



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 76 за 2018 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В.,
Киселева И. П., Корянов В.В.,
Лавренов С.М., Тучин А.Г.,
Тучин Д.А.

Баллистическое
проектирование полётов к
Венере в эпоху 2021-2028
гг. Области достижимости
при посадке

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Баллистическое проектирование полётов к Венере в эпоху 2021-2028 гг. Области достижимости при посадке / Ю.Ф.Голубев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 76. 28 с. doi:[10.20948/prepr-2018-76](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-76)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-76>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

Ю.Ф. Голубев, А.В. Грушевский,
И.П. Киселёва, В.В. Корянов, С.М. Лавренов,
А.Г. Тучин, Д.А. Тучин

Баллистическое проектирование
полётов к Венере
в эпоху 2021-2028 гг.
Области достижимости при посадке

Москва – 2018

**Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Киселёва И.П., Корянов В.В.,
Лавренов С.М., Тучин А.Г., Тучин Д.А.**

**Баллистическое проектирование полётов к Венере в эпоху
2021-2028 гг. Области достижимости при посадке**

Надёжные методы планирования экономичных перелётов к Венере и прохождений её сферы действия необходимы для увеличения количества научной и служебной аппаратуры на борту космических аппаратов и эффективного освоения Солнечной системы. Приводятся результаты использования современных методов баллистического проектирования межпланетных перелётов для планирования полётов к Венере в эпоху 2021-2036 годов с целью совершения гравитационного манёвра около неё, либо выхода на орбиту спутника Венеры и посадки на её поверхность. Работа, являясь продолжением первой работы цикла, основное внимание в которой было уделено построению окон старта, посвящена методике построения и непосредственному расчёту областей достижимости спускаемого аппарата на поверхности Венеры.

Ключевые слова: баллистическое проектирование, Венера, спускаемый аппарат, заданный район посадки, гравитационный манёвр, проект «Венера-Д»

**Golubev Yu.F., Grushevskii A.V., Kiseleva I.P., Koryanov V.V.,
Lavrenov S.M., Tuchin A.G., Tuchin D.A.**

**Mission Design for Venusian Projects of the 2021-2028 Years Epoch.
Reachability Areas of the Descent Vehicle**

Secure methods of the cost-effective flights to Venus and the passage of its gravity sphere are necessary to increase the amount of scientific and service equipment on board spacecraft and effectively exploration of the solar system. The results of the modern methods of ballistics design using for interplanetary flights to Venus in 2021-2036 epoch are given with the purpose of accomplishing a gravitational maneuver around it, or entering the Venusian satellite orbit for the landing on its surface. While in the first work of the cycle the main attention was devoted to the construction of the launch windows, the second work devoted to the calculation of the reachability areas of the descent vehicle on the surface of Venus.

Key words: mission design, Venus, descent module, target region of accessibility, gravity assist, “Venera-D” mission

Введение

Разработка экономичных баллистических схем полётов КА к Венере и прохождения её сферы действия актуальна и необходима для увеличения полезной нагрузки КА за счёт снижения массы топлива. Баллистическое проектирование подобных схем, в частности, является существенной составной частью перспективного отечественного проекта «Венера-Д» [Засова 2017], предусматривающего посадку спускаемого модуля на её поверхность в заданном районе. Отечественные космические миссии к Венере традиционно доминировали в исследованиях Венеры, основная часть фундаментальных знаний о планете получена советскими миссиями в 1961-1985 годах [Засова 2017]. В те годы к Венере было запущено 18 автоматических станций и совершено 10 посадок – все успешные. НАСА также осуществило два успешных орбитальных проекта «Пионер-Венера» и, позднее — «Магеллан».

После многолетнего перерыва Венера изучалась лишь с орбиты, например европейским проектом «Венера-Экспресс» (2005-2015 гг.).

Проект «Венера-Д» является следующим шагом после успешной серии миссий «Венера» и «ВеГа» в 1970-1980-х годах. Качественным отличием современного посадочного аппарата от программы «ВеГа» является оснащённость знаниями о геологии поверхности по результатам радарных исследований КА «Венера-15,16» и КА «Магеллан». Посадочный аппарат будет садиться не вслепую, как раньше, а в местность с известным геологическим контекстом.

В работе приводятся результаты использования современных методов баллистического проектирования межпланетных перелётов для планирования полётов к Венере в эпоху 2021-2028 гг. с целью посадки КА на её поверхность в заданном районе, анализируются способы реализации гесперианских проектов и повышения их эффективности. В первой работе цикла-триады основное внимание было уделено построению окон старта, в настоящей – расчёту

соответствующих областей достижимости спускаемого аппарата на поверхности Венеры. Заключительная работа будет посвящена проблематике использования более эффективных баллистических схем полётов к Венере, предварительно найденных для указанной эпохи.

1. Краткая предыстория гесперианских миссий

Отечественная автоматическая межпланетная станция (АМС) «Венера-3» первой достигла поверхности другой планеты 1 марта 1966 года. В США в 1978 г. была осуществлена миссия «Пионер-Венера», представлявшая собой двойной запуск: первый — орбитальный аппарат, второй — один большой и три малых посадочных модуля. Они получили обилие данных, касающихся атмосферы, но посадка не планировалась, и спускаемые аппараты прекратили измерения на высоте 12 км. Таким образом, успешно работали на поверхности Венеры только советские аппараты. К настоящему времени реализован целый ряд отечественных космических проектов сближения с Венерой и посадки на её поверхность (табл. 1).

Таблица 1

Отечественные проекты изучения Венеры

АМС	Дата		Координаты посадки, град.		Примечание
	старт	подлёт	широта	долгота	
«Венера-1»	1961/02/12	1961/05/19			пролёт на расстоянии ~100 тыс. км
«Венера-2»	1965/11/12	1966/02/27			пролёт на расстоянии ~24 тыс. км
«Венера-3»	1965/11/16	1966/03/01			достигла поверхности
«Венера-4»	1967/06/12	1967/10/18	19.0	38.0	
«Венера-5»	1969/01/05	1969/05/16	-3.0	18.0	

«Венера-6»	1969/01/10	1969/05/17	-5.0	23.0	
«Венера-7»	1970/08/17	1970/12/15	-5.0	351.0	
«Венера-8»	1972/03/27	1972/07/22	-10.0	335.0	
«Венера-9»	1975/06/08	1975/10/22	31.7	290.8	ИСВ
«Венера-10»	1975/06/14	1975/10/25	16.0	291.0	ИСВ
«Венера-11»	1978/09/09	1978/12/25	-14.0	299.0	
«Венера-12»	1978/09/14	1978/12/21	-7.0	294.0	
«Венера-13»	1981/10/30	1982/03/01	-7.5	303.5	
«Венера-14»	1981/11/04	1982/03/05	-13.0	310.0	
«Венера-15»	1983/06/02	1983/10/10			ИСВ
«Венера-16»	1983/06/07	1983/10/14			ИСВ
«Вега-1»	1984/12/15	1985/06/11	7.9	176.7	Комета Галлея

Современные проекты по изучению Венеры с использованием посадочных аппаратов должны реализовать существенные требования для приведения спускаемого модуля к одной из заданных точек посадки на её поверхности.

В середине октября 1983 года на орбиты спутников Венеры вышли космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» с радиолокационной системой для картографирования поверхности планеты. Результатом проведённых исследований, в частности, явилось создание впоследствии атласа поверхности Венеры [Котельников 1989]. Радиолокационное картографирование, начатое «Венерами», продолжила беспосадочная АМС НАСА «Магеллан». Для планирования её съёмок американским исследователям, по их просьбе, были переданы данные съёмки АМС «Венера-15,16». В 1990-1993 гг. «Магеллан» снял всю поверхность Венеры при более высоком пространственном разрешении.

В дальнейшем, с использованием результатов миссии «Магеллан», были составлены более точные гипсометрические карты рельефа и геологические карты Венеры (в частности — гипсометрическая карта рельефа Венеры ГАИШ 2006 г. масштаба 1:90 000 000 (рис. 1)).

В современную эпоху планирование современных венерианских миссий с посадкой на её поверхность проводится при совместном рассмотрении областей достижимости КА на поверхности Венеры в конкретную эпоху стартов с

«картами приоритетов типов местности», существенно использующих полученные морфологические и геологические карты с нанесёнными на них первоочередными объектами для изучения (рис. 2,3) [Засова 2017, Иванов 2017]. Как уже отмечалось, посадочный модуль теперь может осуществлять посадку не вслепую, как раньше, а в местность с известным геологическим контекстом.

