



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

Препринты ИПМ • Препринт № 75 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. Окна старта

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Баллистическое проектирование полётов к Венере в эпоху 2021-2028 гг. Окна старта / Ю.Ф.Голубев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 75. 32 с. doi:[10.20948/prepr-2018-75](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-75)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-75>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской академии наук**

**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.
Окна старта**

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. Окна старта

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 2021-2028 гг. с целью совершения гравитационного манёвра около неё, либо выхода на орбиту спутника Венеры и посадки на её поверхность. В первой работе цикла основное внимание уделено построению окон старта, во второй – 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. Launch Windows

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 2021-2028 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. In the first work of the cycle the main attention is paid 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. Отечественный проект «Интергелиозонд» [Голубев 2017а, 2017б] и европейская миссия «Solar Orbiter» [Sánchez Pérez 2012], запускаемые для изучения приполярных областей Солнца из внеэклиптических положений, предполагают очередные сближения КА с Венерой для проведения около неё гравитационных манёвров с целью изменения орбитальной энергии исследовательских КА и ориентации их орбит. В NASA (США) до 2025 года планируется осуществить ряд проектов изучения Венеры: Surface and Atmospheric Geochemical Explorer, Venus Intrepid Tessera Lander, Venus Flagship Design Reference Mission, Venus Climate Mission [ИКИ 2013].

В работе приводятся результаты использования современных методов баллистического проектирования межпланетных перелётов для планирования полётов к Венере в эпоху 2021-2028 гг. (пролётные траектории, миссии доставки и, в частности, 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 уделено построению окон старта, во второй – расчёту соответствующих областей достижимости спускаемого аппарата на поверхности Венеры. Заключительная статья 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. К настоящему времени реализован целый ряд отечественных космических проектов сближения с Венерой и посадки на её поверхность (табл. 1, рис. 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

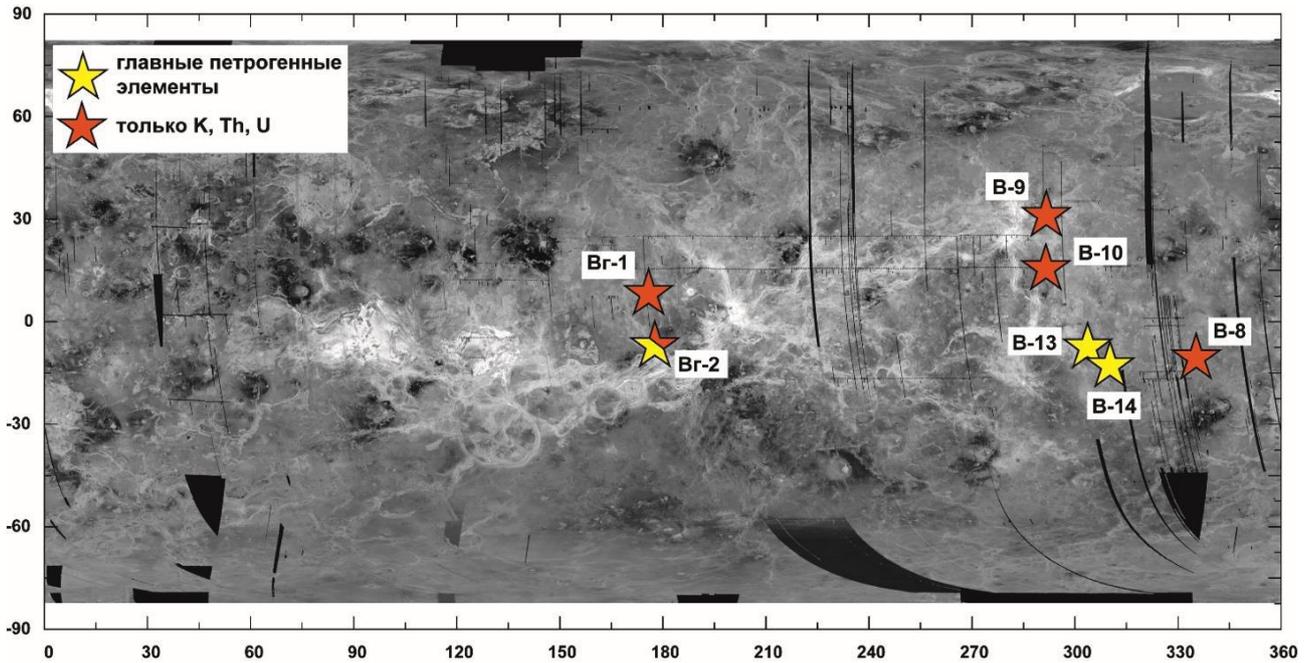


Рис. 1 — Места посадки советских спускаемых аппаратов серии «Венера» (В) и «Вега» (Вг) на поверхности Венеры [Засова 2017]

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 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 (рис. 2).

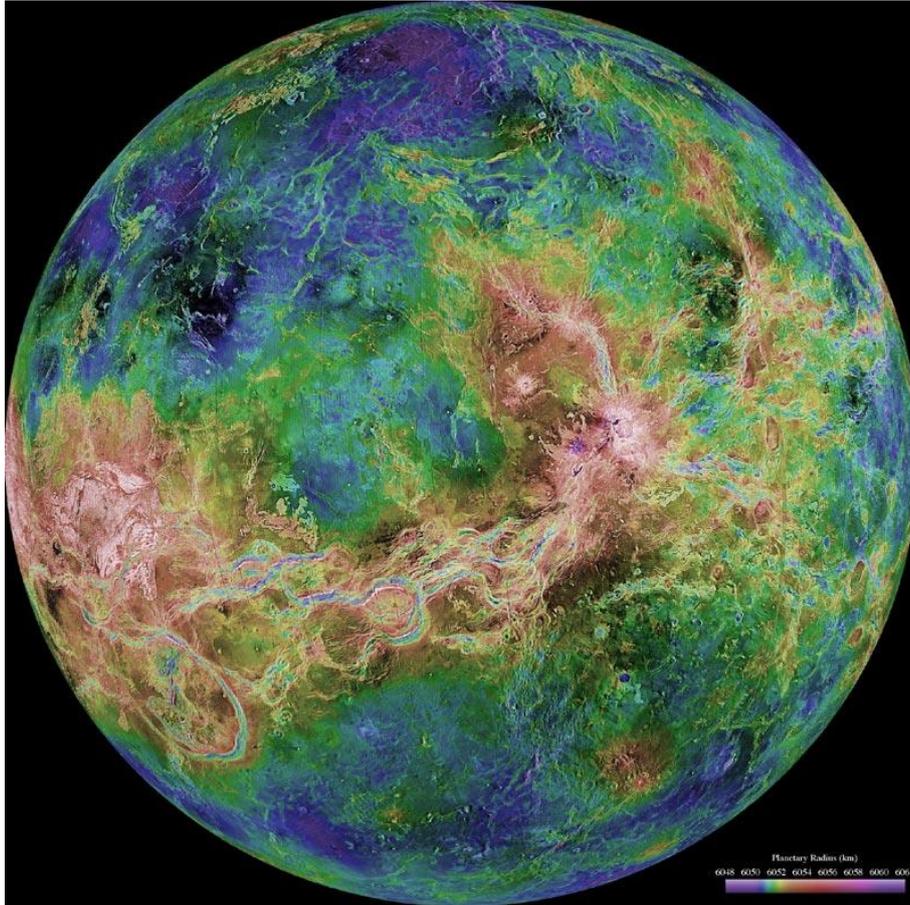


Рис. 2 — Полушарие Венеры с центральным меридианом 180°
(по радиолокационным измерениям, проведённым АМС «Магеллан»)

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. 3)).

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. 4) [Засова 2017, Иванов 2017].

