ (‘Flight’)*, 2011, no. 1, pp. 35–40.
- [24] *Venus Flagship Mission Study: Report of the Venus Science and Technology Definition Team. Task Order NMO710851*. NASA Publ., April, 17, 2009, 292 p. Available at: <http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/venusFlagshipMissionStudy090501.pdf> (accessed May 19, 2017).
- [25] *Venus Intrepid Tessera Lander: Mission Concept Study Report to the NRC Decadal Survey Inner Planets*. NASA-GSFC, NASA-ARC Publ., March, 19, 2010. Available at: <http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/VenusIntrepidTesseraLander.pdf> (accessed May 19, 2017).
- [26] Glaze L., Baker C., Adams M. et al. Venus Mobile Explorer: A Mission Concept for the National Research Council Planetary Decadal Survey. *7th Int. Planetary Probe Workshop 12–18, 2010, Barcelona*, 27 p. Available at: <http://www.planetaryprobe.eu/IPPW7/proceedings/IPPW7%20Proceedings/Presentations/Session2/pr385.pdf> (accessed May 19, 2017).
- [27] Buslaev S.P. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina (Lavochkin Association Bulletin)*, 2011, no. 1, pp. 32–37.
- [28] Buslaev S.P. *Kosmicheskije Issledovaniya — Cosmic Research*, 1988, vol. 26, no. 1, pp. 41–48.

**Buslaev S.P.**, Cand. Sc. (Eng.), Engineer, Lavochkin Research and Production Association. Author of over 100 research publications. Research interests: design of landing gear, dynamics of landing space vehicles, automatic control of rover movement, artificial intelligence of rovers based on machine vision. e-mail: se.bouslaev@yandex.ru

**Vorontsov V.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Directorate, Lavochkin Research and Production Association. Author of 297 research publications. Research interests: design of unmanned space vehicles. e-mail: vorontsov@laspace.ru

**Grafodatsky O.S.**, Dr. Sc. (Eng.), First Deputy General Director, Lavochkin Research and Production Association. Author of over 300 research publications. Research interests: design of unmanned space vehicles. e-mail: grafodatsky@laspace.ru