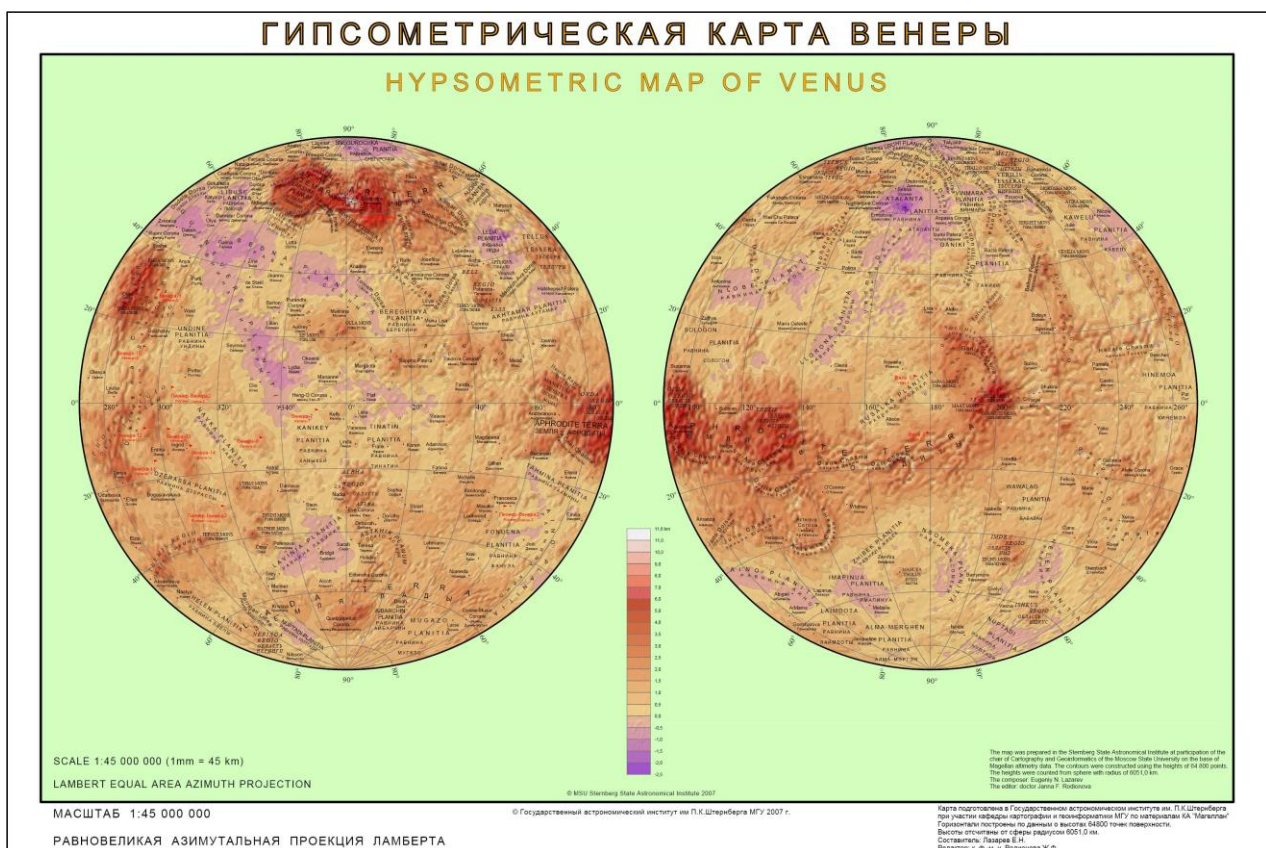


Рис. 1 — Гипсометрическая Карта рельефа Венеры

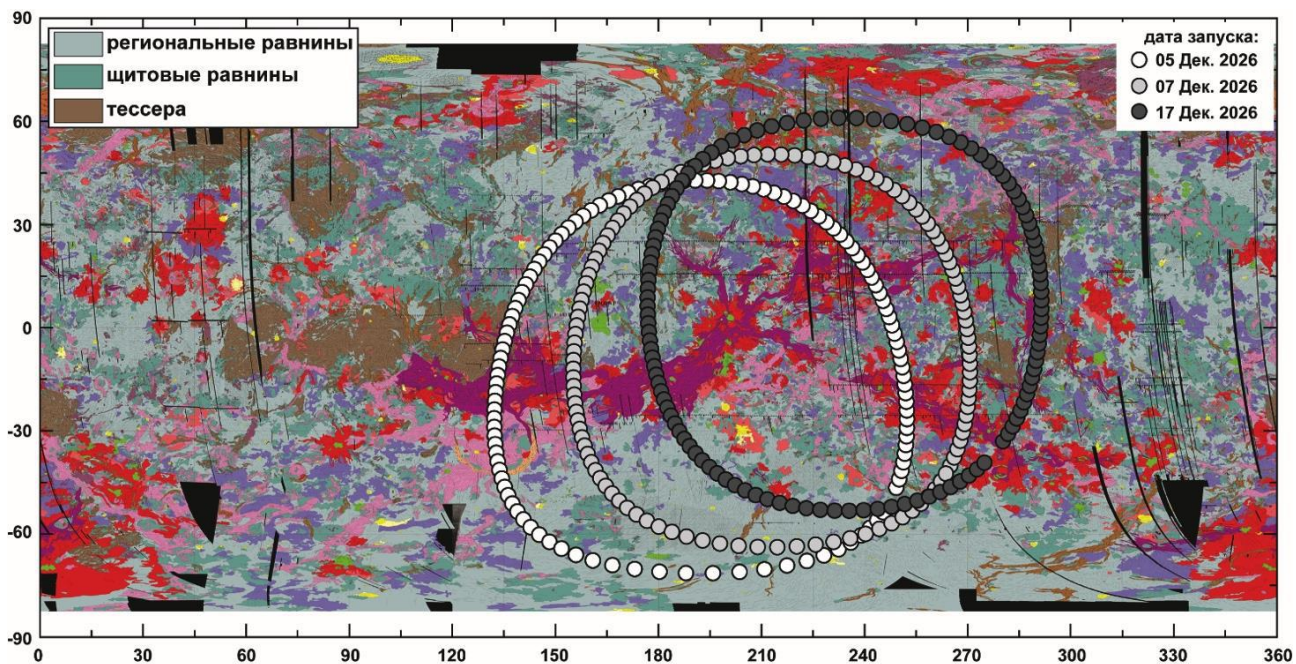


Рис. 2 — Геологическая карта Венеры

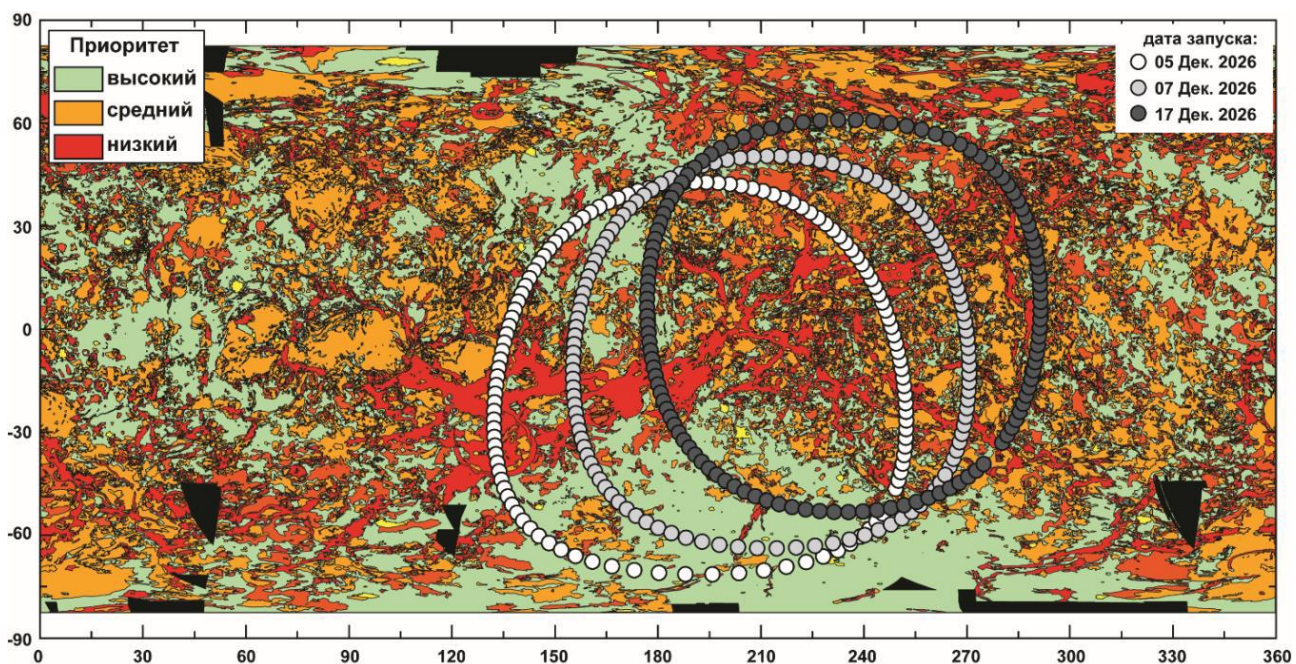


Рис. 3 — «Карта приоритетов Венеры», соответствующая геологической карте Венеры, на которой отмечены баллистические зоны достижимости (точки белого и серого цвета), зависящие от даты запуска, и карта приоритета типов местности на поверхности Венеры [Засова 2017, Иванов 2017]. Точками отмечено положение зон достижимости по датам

2. Методика расчёта окон стартов

Методика расчёта окон стартов для межпланетных перелётов подробно изложена в научной литературе [*Соловьев 1973, Тарасов 1977*]. Так как перелёт к Венере требует больших энергетических затрат, то при расчёте приоритетом считается минимизация характеристической скорости. Возможность перелёта к Венере с минимальной энергетикой повторяется каждые восемь лет в период великих противостояний. При некотором увеличении, по сравнению с минимально необходимым, запаса характеристической скорости КА, появляется возможность перелётов к Венере каждые 1.6 года.

Для первоначальной приближённой оценки оптимальных дат стартов предполагалась траектория перелёта гомановского типа в круговой модели движения планет Солнечной системы. Первоначальное приближение дат стартов использовалось при их уточнении с учётом эксцентricности орбит планет и их некомпланарности. Задавалась сетка значений дат отлёта и дат подлёта, для которых решалась задача Ламберта с получением скоростей отлёта и подлёта. Сумма этих скоростей даёт необходимую для перелёта характеристическую скорость. На основе проведённого расчёта строятся изолинии характеристической скорости на координатной плоскости. По оси абсцисс откладываются даты стартов, по оси ординат – длительность перелёта.

Далее задаётся расстояние перицентра, полушарие прохождения асимптотической оси подлётной гиперболы и наклонение к экваториальной плоскости Венеры. Ищется перелёт с околоземной орбиты на траекторию, обеспечивающую подлёт с заданными параметрами.

3. Оптимальные даты стартов к Венере для эпохи 2021-2028 гг.

В работе рассчитаны окна стартов для периода 2021– 2028 гг.

В табл. 2 сведены даты стартов, наилучшие с точки зрения затрат характеристической скорости. Наилучшие даты стартов к Венере приходятся на май 2023 года и на декабрь 2024 года.

Таблица 2

Наилучшие даты стартов к Венере в 2021-2028 гг.

Дата		Длительность перелёта, сутки	Скорость, км/с		
старт	подлёт		отлёт	подлёт	сумма
2021/10/27	2022/04/05	160	2.80	4.76	7.56
2023/05/26	2023/10/27	154	2.56	3.71	6.27
2024/12/06	2025/05/15	160	3.27	2.70	5.97
2026/06/09	2026/12/09	183	3.86	2.98	6.84
2028/01/11	2028/07/24	195	4.63	3.49	8.11

Окно стартов в 2024 году требует минимальных затрат характеристической скорости, а окно стартов в 2028 году – максимальных. Разница между максимальными и минимальными затратами составляет 2 км/с (рис. 4).