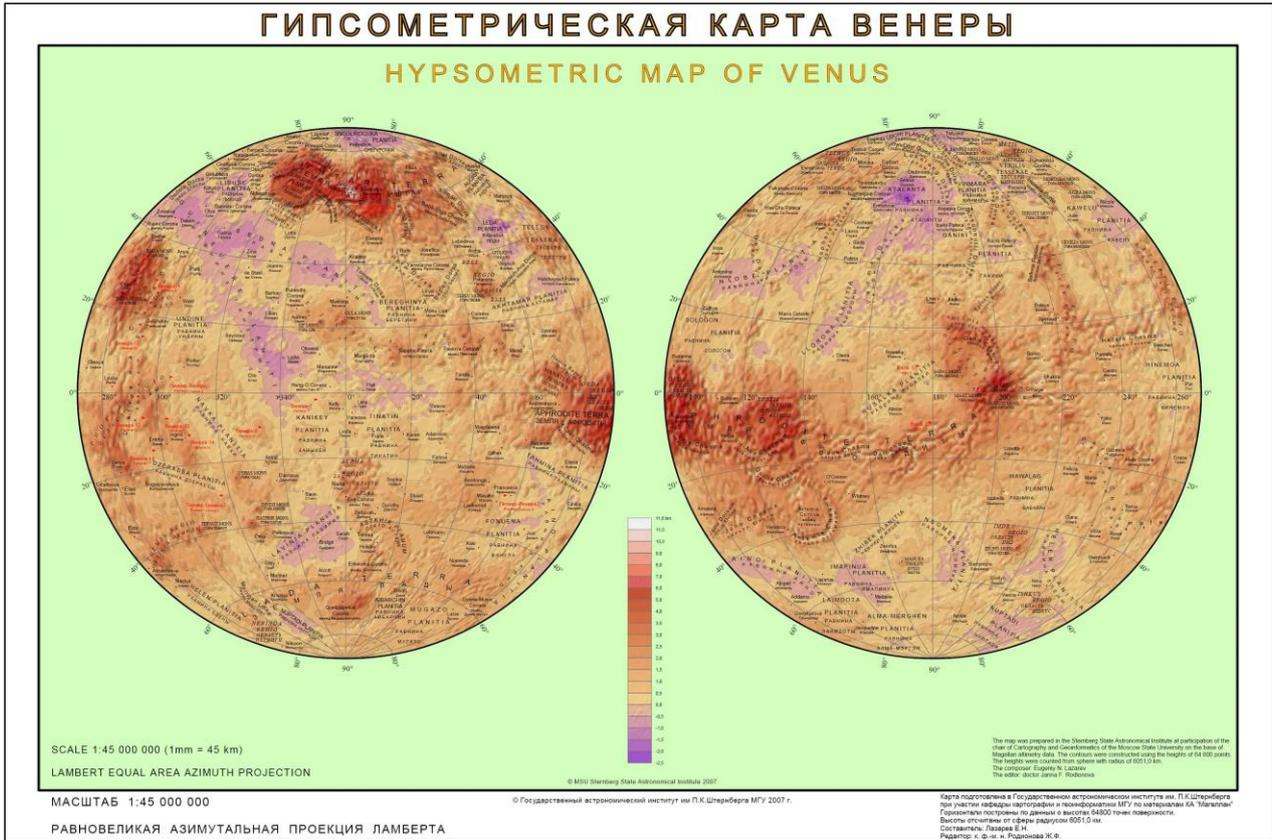


Рис. 3 — Гипсометрическая карта рельефа Венеры

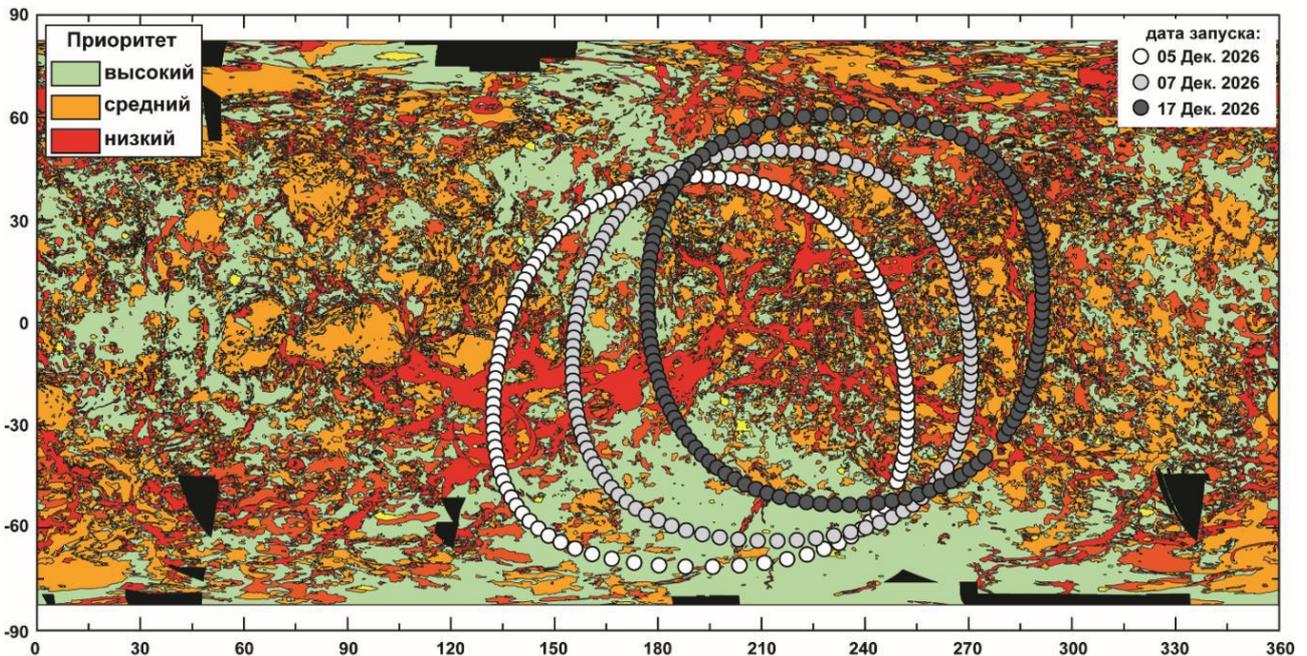


Рис. 4 — «Карта приоритетов Венеры», соответствующая геологической карте Венеры, на которой отмечены баллистические зоны достижимости (точки белого и серого цвета), зависящие от даты запуска, и карта приоритета типов местности на поверхности Венеры [Засова 2017, Иванов 2017].

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 планете с минимальной потребной энергетикой периодически повторяется. В первую очередь, цикличность определяется синодическим периодом T_{syn} повторения конфигурации взаимного расположения двух планет, практически фиксированным относительно звёзд [Сихарулидзе 2011], который выражается через периоды обращения этих планет

$$T_1 \text{ и } T_2 \text{ как } T_{syn} = \frac{T_1 T_2}{|T_2 - T_1|}.$$

В классической астрономии противостояниями называют конфигурации расположения Земли на одной прямой с Солнцем и внешней планетой, при котором прямое восхождение последних различается на 180 градусов. Промежуток времени между двумя сближениями Земли и внешней планеты до минимально возможного расстояния называют периодом их великих противостояний. В современной астродинамике [Сихарулидзе 2011] это понятие обобщается на общий случай двух планет, при этом цикличность их взаимной конфигурации в гелиоцентрической системе координат приближённо определяется как наименьшее общее кратное сидерических периодов планет и их синодического периода.

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 задаются 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.

Сетка окон стартов и диапазон длительностей перелёта рассчитывались с дискретностью один земные сутки.

3. Оптимальные даты стартов к Венере для 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.

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. 5).

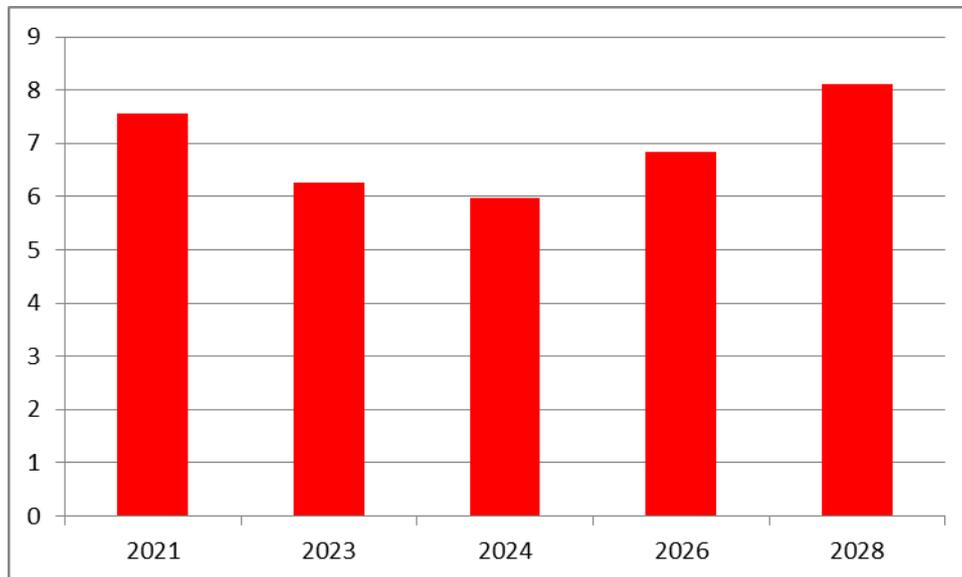


Рис. 5. Затраты характеристической скорости на перелёт от Земли к Венере в окнах стартов 2021-2028 гг. По оси ординат — затраты характеристической скорости в км/с для центральной точки окна

Приведём окна стартов для эпохи 2021-2028 гг. для случаев межпланетных перелётов АМС Земля–Венера (рисунки 6-11).

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 6 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, выбранное 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).

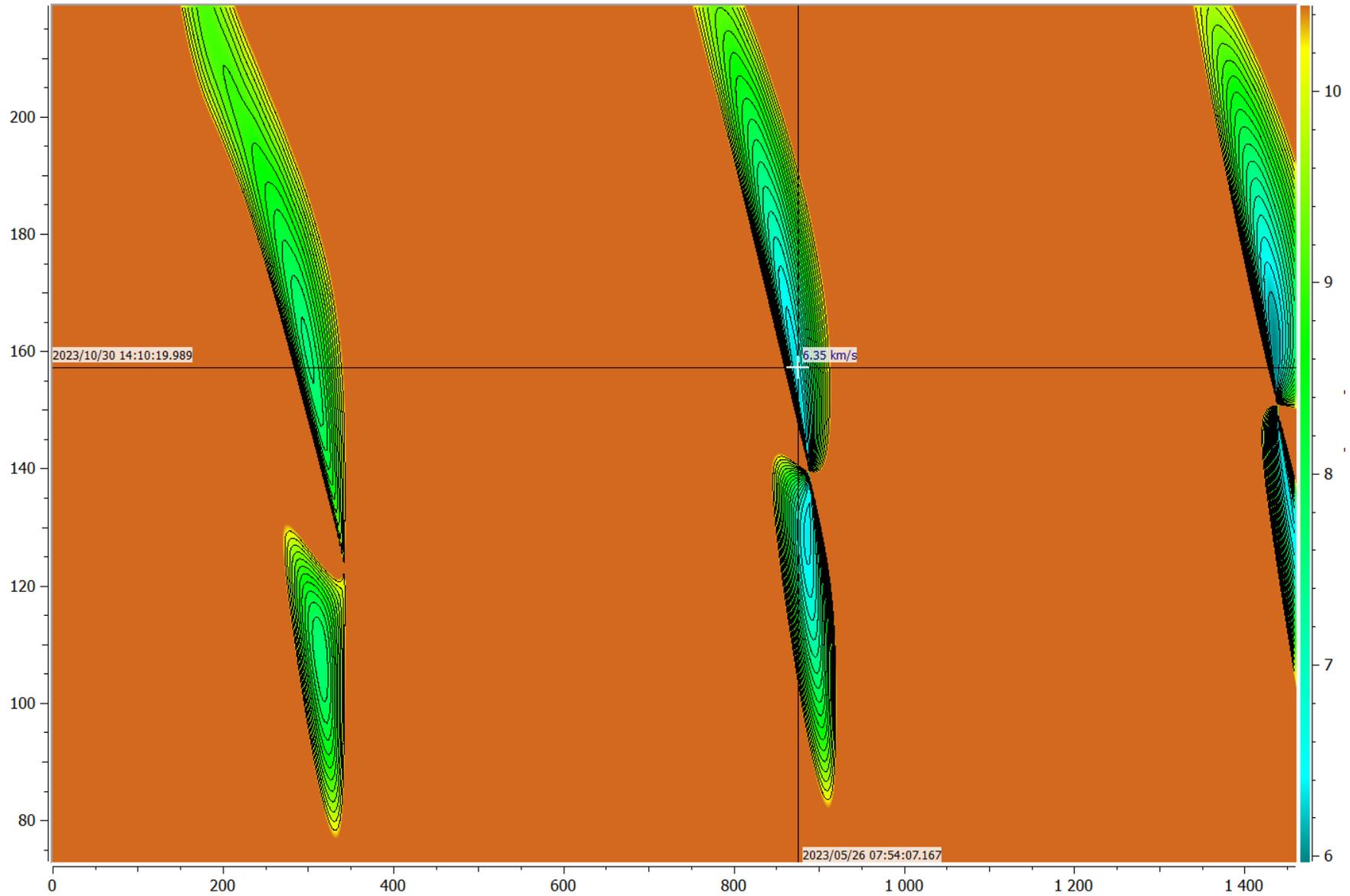


Рис. 6 — Перелёт Земля—Венера. Полуцикл 2021-2024 гг. Суммарная характеристическая скорость

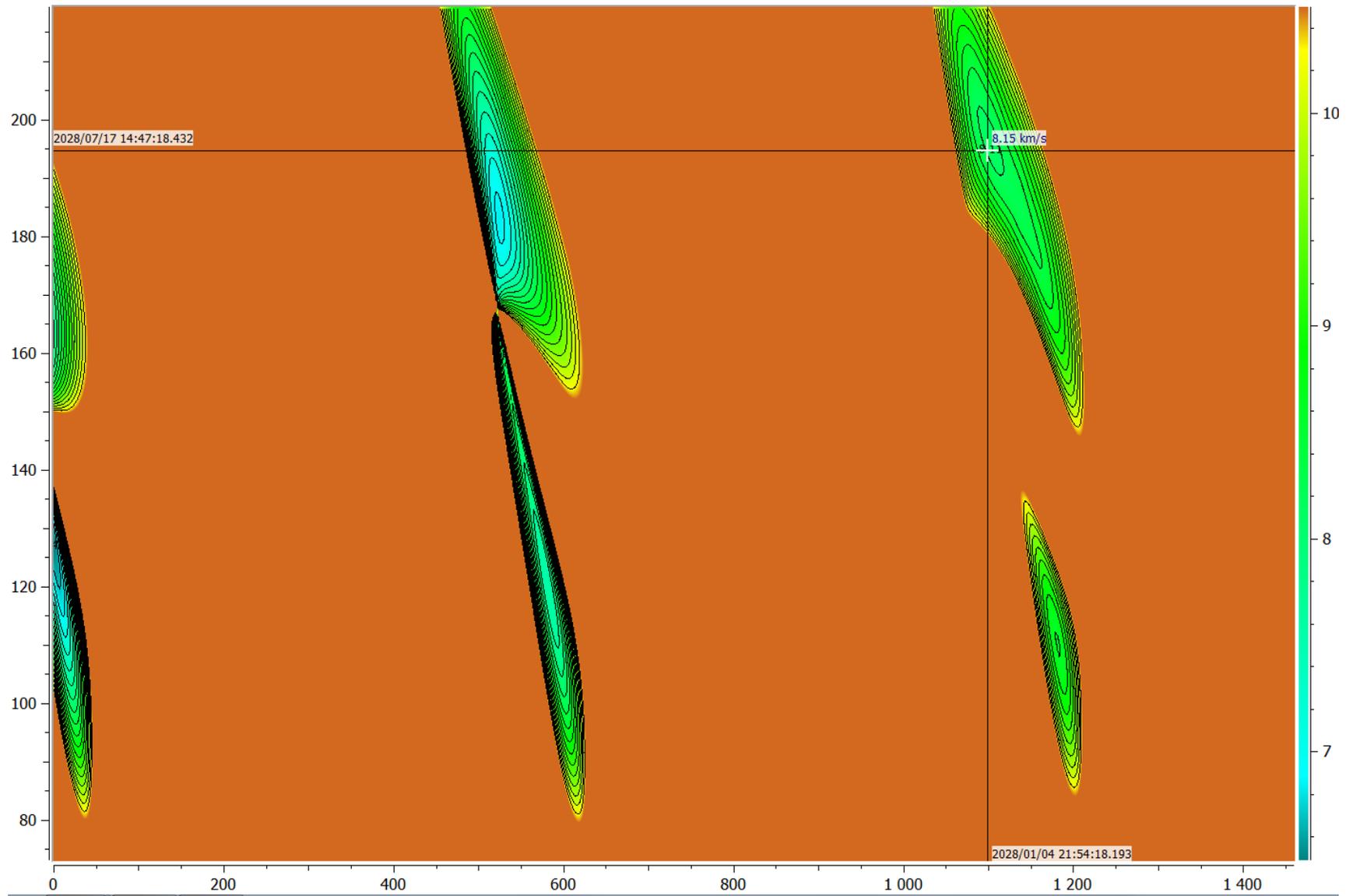


Рис. 7 — Перелёт Земля—Венера. Полуцикл 2025-2028 гг. Суммарная характеристическая скорость