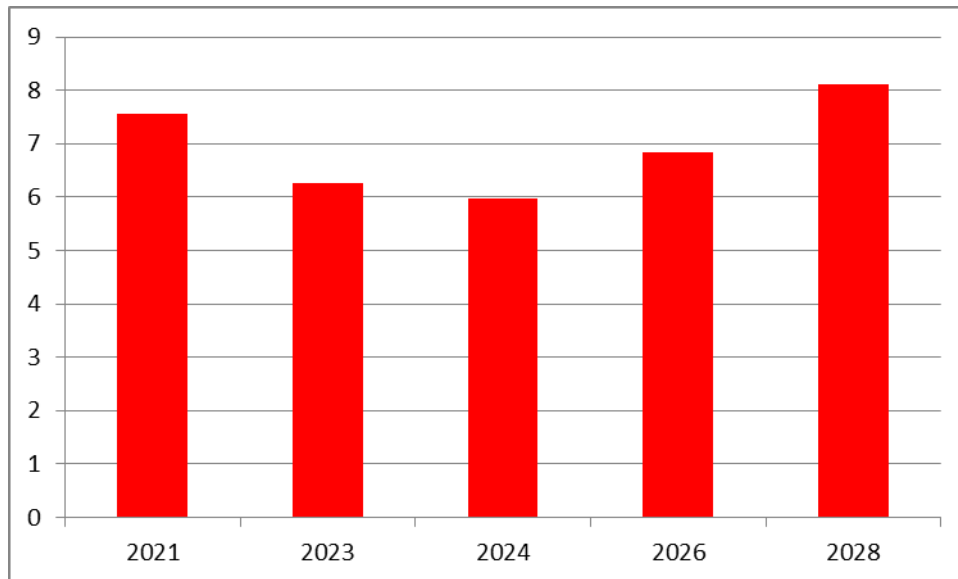


Рис. 4 — Затраты характеристической скорости на перелёт от Земли к Венере в окнах стартов 2021-2028 гг. По оси ординат — затраты характеристической скорости в км/с для центральной точки окна

Приведём окна стартов для эпохи 2021-2028 гг. для случаев межпланетных перелётов АМС Земля – Венера (рисунки 5-7).

На каждом из рисунков приведены контурные графики – линии уровня характеристической скорости, затрачиваемой на перелёт (в англоязычной литературе – porkchop plots). Суммарная характеристическая скорость состоит из суммы отлётной характеристической скорости (манёвр разгона от планеты отправления) и прилётной характеристической скорости (манёвр торможения около планеты назначения). По оси абсцисс отложены даты старта (в сутках). Начало оси соответствует дате 01 января года, указанного в подписи к рисунку. Например, для рисунка 5 это 2020/01/01. По оси ординат показано время перелёта (в сутках). Справа от графика размещена легенда, где показано соответствие цвета значению суммарной скорости. Светло-коричневый цвет означает, что скорость превышает верхнее предельное значение, установленное для графика. Для рисунка 6 оно составляет 10.5 км/с. Курсор (в форме крестика) поставлен в точку с минимальной суммарной характеристической скоростью (его значение указано рядом). Стороны крестика продолжены до пересечения с осями координат. Рядом с этими пересечениями проставлены дата и время отлёта (по оси абсцисс), дата и время прилёта (по оси ординат).

Предполагаемая ранняя эпоха старта миссии «Венера-Д» — 2026 год (окно старта 2026/05/13 – 2026/07/08). Тем не менее, для проекта рассматриваются даты старта вплоть до 2036 года. На рис. 8-9 приведены контурные графики изолиний (линий постоянной величины) суммарной характеристической скорости для дополнительных востребованных в баллистическом проектировании миссии «Венера Д» окон старта (2029-2036 годы).

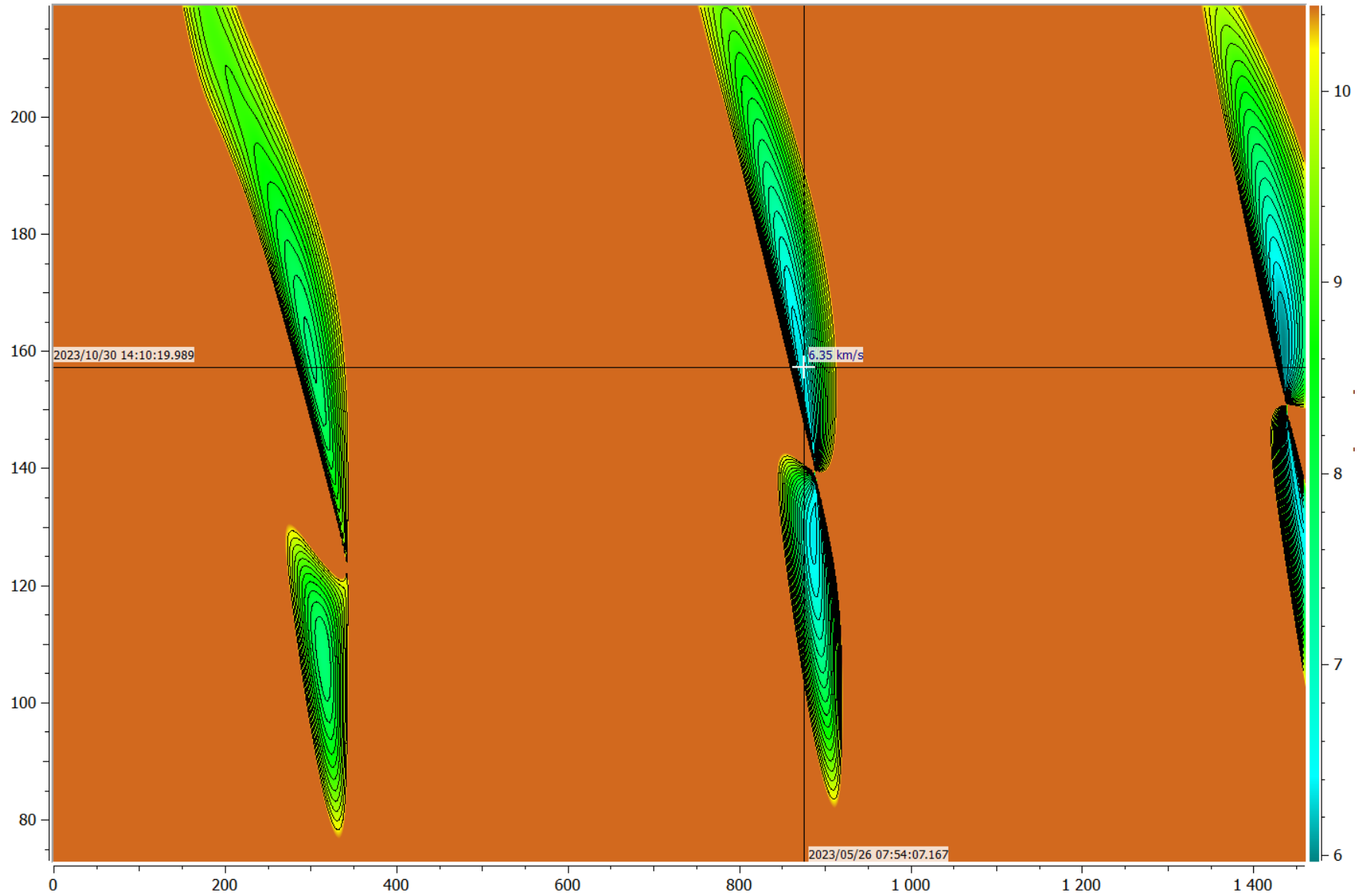


Рис. 5 — Перелёт Земля—Венера. 2021-2024 годы. Суммарная характеристическая скорость

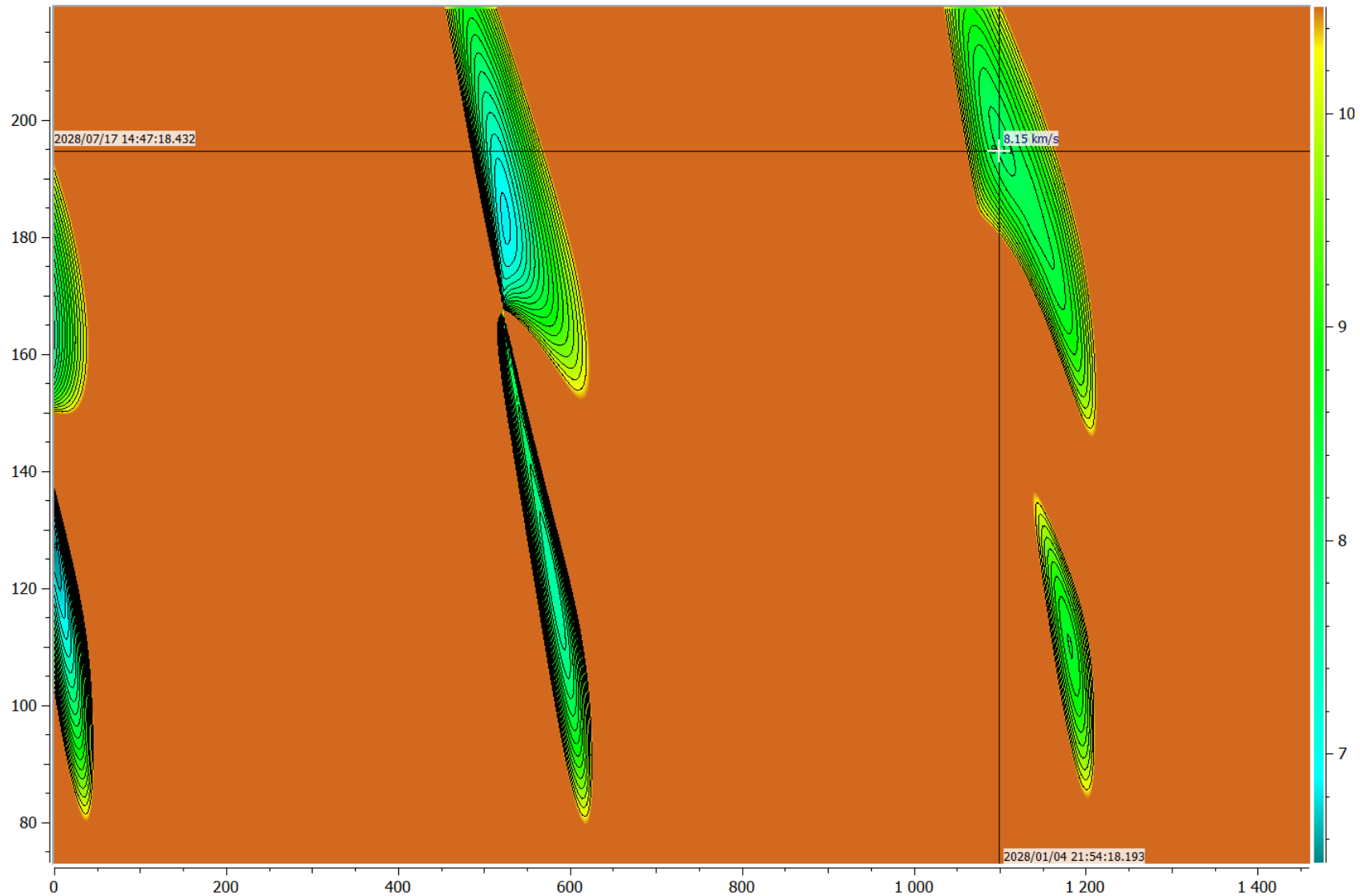


Рис. 6 — Перелёт Земля-Венера. 2025-2028 годы. Суммарная характеристическая скорость

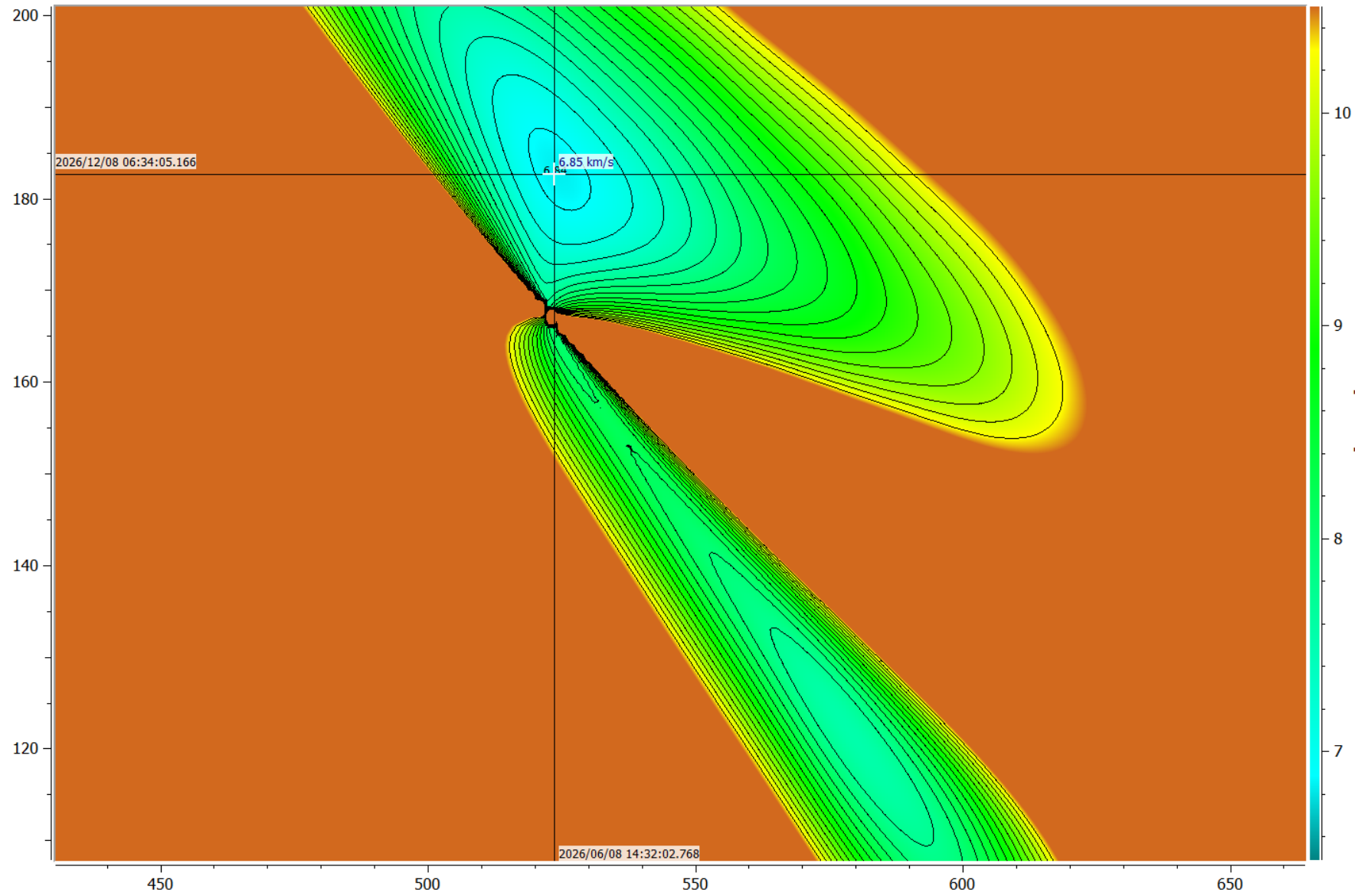


Рис. 7 — Перелёт Земля-Венера. Окно стартов 2026 г. Суммарная характеристическая скорость

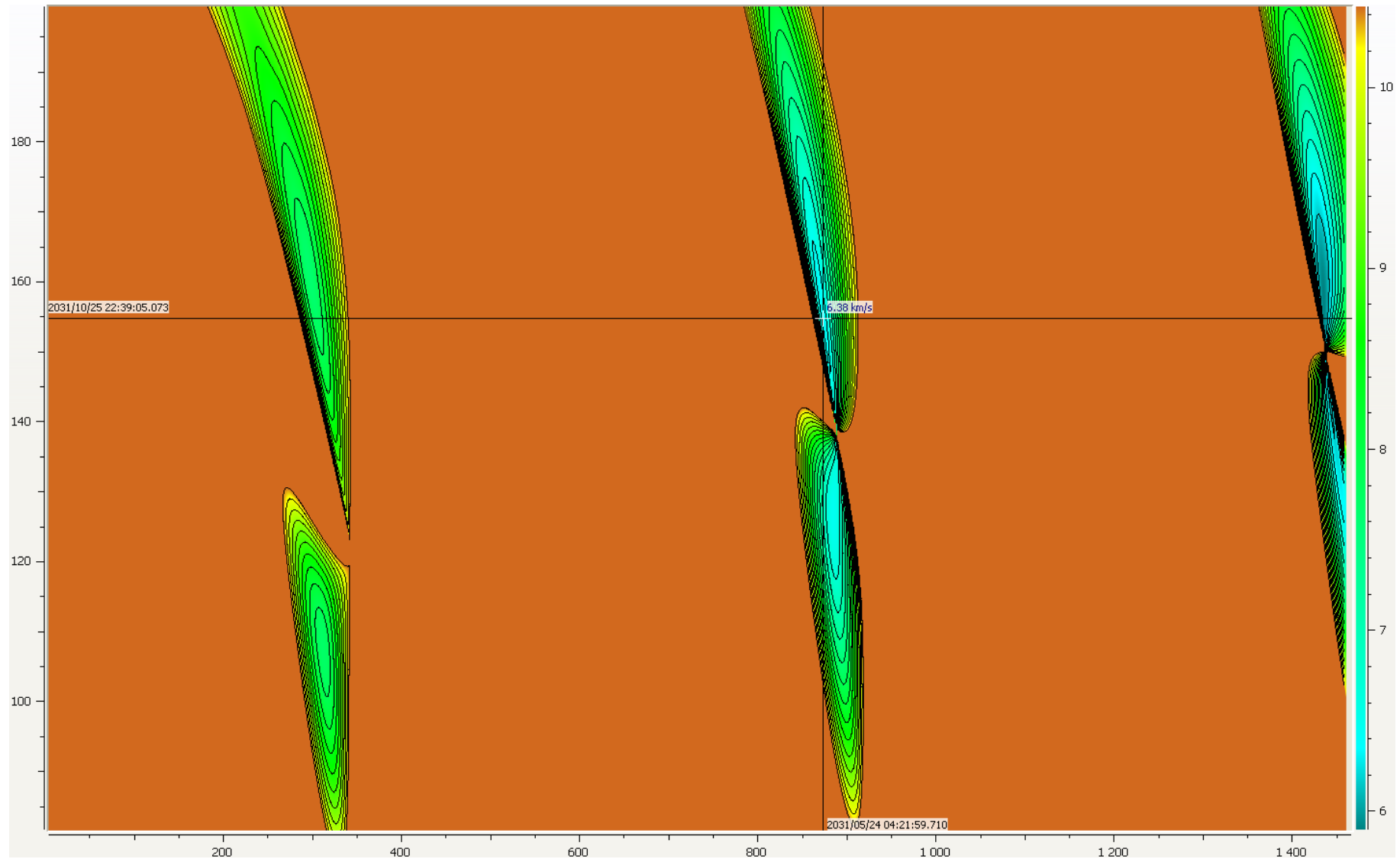


Рис. 8 — Перелёт Земля—Венера. 2029-2032 годы. Суммарная характеристическая скорость