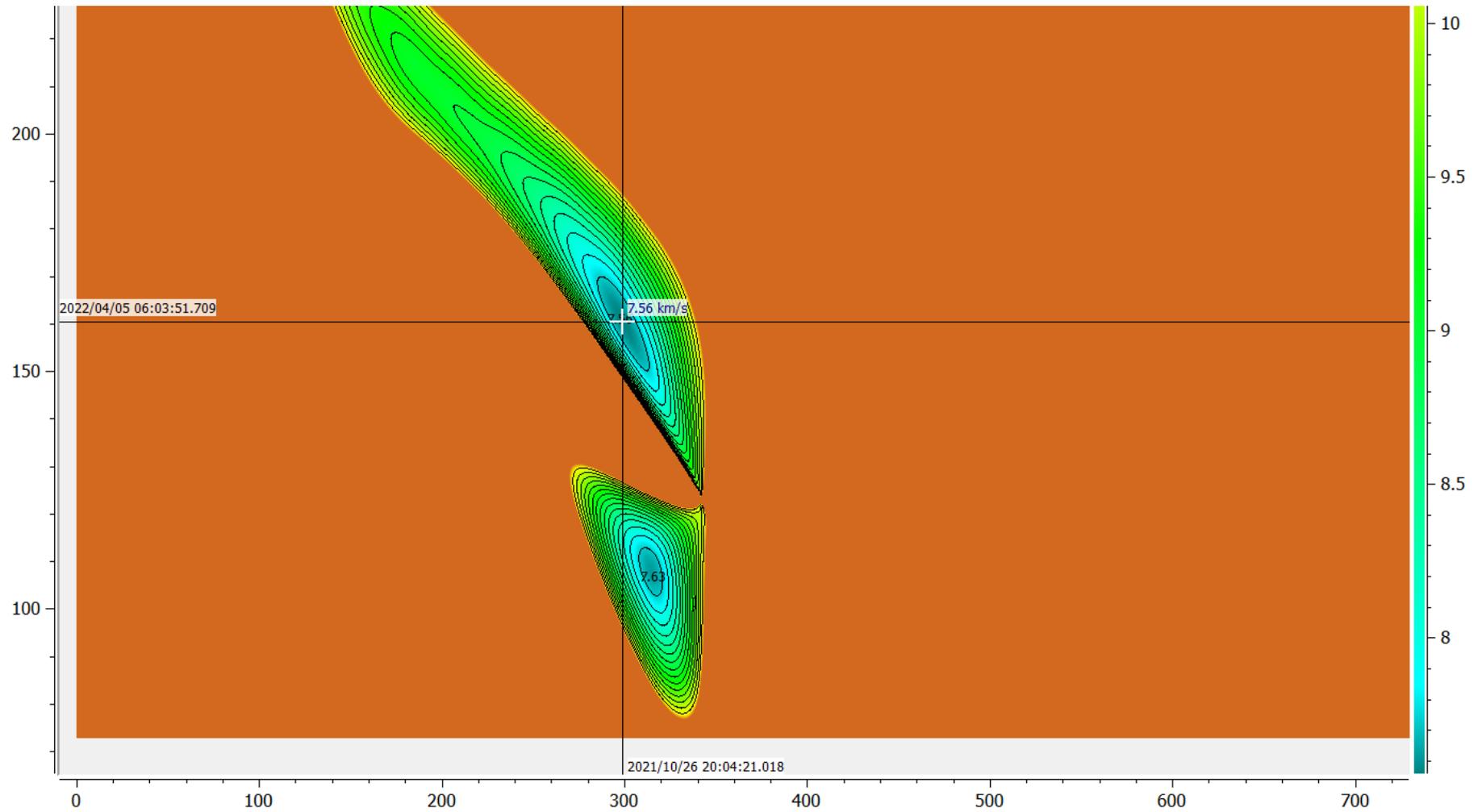


Рис. 8 — Перелёт Земля—Венера. 2021-2022 гг. Суммарная асимптотическая скорость

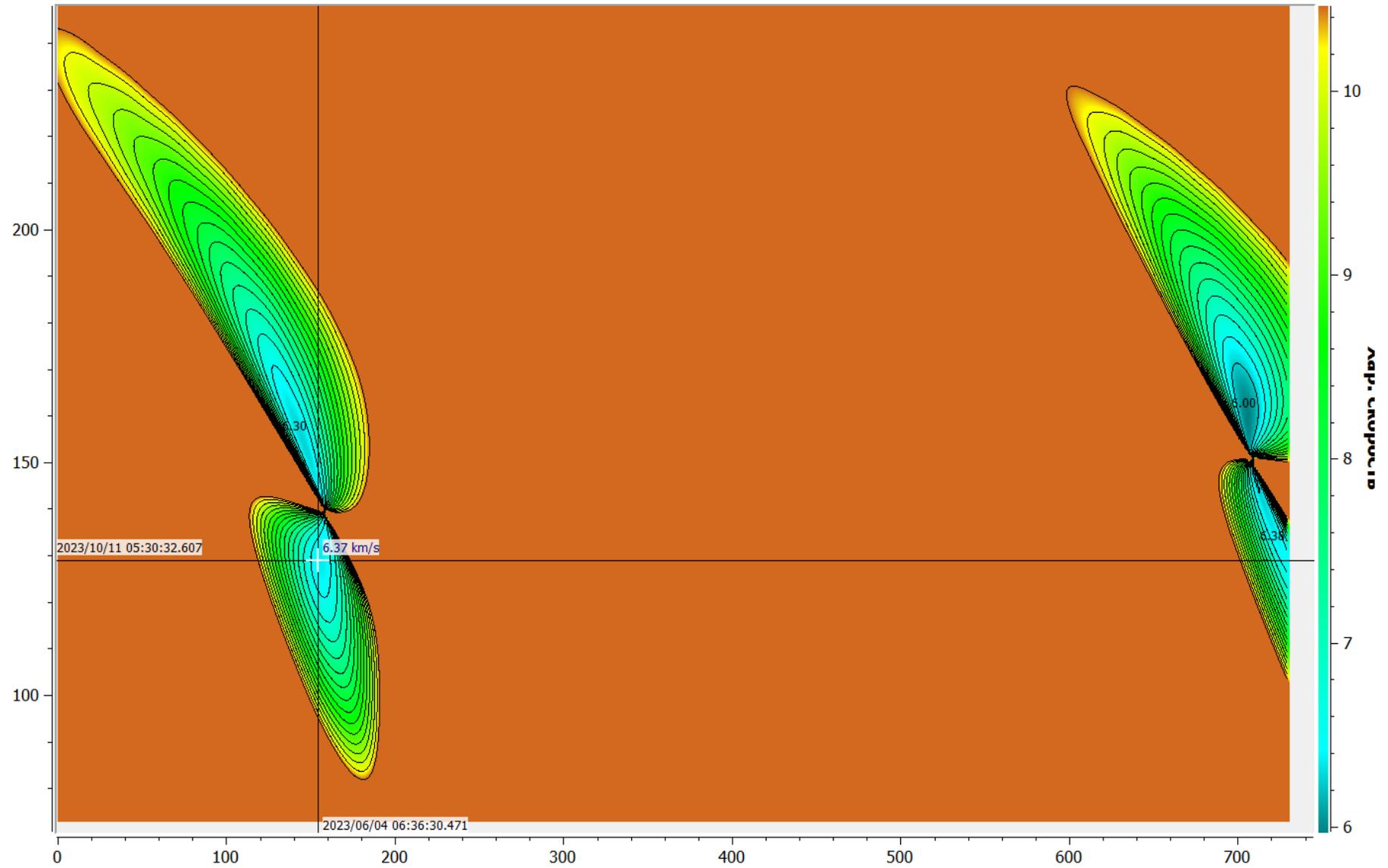


Рис. 9 — Перелёт Земля—Венера. 2023-2024 гг. Суммарная асимптотическая скорость

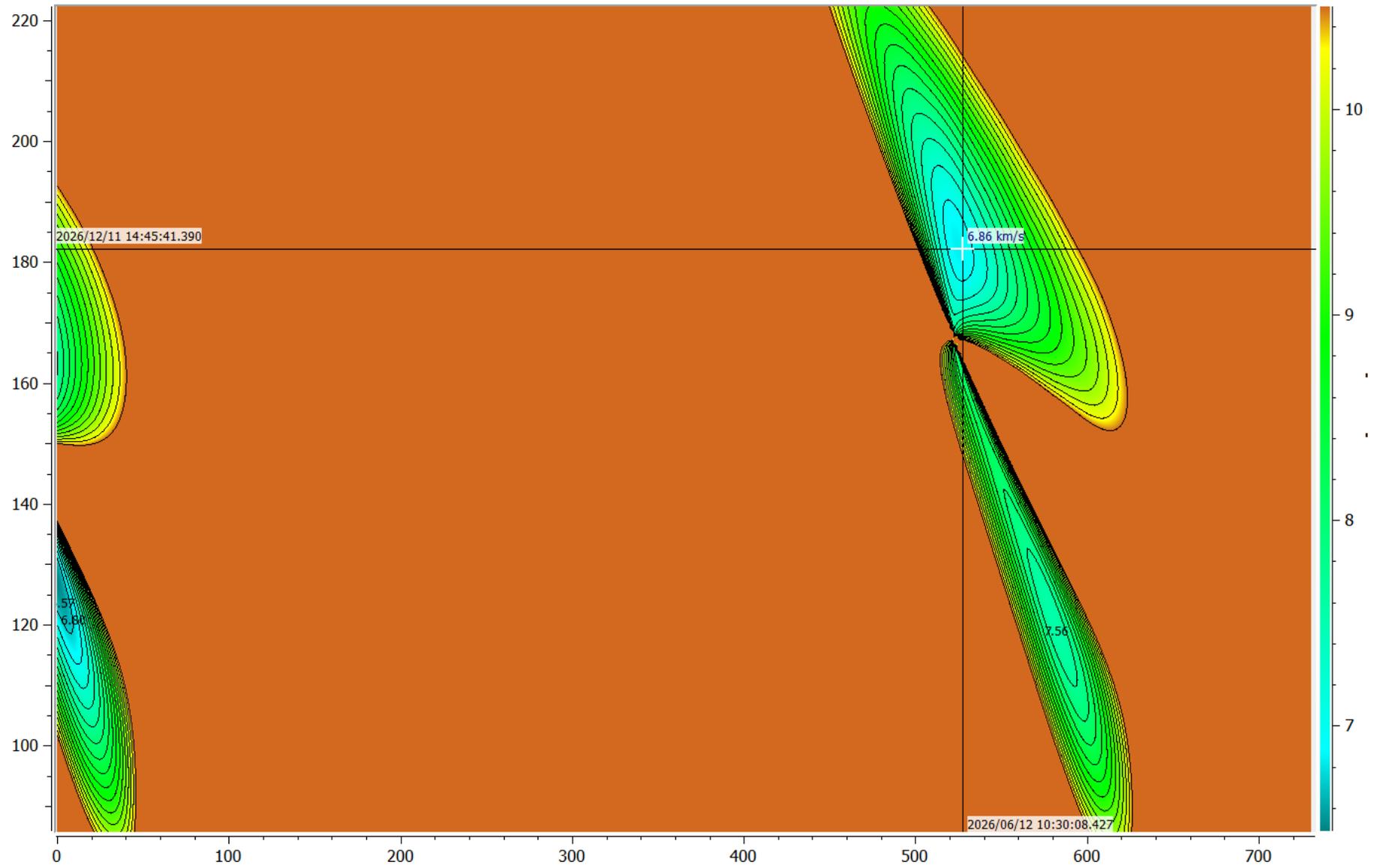


Рис. 10 — Перелёт Земля—Венера. 2025-2026 гг. Суммарная характеристическая скорость

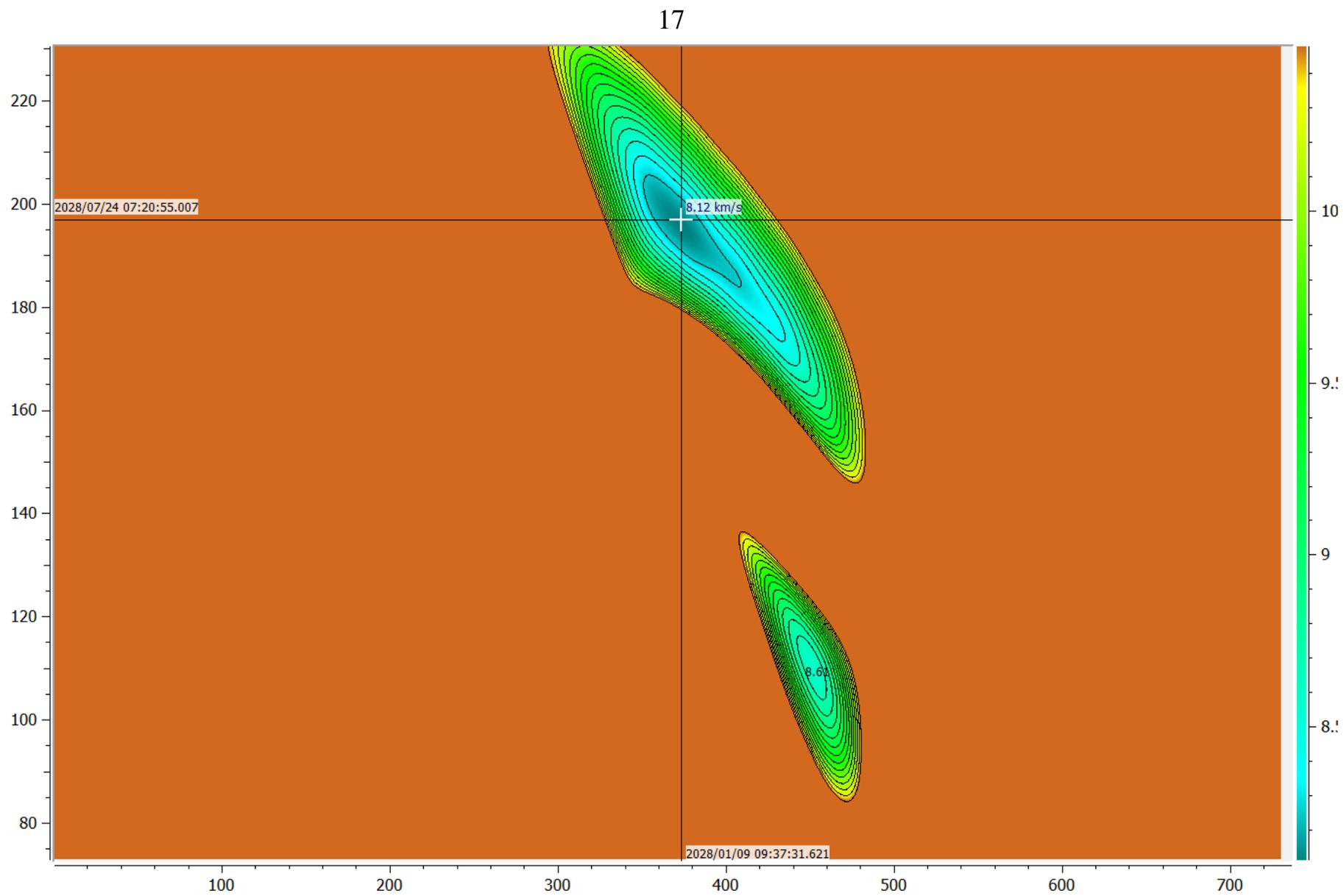


Рис. 11 — Перелёт Земля—Венера. 2027-2028 гг. Суммарная характеристическая скорость

4. Оптимальные даты старта к Венере для посадочных проектов эпохи 2021-2028 гг. в расширенном формате времени

На рис. 12-17 приведены контурные графики изолиний (линий постоянной величины) суммарной характеристической скорости (*porkchop plots*) для окон старта в расширенном формате времени. По оси абсцисс отложены даты старта, по оси ординат – длительность перелёта в сутках. Цифрами обозначены величины суммарной характеристической скорости в км/с. Для второй половины восьмилетнего цикла (в том числе и для наиболее вероятных по реализации космических проектов в окне старта 2026 года) приведены цветные контурные графики изолиний в дополнительно расширенном формате времени, построенные интерактивно с помощью с помощью пакета прикладных программ ValCalc, созданного в БЦ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

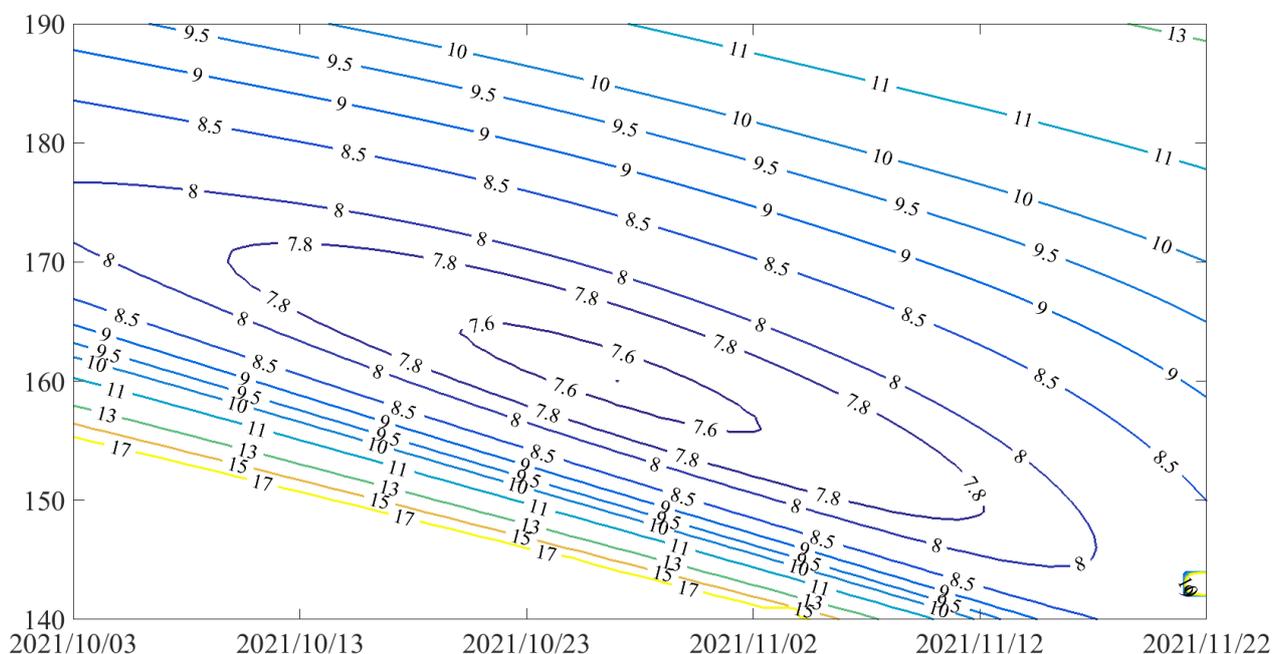


Рис. 12 — Изолинии окна старта 2021 года

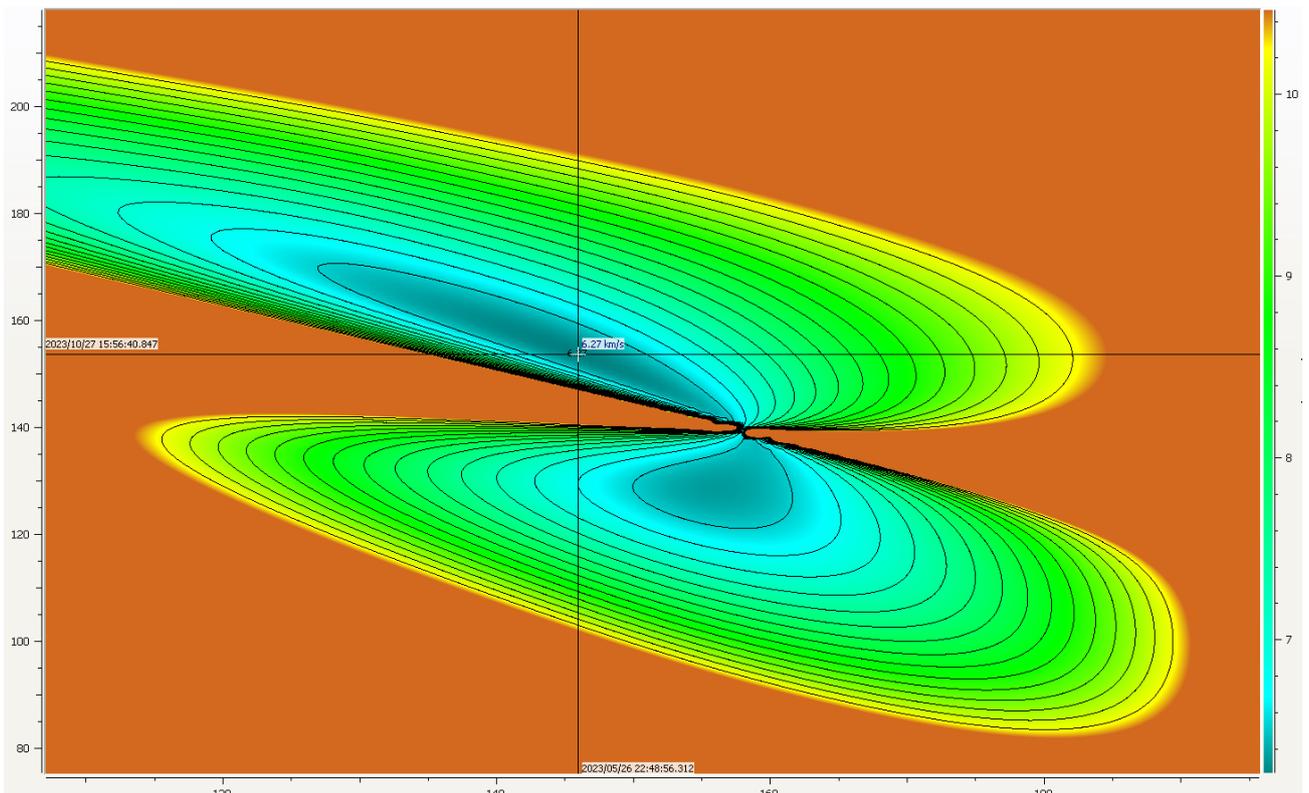
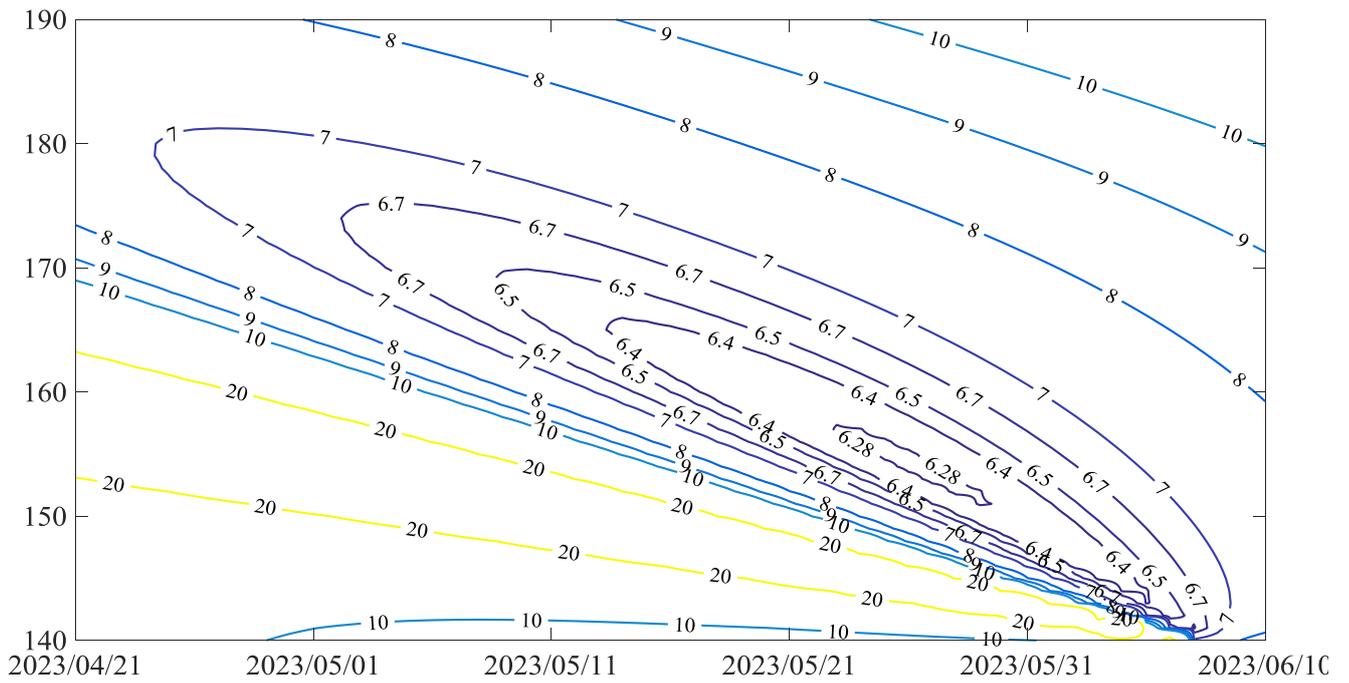