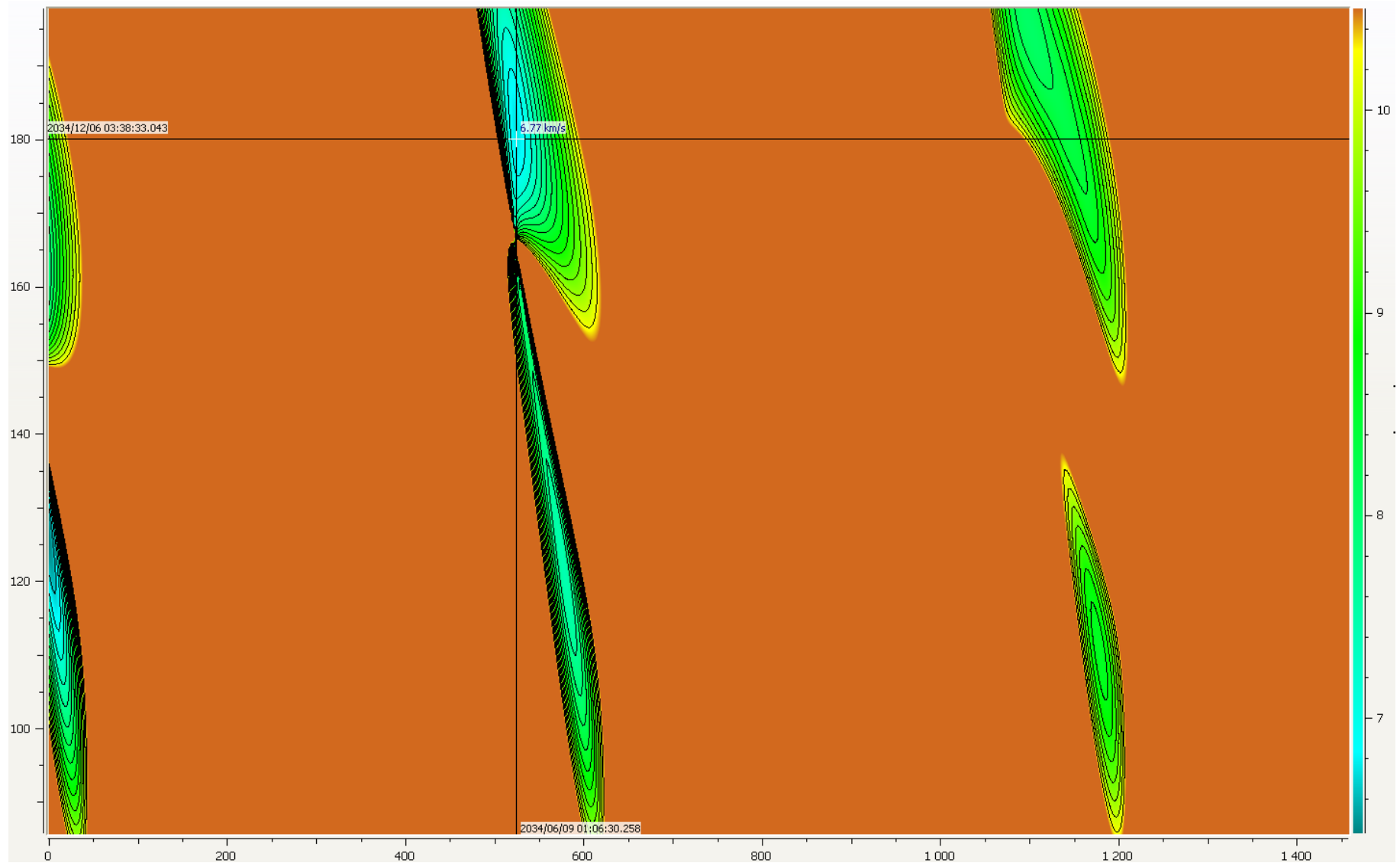


Рис. 9 — Перелёт Земля—Венера. 2033-2036 годы. Суммарная характеристическая скорость

4. Особенности задачи приведения спускаемых аппаратов в заданные области атмосферы Венеры

Задача приведения спускаемых аппаратов в заданные области атмосферы Венеры, а также задача формирования венероцентрических орбит с заданными параметрами была, например, исследована при баллистическом проектировании миссий США «Пионер-Венера-1,2» [Dyer 1974], стартовавшей с Земли 08 августа 1978 года. Найденные при этом проектные решения достаточно универсальны и по-прежнему актуальны при проектировании новых миссий. При подготовке перелёта была разработана карта участков достижимости поверхности планеты в зависимости от координат и выбранного угла входа аппарата в атмосферу Венеры. Данная миссия состояла из основного аппарата и четырёх (одного большого и трёх малых) спускаемых зондов, отделяющихся от него при подлёте к планете.

Точка входа в атмосферу определяется направлением вектора асимптотической скорости подлётной гиперболы. Характеристики подлётной гиперболы в свою очередь определяются выбором окна старта с Земли.

Угол входа спускаемых аппаратов в атмосферу не должен был превышать 20 градусов. Также в ходе проектирования учитывались ограничения по углу между основным аппаратом и зондами после их отделения на участке подлёта к Венере и во время спуска в её атмосфере. Эти ограничения были вызваны необходимостью поддерживать связь основного аппарата со спускаемыми зондами для передачи телеметрической информации с них на Землю. Максимальный допустимый угол между основным аппаратом и зондами был принят равным 60 градусов.

Основной аппарат должен был войти в атмосферу Венеры и пролететь над спускаемыми аппаратами для обеспечения ретрансляции их сигналов на Землю. Угол входа основного аппарата в атмосферу должен быть менее 10 градусов, чтобы обеспечить достаточное время полёта в атмосфере.

Основной аппарат, использованный в качестве носителя четырёх зондов в указанной миссии, мог быть использован и в качестве орбитального исследовательского аппарата с научной аппаратурой на борту.

В качестве венероцентрической орбиты аппарата обычно выбирается полярная эллиптическая орбита с высотой апоцентра, ограниченной снизу запасом топлива для импульса торможения, и высотой перигенетра около 200 км, с периодом, близким к 24 земным часам для упрощения организации сеансов связи с аппаратом [Dyer 1974]. Свободным для выбора параметром является широта точки под перигенетрием орбиты.

Выбор точки выполнения манёвра перехода с пролётной гиперболы на эллиптическую орбиту определяет для сформированной орбиты её точку перигенетрия. Область оптимальных вариантов для выбранной траектории перелёта [Dyer 1974] приведена на рис. 10.

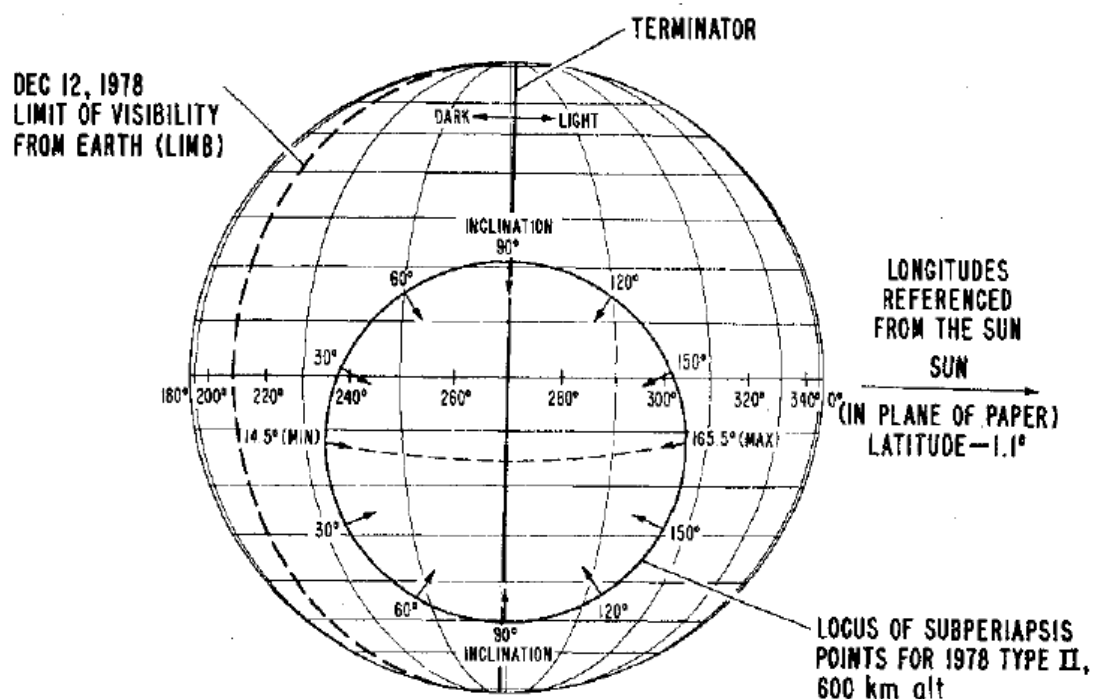


Рис. 10 — Область, оптимальная для выполнения манёвра перехода с пролётной гиперболы на эллиптическую орбиту — множество потенциальных проекций перигенетра эллиптической орбиты на поверхность Венеры и соответствующие им наклонения

Современные задачи исследования Венеры (например – в отечественном проекте «Венера-Д») требуют не только обеспечения перелёта к планете, но и сброса орбитального субспутника и спускаемого аппарата (СА) в заданном районе. Субспутник предназначен для полёта в атмосфере Венеры на высоте 50 км, а СА должен обеспечить проведение научных экспериментов по изучению причин исчезновения воды с планеты. Разделение основного КА и субспутника происходит при подлёте к Венере на гиперболической орбите после выполнения импульса торможения. Осуществив отделение субспутника, КА переходит на круговую орбиту искусственного спутника Венеры (ИСВ). На орбите ИСВ происходит отделение СА и его посадка на поверхность.

5. Архитектура проекта «Венера-Д»

Архитектура проекта предварительно создана на основе опыта предыдущих успешных запусков к Венере [Засова 2017]. Спускаемый аппарат (который содержит посадочный и, возможно, другие атмосферные модули) отделяется от перелетного модуля в окрестности Венеры. Перелетный модуль выходит на орбиту и становится орбитальным аппаратом (ОА). В дальнейшем он служит для связи с Землей, другими модулями, принимает информацию с посадочного аппарата (ПА), обеспечивает выполнение приоритетных научных экспериментов, установленных на борту, и передачу информации на Землю.

Основные этапы миссии:

- 1) Пуск с Земли с использованием ракеты-носителя «Ангара-5» с космодрома Восточный. Основная дата запуска – июнь 2026 года. Резервные даты пуска – 2028 и 2029 годы.
- 2) Переход на перелетную траекторию Земля—Венера, используя водородный РБ «КВТК» или РБ «Бриз».
- 3) Перелет Земля—Венера с необходимыми коррекциями.

- 4) Отделение спускаемого модуля, который, кроме ПА, может содержать долгоживущие малые станции или/и аэростатные зонды, за трое суток до подлета к Венере.
- 5) Перемещение орбитального модуля в связке с VAMP (Venus Atmospheric Manoeuvrable Platform) на высокоэллиптическую, четырёхсуточную орбиту, используя главный двигатель.
- 6) Отделение VAMP; VAMP входит в атмосферу самостоятельно.
- 7) Вход в атмосферу ПА и долгоживущих или/и аэростатных зондов внутри спускаемого КА.
- 8) Штатные научные операции на поверхности и передача информации с ПА и других возможных элементов через ОА на Землю.
- 9) Выход орбитального модуля на суточную орбиту. Отделение субспутника.