Рис. 13 — Изолинии окна стартов 2023 года

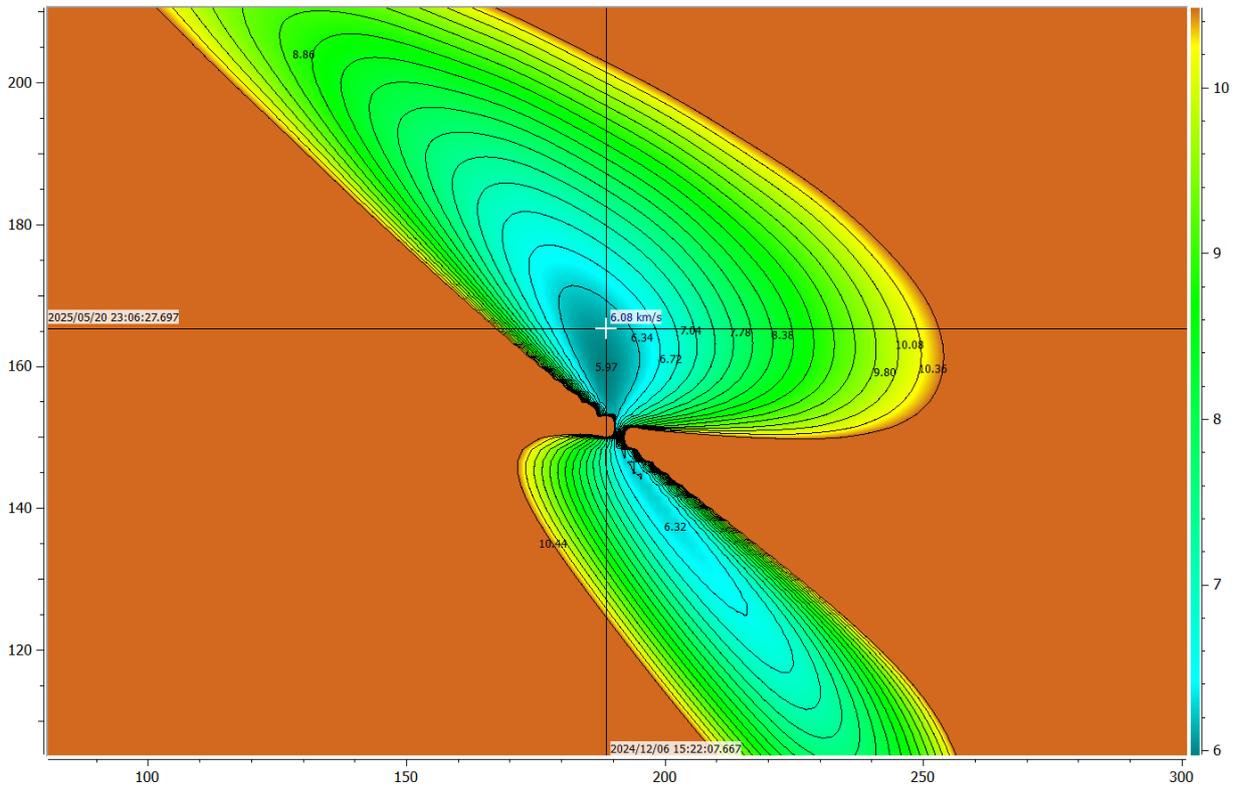
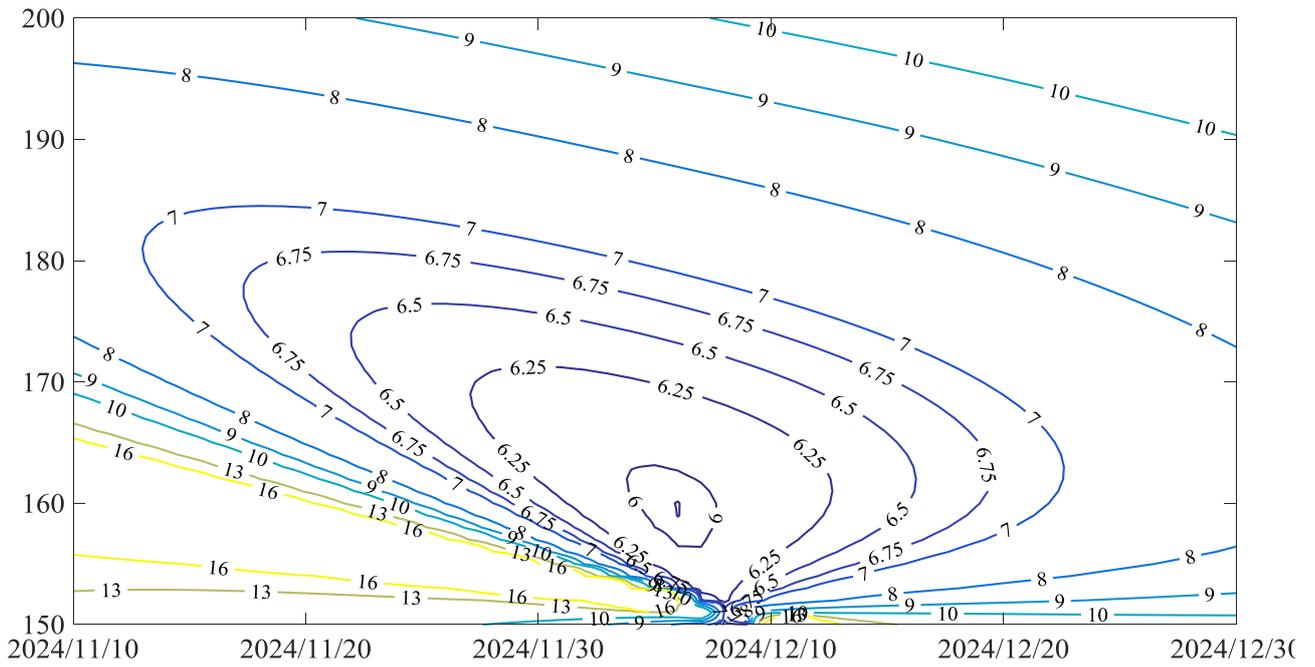


Рис. 14 — Изолинии окна стартов 2024 года

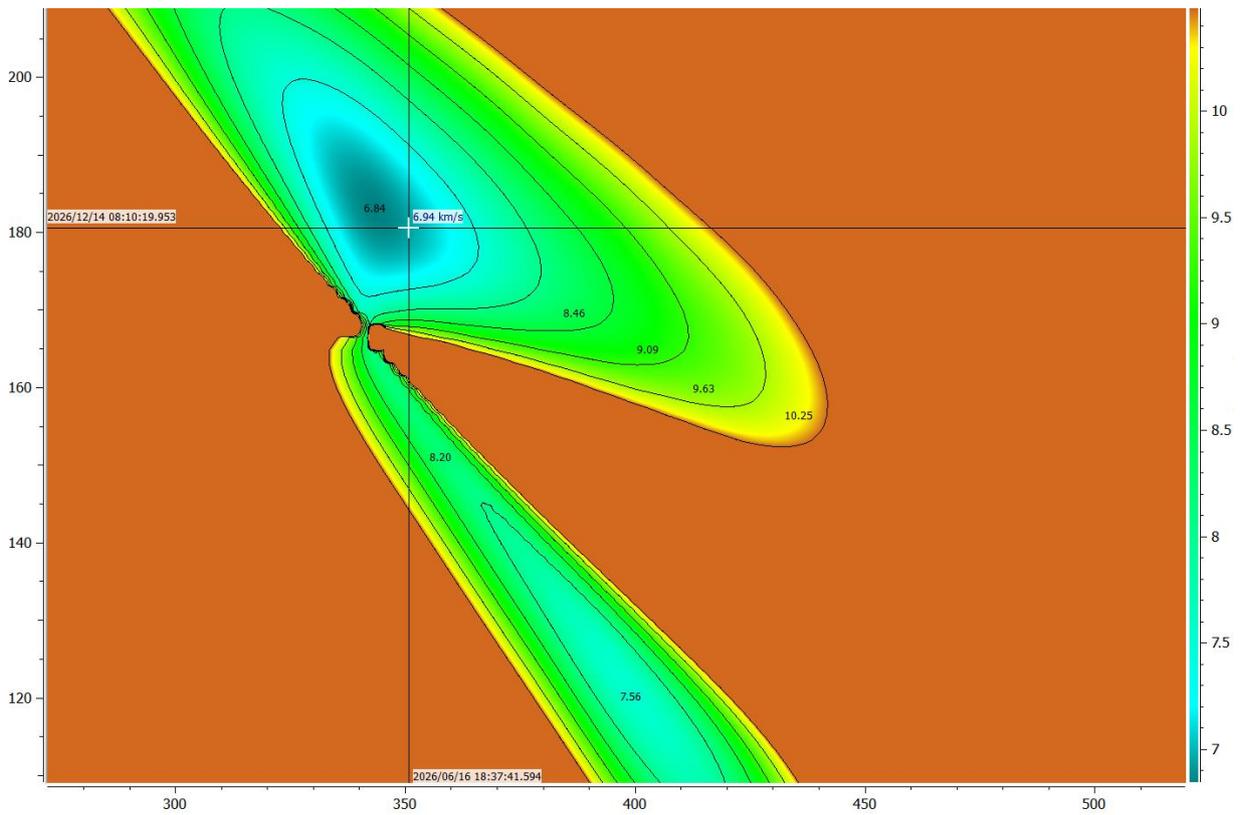
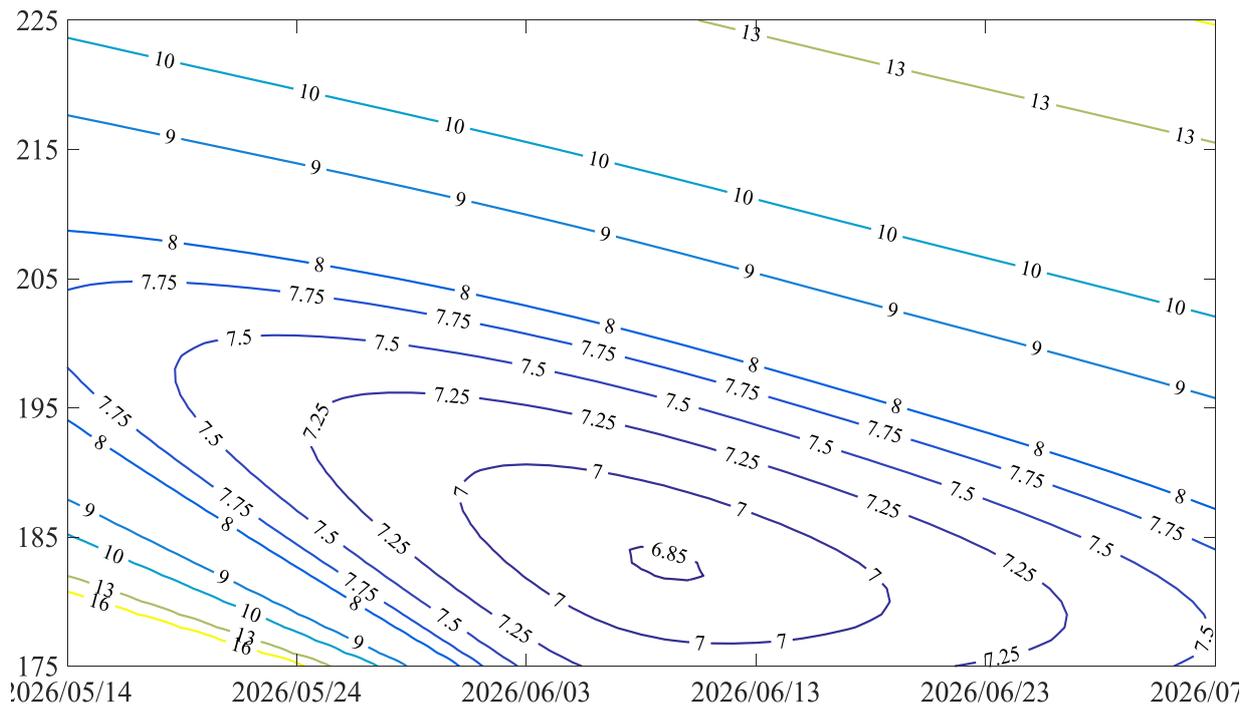


Рис. 15 — Изолинии окна стартов 2026 года

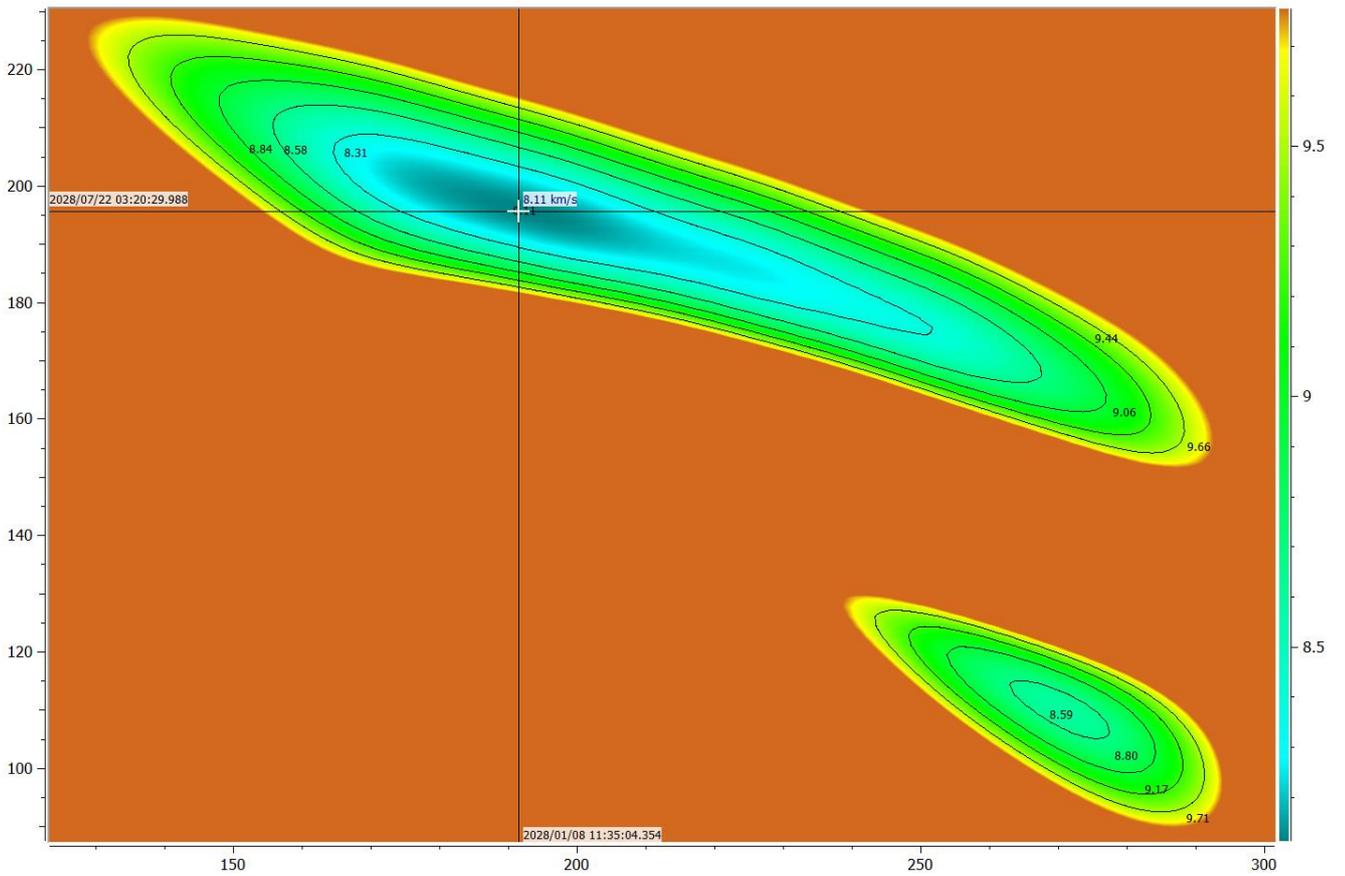
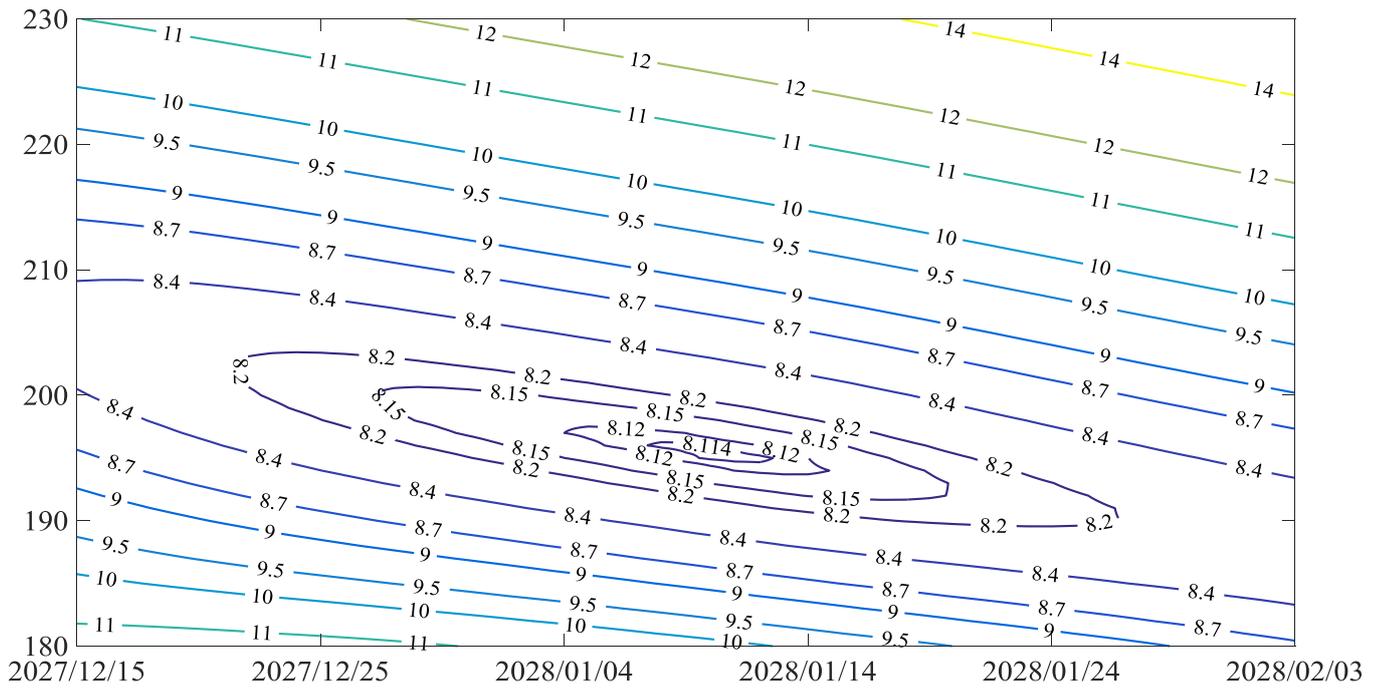


Рис. 16 — Изолинии окна стартов 2028 года

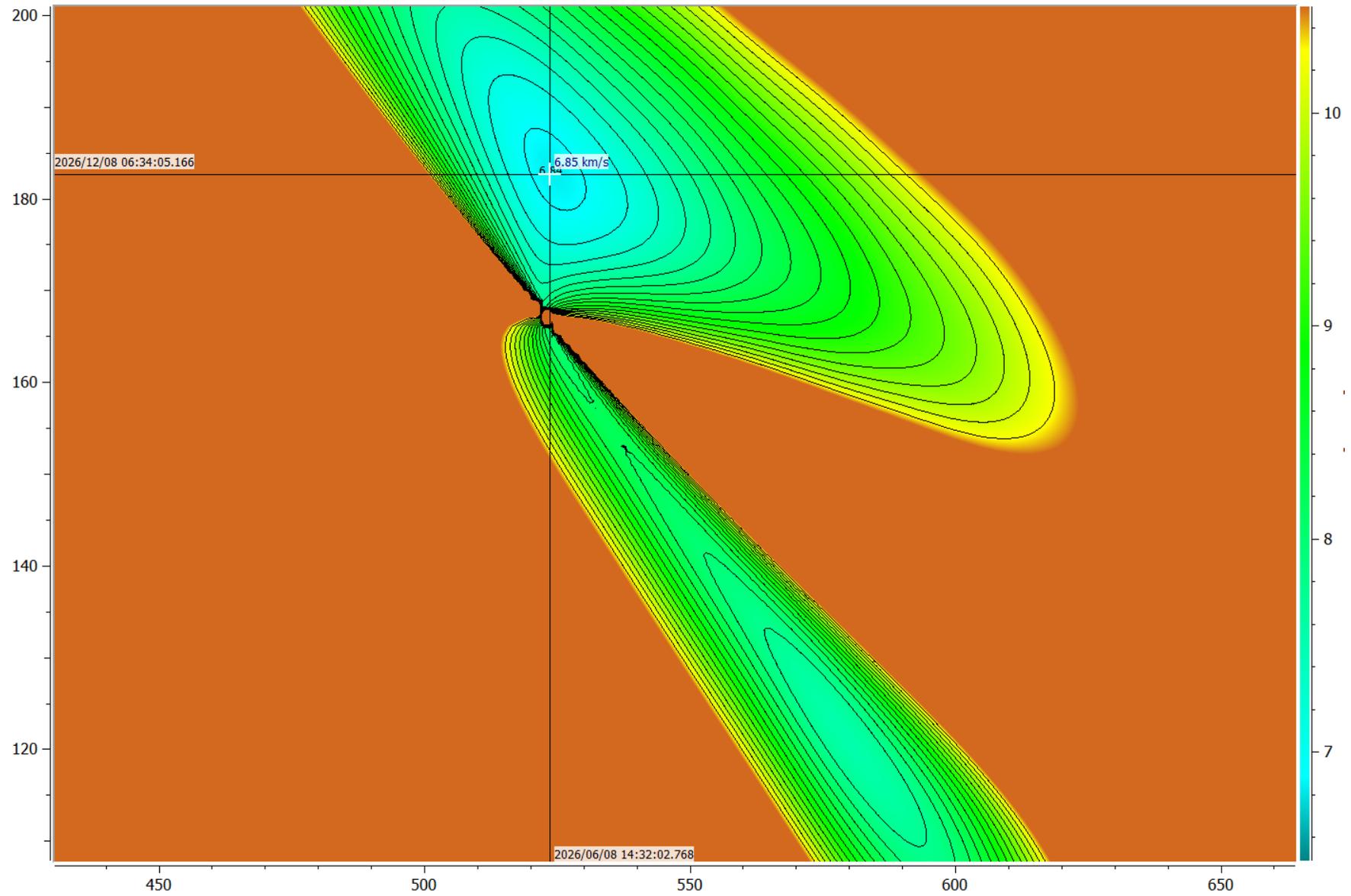


Рис. 17 — Перелёт Земля—Венера. Окно стартов 2026 г. Суммарная характеристическая скорость

5. Окна стартов для гесперианских пролётных траекторий

Окна стартов к Венере планируемых космических миссий, имея структурную привязку к «тотальным» окнам стартов суммарной характеристической скорости, имеют, тем не менее, некоторый дрейф по времени своего начала, длительности и форме. При этом для совершения эффективного гравитационного маневра около Венеры минимизация величины V_∞ вектора гиперболического избытка прилётного вектора скорости КА \mathbf{V}_∞ не требуется. В зависимости от целей миссии (увеличение наклона орбиты, разгон гелиоцентрической скорости и т.д.) требуется определённое значение V_∞ , для чего необходимо построение «окон вылета и прилёта» — карт изолиний определённого уровня отлётной от Земли и прилётной к Венере асимптотической скорости.