6. Методика расчёта районов баллистической достижимости спускаемого аппарата на поверхности Венеры и результаты её применения для основных окон старта

Опишем вкратце методику построения областей достижимости спускаемого аппарата на поверхности.

Угол входа СА в атмосферу составляет $-20^{\circ} \pm 1^{\circ}$. Меньшее значение может привести к «отскакиванию» СА от атмосферы, большее значение может привести к сгоранию аппарата в атмосфере Венеры. За счёт выбора наклона орбиты КА могут быть достигнуты различные точки на поверхности Венеры.

Для проведения расчётов используется картинная плоскость (ξ, η) . Исходными данными для программы расчёта точек на поверхности Венеры являются дата и время старта, стартовая скорость V_{∞} , наклонение орбиты перелёта, расстояние перицентра для подлётной гиперболы. Решается краевая задача. В результате расчёта уточняются дата и время старта, а также V_{∞} .

Вычисляются координаты (ξ, η) на картинной плоскости. Определяется точка посадки на поверхности Венеры (широта и долгота). Дополнительно определяются углы Земля–СА–Венера и Солнце–СА–Венера (на момент времени, когда СА входит в атмосферу Венеры).

Для каждого старта из табл. 2 представлены три рисунка для случая прохождения асимптотической оси подлётной гиперболы через северное полушарие (для южного полушария должна получаться симметричная конфигурация). На первом рисунке изображено геометрическое место точек посадки на плоскости «долгота–широта». На втором рисунке оно же представлено на сфере, изображающей поверхность Венеры. Стрелка показывает ось вращения Венеры (остриё стрелки направлено на Север), показаны также экватор и меридианы для 0° и 180° . Отрезок соединяет центр Венеры и точку $(0^\circ, 0^\circ)$. На третьем рисунке показаны значения углов Земля–СА–Венера (синяя линия) и Солнце–СА–Венера (красная линия) в зависимости от долготы точки посадки.

Окно стартов 2021 года

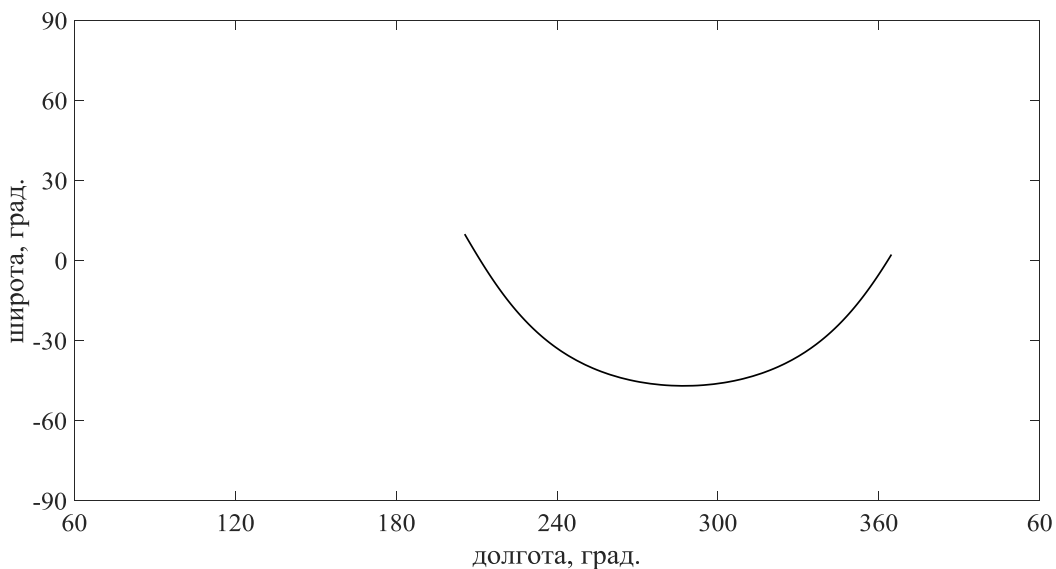


Рис. 11 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2021 года (плоскость)

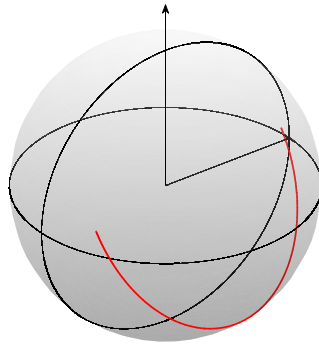


Рис. 12 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2021 года (сфера, ветвь пролёта через северное полушарие)

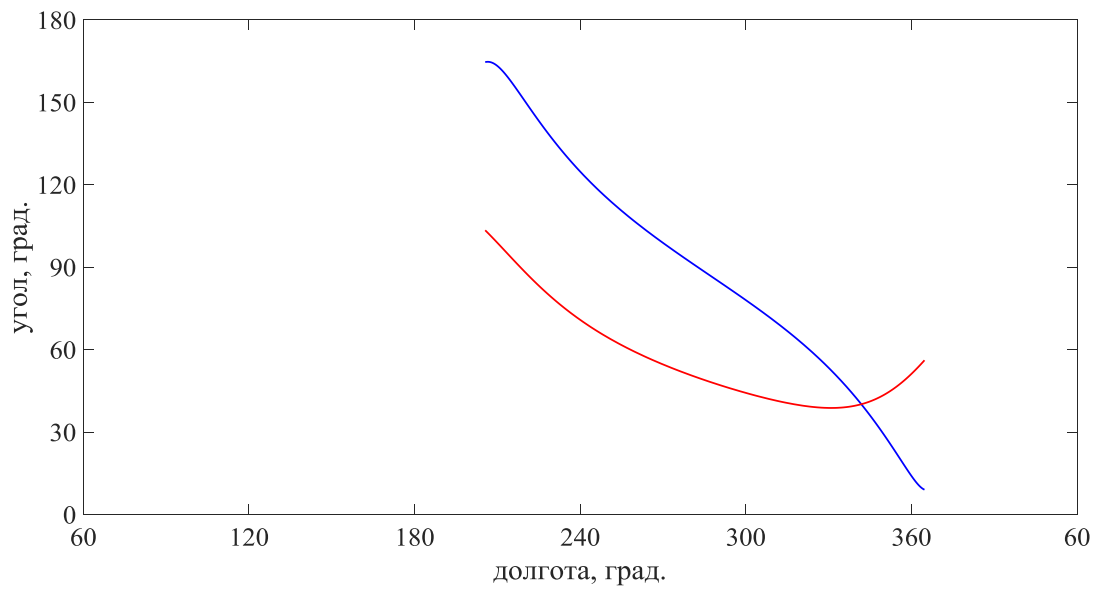


Рис. 13 — Зависимость углов Земля–СА–Венера (град.) и Солнце–СА Венера (град.) от долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2021 года

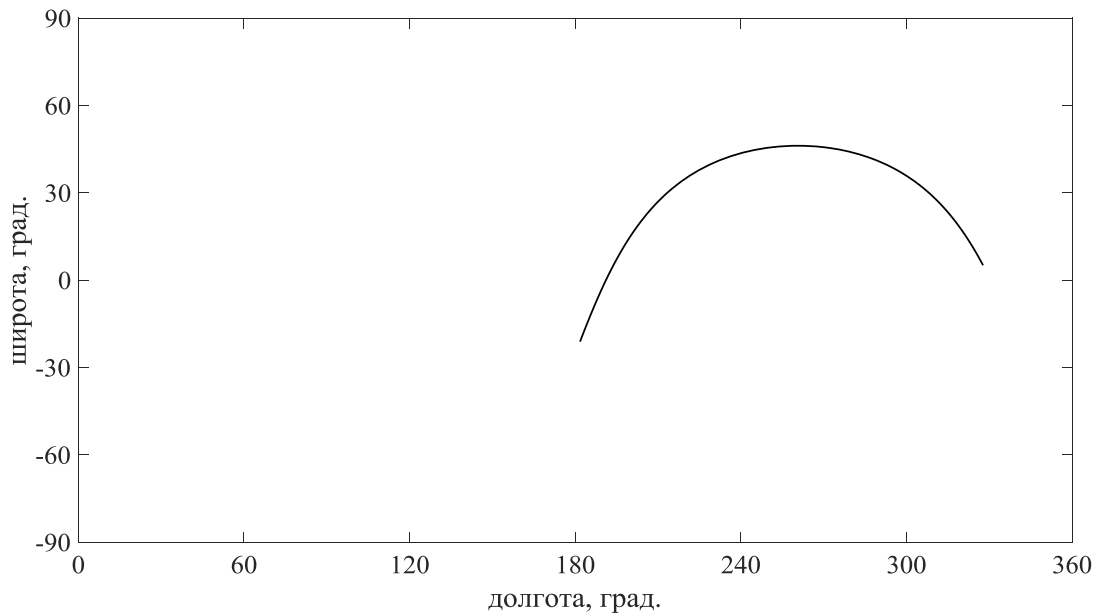
Окно стартов 2023 года

Рис. 14 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2023 года (плоскость)

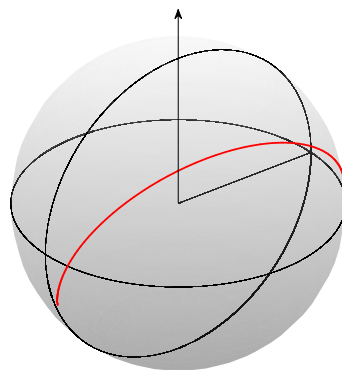


Рис. 15 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2023 года (сфера, ветвь пролёта через северное полушарие)