Как известно, для максимального угла φ поворота вектора асимптотической скорости КА при гравитационном манёвре около Венеры справедливо соотношение [Labunsky 1998, Голубев 2015]:

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\mu_{Ven}}{\mu_{Ven} + (R_{Ven} + h_\pi) \cdot V_\infty^2},$$

где μ_{Ven} , R_{Ven} — гравитационный параметр Венеры и её средний радиус, $h_\pi > 0$ — минимальная высота пролёта КА над её поверхностью, так что расстояние перицентра пролётной гиперболы $R_\pi = R_{Ven} + h_\pi$. В результате гравитационного маневра изменение гелиоцентрической скорости КА ΔV :

$$\Delta V = 2V_\infty \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{2V_\infty \mu_{Ven}}{\mu_{Ven} + (R_{Ven} + h_\pi) \cdot V_\infty^2}.$$

Максимальная добавка к гелиоцентрической скорости КА по модулю не может превышать V_{FVen} — первую космическую скорость Венеры:

$$\Delta V_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_{Ven}}{R_{Ven}}} = 7.326 \text{ км/с}, \text{ и достигается при } V_\infty = V_{FVen}.$$

Приблизительные оценки изменения наклона орбиты КА после совершения гравитационного манёвра около Венеры в зависимости от V_∞ можно находить согласно критерию Лабунского [Labunsky 1998], уточнённого в [Голубев 2015, 2016а, 2016б, 2017а, 2017б]. Уточнённый график изменения наклонов приведён на рис. 18.

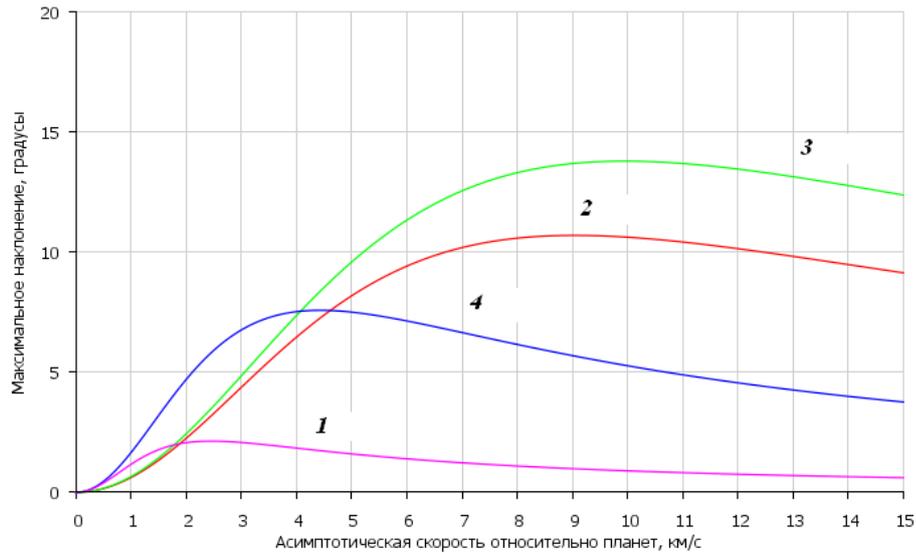


Рис. 18 — Максимальные изменения наклонов при совершении гравитационного манёвра GAM с планетами земной группы, рассчитанные по критерию Лабунского: 1 – Меркурий, 2 – Венера, 3 – Земля, 4 – Марс

В таблице 3 приведены максимально возможные вариации углов поворота орбиты КА при однократном пролёте Венеры для миссий, различающихся требуемой величиной наклона орбиты.

Таблица 3

Максимально возможные вариации углов поворота орбиты КА при однократном пролёте Венеры для миссий, различающихся требуемой величиной i_{\max} наклона орбиты

φ_{\max} для $i_{\max} = 20^\circ$, град.	φ_{\max} для $i_{\max} = 30^\circ$, град.	φ_{\max} для $i_{\max} = 45^\circ$, град.
31.01	16.75	9.02

Далее приведены «окна вылета и прилёта» для эпохи 2021-2028 гг. (рис. 19-22).

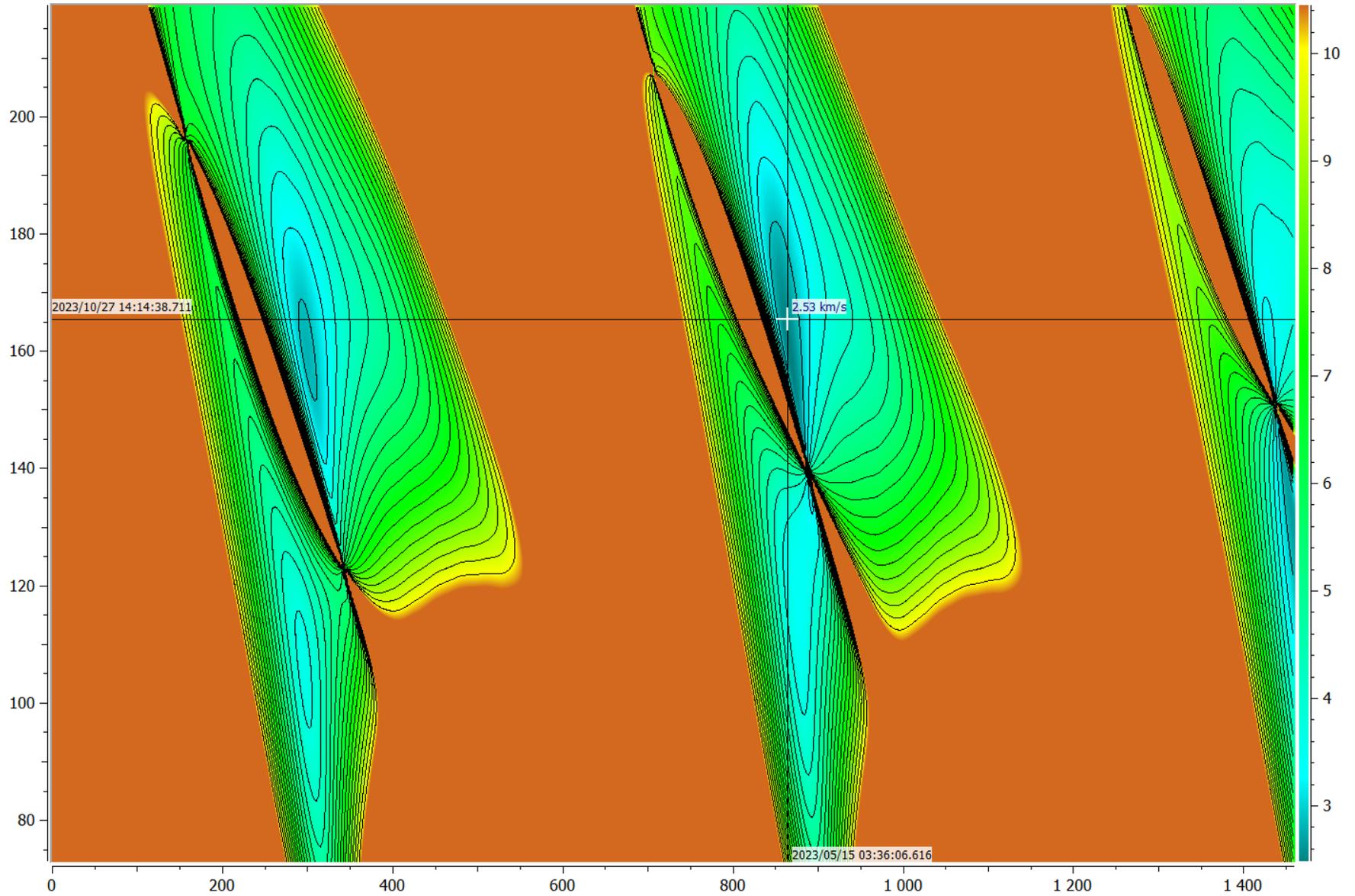


Рис. 19 — Перелёт Земля—Венера. 2021-2024 гг. Отлётная асимптотическая скорость

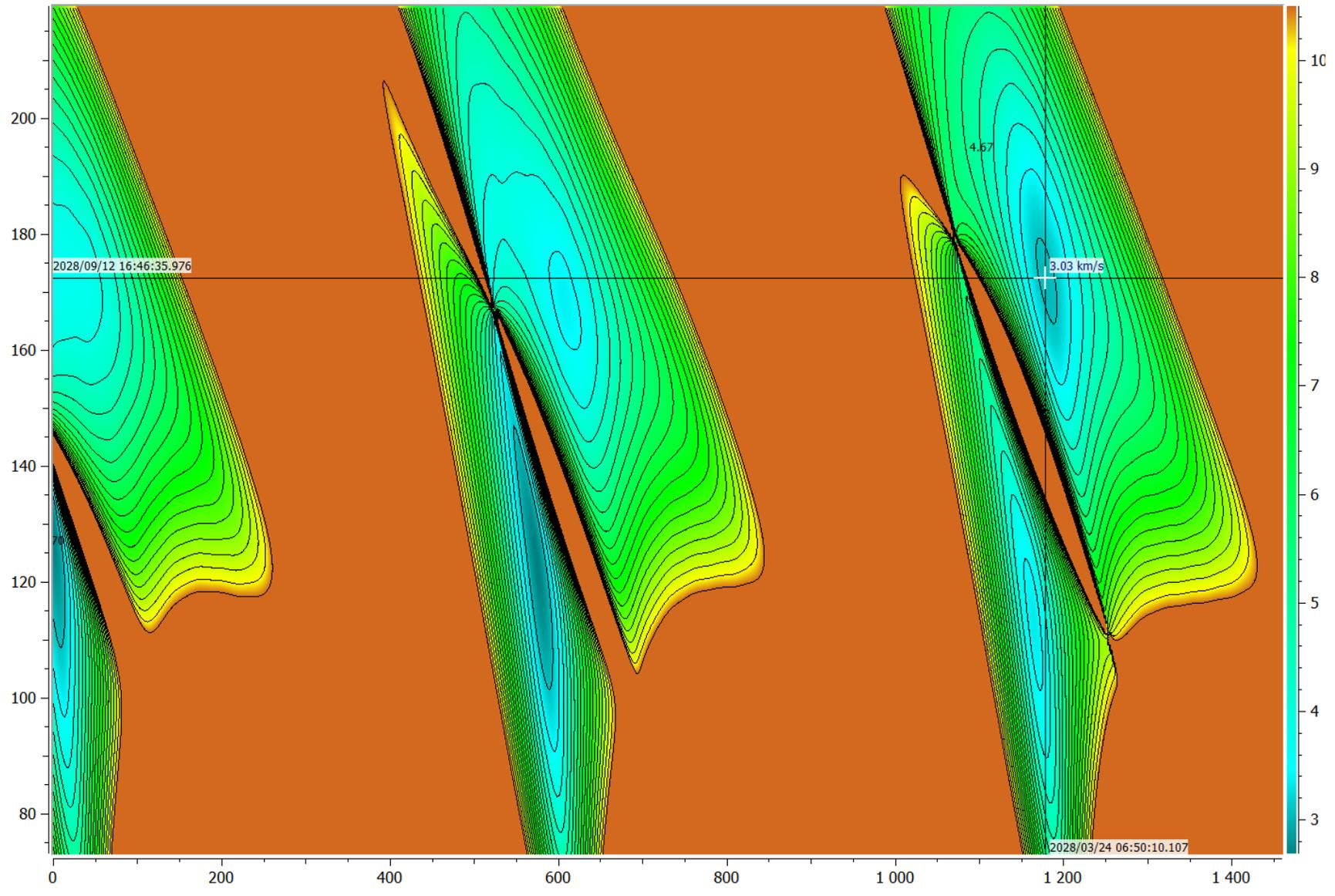


Рис. 20 — Перелёт Земля—Венера. 2025-2028 гг. Отлётная характеристическая скорость

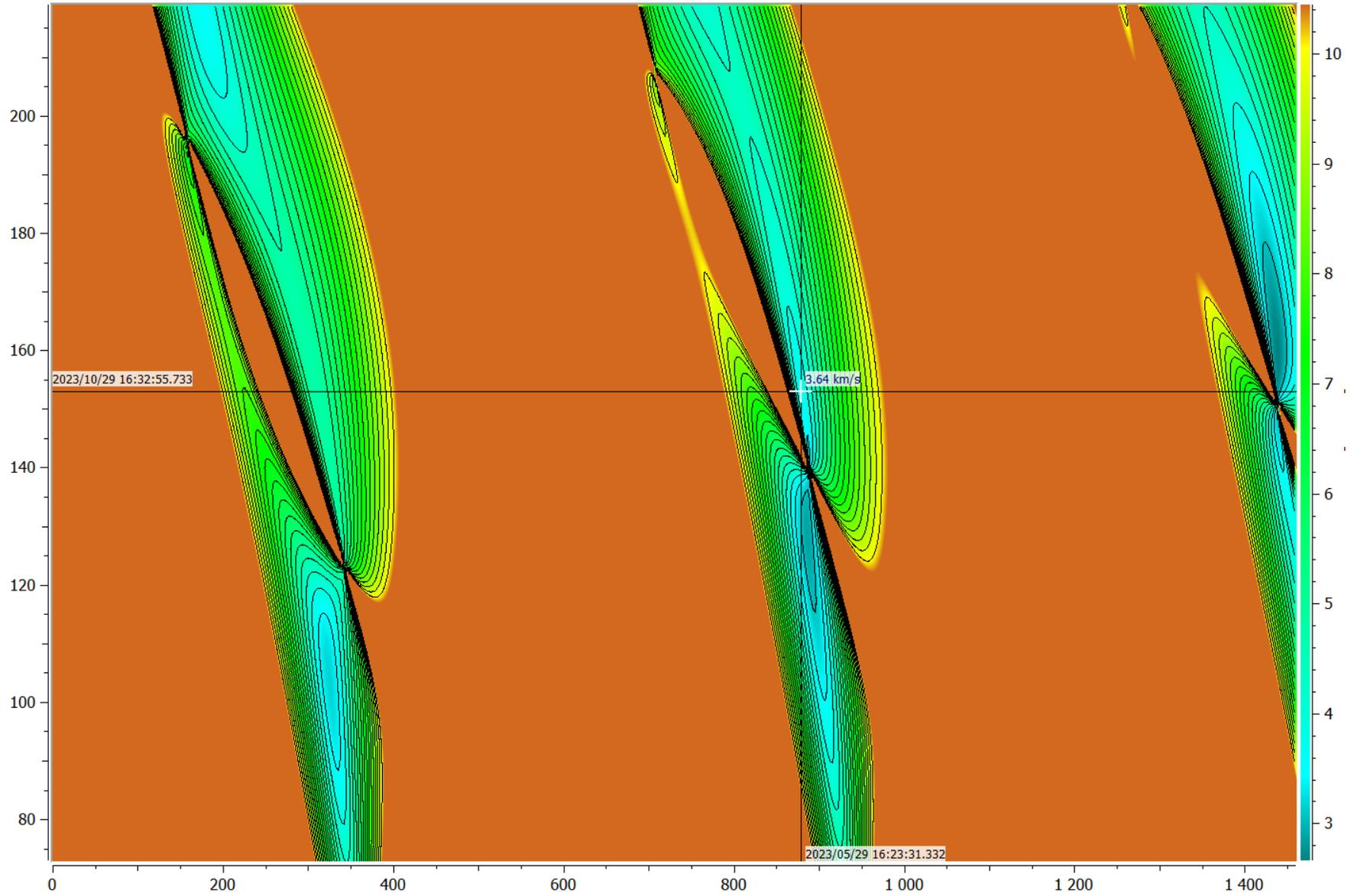


Рис. 21 — Перелёт Земля-Венера. 2021-2024 гг. Прилётная асимптотическая скорость

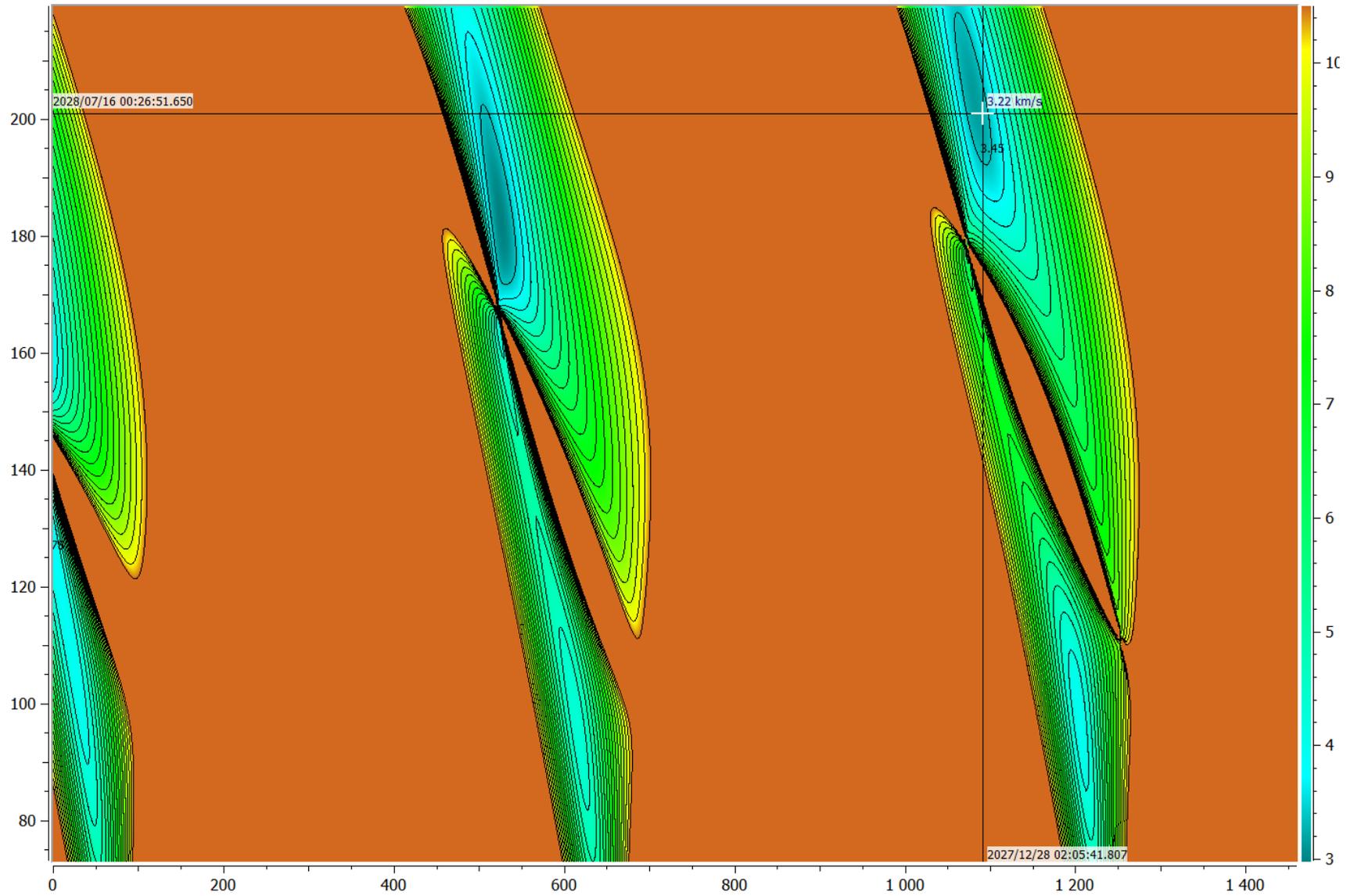


Рис. 22 — Перелёт Земля-Венера. 2025-2028 гг. Прилётная характеристическая скорость

Выводы

С использованием современных методов баллистического проектирования межпланетных перелётов для планирования полётов к Венере (пролётные траектории, миссии доставки и, в частности, с целью посадки КА на её поверхность в заданном районе) в эпоху 2021-2028 гг. построены соответствующие окна старта (суммарные затраты характеристической скорости, отлётная от Земли асимптотическая скорость КА, асимптотическая скорость подлёта КА к Венере).

Для планирования гравитационных манёвров около Венеры с целью изменения орбитальной энергии или увеличения наклона орбиты КА необходимо обеспечение определённой величины подлётной асимптотической скорости. Поэтому востребовано знание изолиний этой величины на картах окон старта.

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.

Окно стартов в 2024 года требует минимальных затрат характеристической скорости, а окно стартов 2028 года – максимальных. Разница между максимальными и минимальными затратами 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

- Голубев 2015* Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Методика формирования больших наклонений орбиты КА с использованием гравитационных манёвров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 64. 32 с. URL: http://keldysh.ru/papers/2015/prep2015_64.pdf
- Голубев 2016а* Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. О вариации наклонения орбит небесных тел при совершении гравитационного манёвра в Солнечной системе // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. №15. 36 с. doi:10.20948/prepr-2016-15 URL: http://keldysh.ru/papers/2016/prep2016_15.pdf
- Голубев 2016б* Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Синтез последовательности гравитационных манёвров КА для достижения орбит с высоким наклонением к эклиптике // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. №43. 32 с. doi:10.20948/prepr-2016-43 URL: http://keldysh.ru/papers/2016/prep2016_43.pdf
- Голубев 2017а* Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Методика формирования больших наклонений орбит космических аппаратов с использованием гравитационных маневров // Доклады АН. 2017. Т.472, №4. С. 403-406. doi:10.7868/S0869565217040090.
- Голубев 2017б* Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Формирование орбит космического аппарата с большим наклонением к эклиптике посредством многократных гравитационных маневров // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. №2. С. 108-132. doi: 10.7868/S0002338817020081.
- 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 / под ред. акад. Л.М. Зеленого – М., 2017. – 24 с.
- ИКИ 2013* Институт космических исследований РАН. Научная и научно-организационная деятельность. Отчёт за 2013 г. (вариант для представления в интернет на сайте ИКИ РАН). http://www.iki.rssi.ru/annual/2013/R32_OKR_NIR-13.pdf
- 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.

- Сихарулидзе 2011* Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 407 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.
- 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. vi p. + 285 p.
- Sánchez Pérez 2012* Sánchez Pérez J.M. Trajectory Design of Solar Orbiter // 23d ISSFD, Pasadena, California, 2012, 17 p. URL: http://www.issfd.org/ISSFD_2012/ISSFD23_IMD1_3.pdf

Оглавление

Введение	3
1. Краткая предыстория гесперианских миссий	4
2. Методика расчёта окон стартов	8
3. Оптимальные даты стартов к Венере для 2021-2028 гг.	9
4. Оптимальные даты старта к Венере для посадочных проектов эпохи 2021-2028 гг. в расширенном формате времени	18
5. Окна стартов для гесперианских пролётных траекторий	24
Выводы	30
Список использованных источников	31