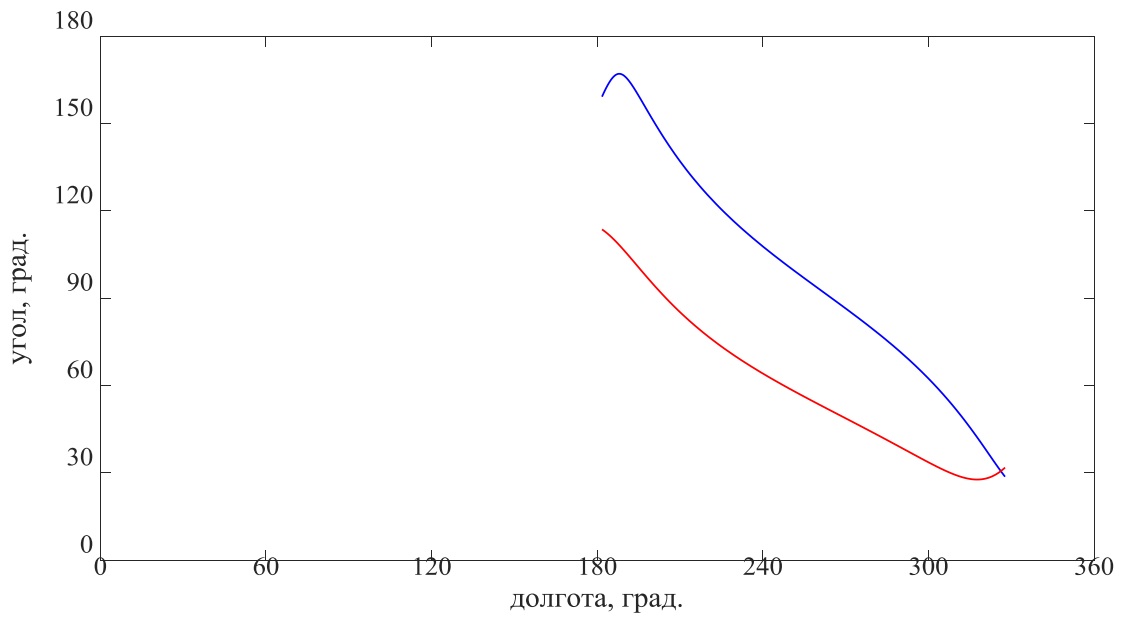


Рис. 16 — Зависимость углов Земля–СА–Венера (град.) и Солнце–СА–Венера (град.) от долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2023 года

Окно стартов 2024 года

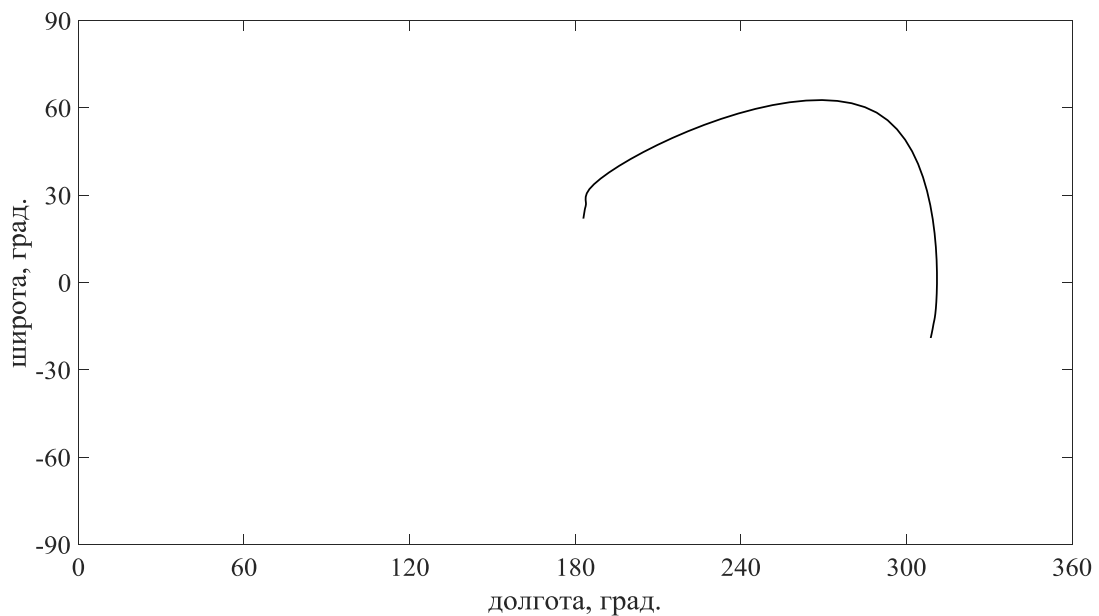


Рис. 17 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2024 года (плоскость)

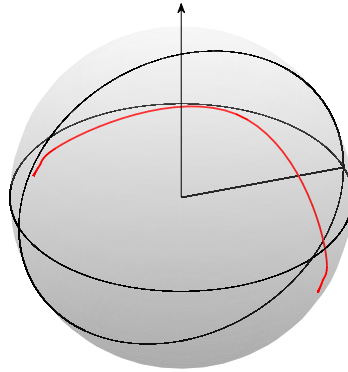


Рис. 18 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2024 года (сфера, ветвь пролёта через северное полушарие)

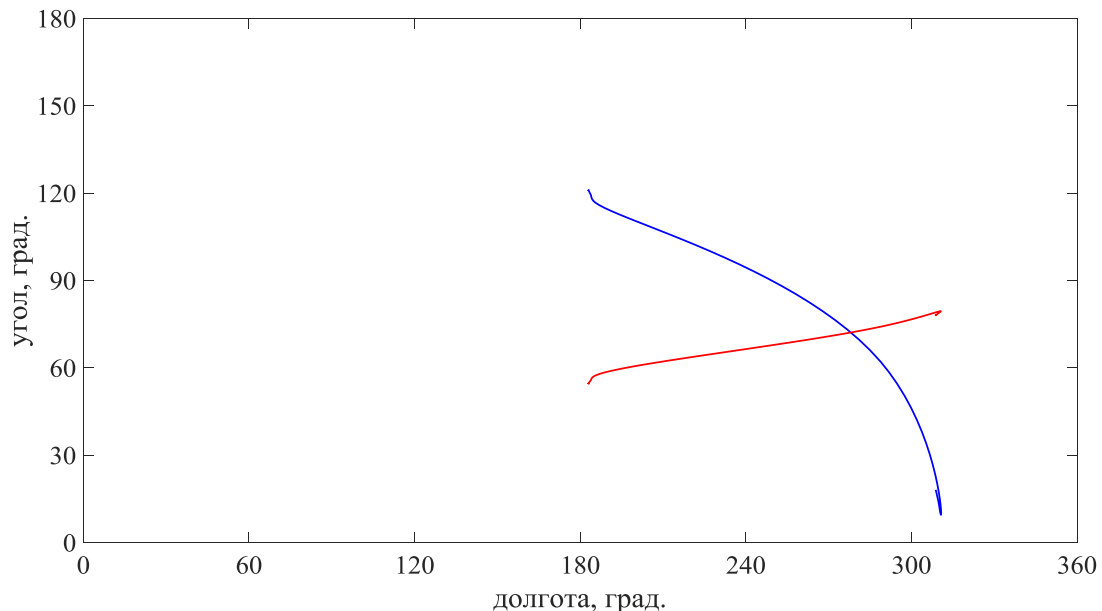


Рис. 19 — Зависимость углов Земля–СА–Венера (град.) и Солнце–СА–Венера (град.) от долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2024 года

Окно стартов 2026 года

Для наиболее благоприятного по реализации космических проектов окна стартов 2026 года приведены области достижимости на поверхности Венеры в более подробном формате времени подлёта, построенные интерактивно с помощью с помощью пакета прикладных программ ValCalc, созданного в БЦ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (рис. 20). Приведена также их суперпозиция

(факторизованная «область достижимости» на поверхности Венеры) на всём окне подлёта (2026/05/14 – 2026/07/03).

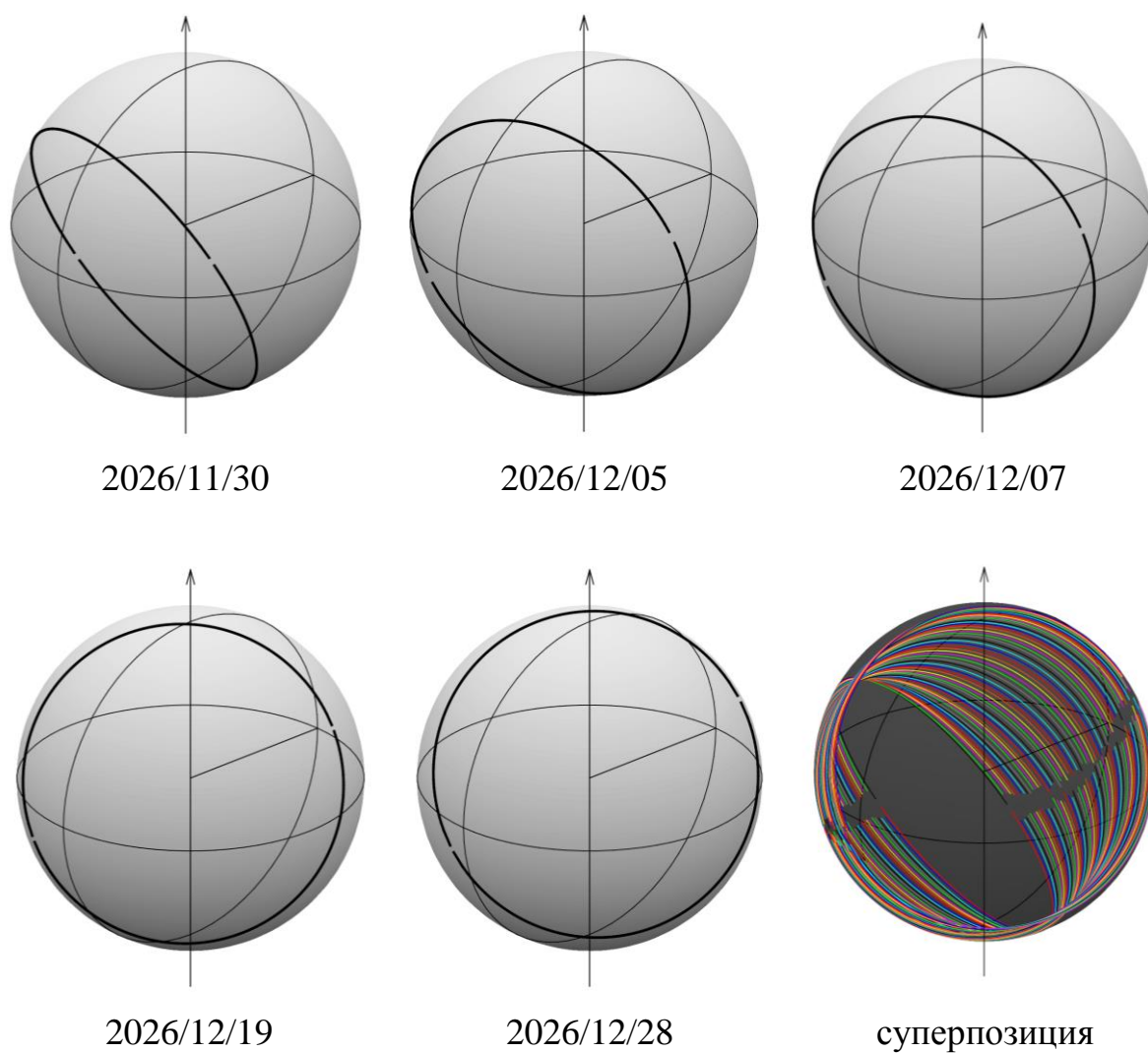


Рис. 20 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2026 года по датам (сфера) при пролётах через северное либо южное полушария и их суперпозиция по всему окну подлёта 2026/05/14 – 2026/07/03

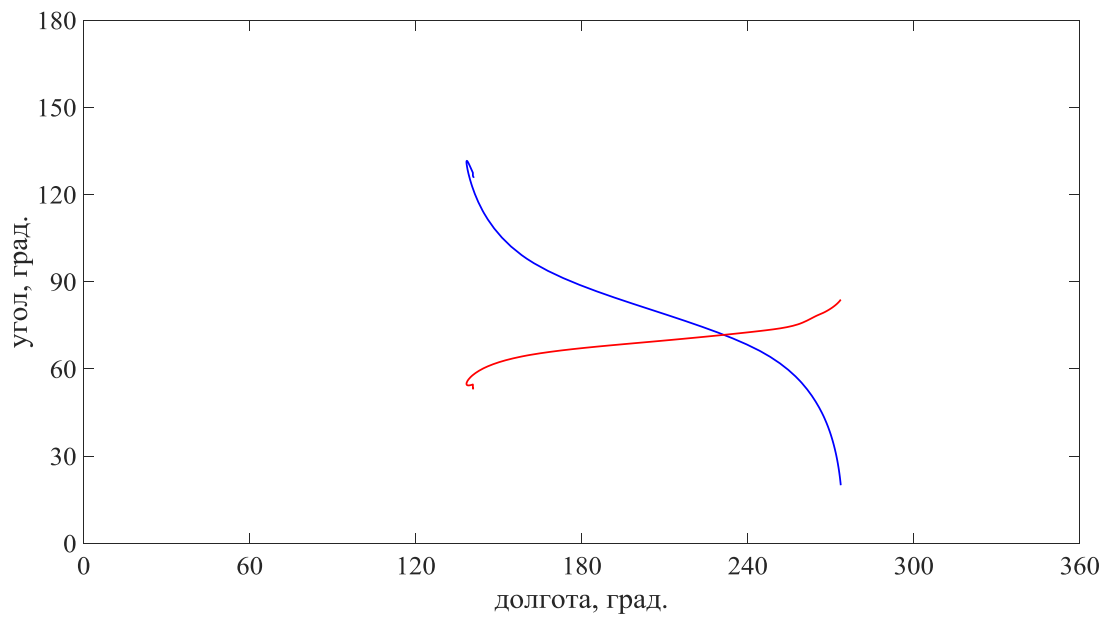


Рис. 21 — Зависимость углов Земля–СА–Венера (град.) и Солнце–СА–Венера (град.) от долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2026 года, ветвь пролёта через северное полушарие

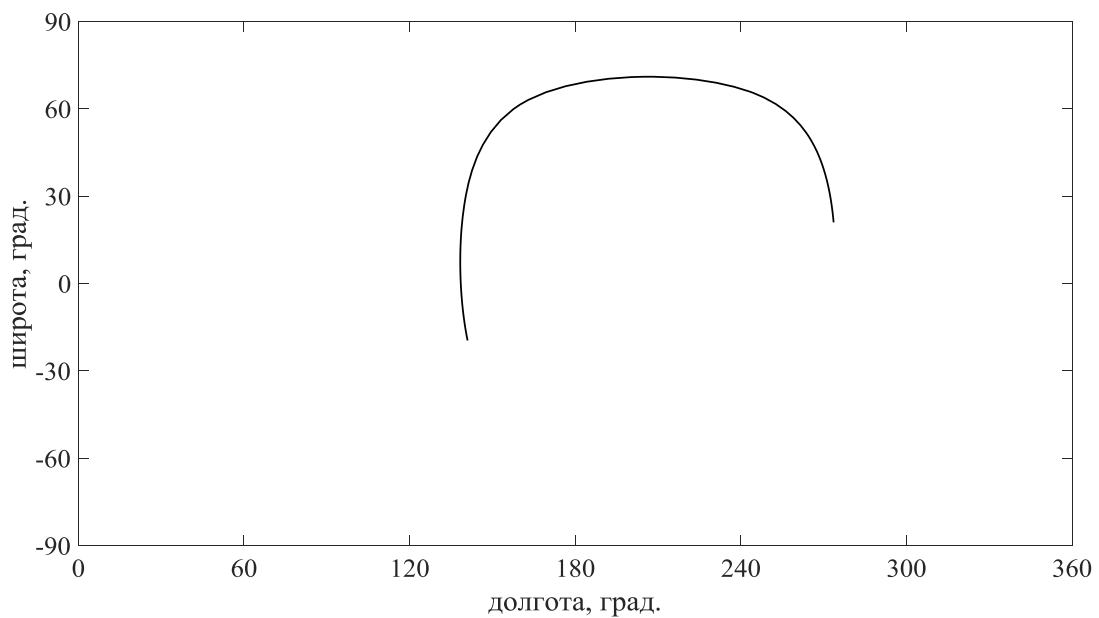


Рис. 22 — Зависимость широты и долготы точки посадки (град.) для окна стартов 2026 года (плоскость), ветвь пролёта через северное полушарие

Выводы

С использованием современных методов баллистического проектирования межпланетных перелётов для планирования полётов к Венере с целью посадки посадочного модуля на её поверхность в заданном районе в эпоху 2021-2036 гг. построены окна старта и соответствующие области достижимости спускаемого аппарата на поверхности Венеры.

Разница между максимальными и минимальными затратами характеристической скорости составляет 2 км/с. Окно стартов 2028 года по стандартной орбитально-десантной баллистической схеме требует экстремальных затрат характеристической скорости 8.11 км/с. Реализация перелётной траектории с такими характеристиками при действующем состоянии энергетических характеристик отечественной ракетной техники может оказаться проблематичной. При отказе от регулярных окон стартов становятся нереализуемыми некоторые регионы области достижимости КА на поверхности Венеры, поскольку они меняются со сменой эпохи. Требуется либо понижение частоты возможных перелётов к Венере только до одного раза в 8 лет, либо переход к использованию более эффективных баллистических схем [Castillo 2003], предварительно найденных для указанной эпохи.

Список использованных источников

- Иванов 2017* Иванов М.А., Засова Л.В., Герасимов М.В., Кораблев О.И., Маров М.Я., Зелёный Л.М., Игнатъев Н.И., Тучин А.Г. Природа различных типов местности на поверхности Венеры и выбор перспективных мест посадки для спускаемого аппарата экспедиции ВЕНЕРА-Д // *Астрономический вестник*. 2017. Т. 51. № 1. С. 3-23. doi: 10.7868/S0320930X17010029.
- Засова 2017* Засова Л.В., Иванов М.А., Воронцов В.А., Хатунцев И.В., Кораблев О.И. Земля и Венера: разные судьбы соседних планет. Пояснительная записка. Совместный российско-американский проект по исследованию Венеры. М., 2017 (под ред. ак. Л.М. Зеленого).
- Котельников 1989* Котельников В.А., Барсуков В.Л., Аким Э.Л. и др. Атлас поверхности Венеры. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1989. – 328 с.

- Соловьев 1973* Соловьев Ц.В., Тарасов Е.В. Прогнозирование межпланетных полётов. – М.: Машиностроение, 1973. – 400 с.
- Тарасов 1977* Тарасов Е.В. Космонавтика. Механика полёта и баллистическое проектирование. – М.: 1977. – 216 с.
- Castillo 2003* Castillo A., Bellò-Mora M., Gonzalez J., Janin G., Graziani F., Teofilatto P., Circi C. Use of weak stability boundary trajectories for planetary capture // Proc. of 54th International Astronautical Congress, 29 September - 3 October 2003, Bremen, Germany, (IAF-03-A.P.31.). Vol. 1. P. 766-774.
- Duvall 2005* Duvall A.L., Justus C.G., Keller V.W. Global Reference Atmospheric Models for Aeroassist Applications // 3rd International Planetary Probe Workshop, 27 June – 1 July 2005, Anavyssos, Attiki, Greece. URL: https://solarsystem.nasa.gov/docs/58_duvall.pdf
- Dyer 1974* Dyer J.W., Nunamaker R.R., Cowley Jr. J.R., Jackson R.W. Pioneer Venus mission plan for atmospheric probes and an orbiter // AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, vol.11, №10, NASA Ames Research Center, Moffett Field, Calif, October 1974.
- Labunsky 1998* Labunsky A.V., Papkov O.V., Sukhanov K.G. Multiple Gravity Assist Interplanetary Trajectories. – Earth Space Institute Book Series, Gordon and Breach Publishers, London, 1998. P. 33–68.
- Venus Atmosphere Model* Venus Atmosphere Model URL: ftp://hanna.ccmc.gsfc.nasa.gov/pub/modelweb/planets/venus/pv_atmos/pvatmos.for

Оглавление

Введение	3
1. Краткая предыстория гесперианских миссий	4
2. Методика расчёта окон стартов	8
3. Оптимальные даты стартов к Венере для эпохи 2021-2028 гг.	8
4. Особенности задачи приведения спускаемых аппаратов в заданные области атмосферы Венеры	16
5. Архитектура проекта «Венера-Д»	18
6. Методика расчёта районов баллистической достижимости спускаемого аппарата на поверхности Венеры и результаты её применения для основных окон старта.....	19
Выводы	27
Список использованных источников	27