

НА ПУТИ К МЕЖЗВЕЗДНОМУ ПРОСТРАНСТВУ: ПОЛЕТ К ТРАНСНЕПТУНОВЫМ ТЕЛАМ



**ЗУБКО Владислав
Александрович,**

кандидат технических наук

ЭЙСМОНТ Натан Андреевич,

кандидат технических наук

**СУХАНОВ Александр
Александрович,**

кандидат физико-математических наук

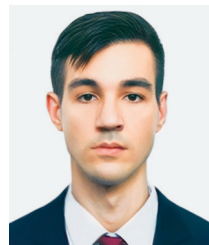
ФЕДЯЕВ Константин Сергеевич,

кандидат физико-математических наук

БЕЛЯЕВ Андрей Алексеевич,

аспирант

Институт космических исследований РАН



DOI: 10.7868/S00044394825010049

Поступила в редакцию: 12.03.2025

Принята к публикации: 12.03.2025

ЧТО ТАКОЕ ОБЛАКО ООРТА?

Теория...

В первой половине прошлого века шведско-датский астроном Элис Стрёмгрен (Strömgren E., 1947), а затем и нидерландский астроном Ян Хендрик Оорт (Oort J.H., 1950) предположили, что появляющиеся вблизи Солнца на протяжении нескольких столетий

новые долгопериодические кометы должны быть где-то рождены. Область Солнечной системы, расположенная на расстоянии от 50 до 150 тыс. а. е., может служить источником материала, формирующего такие объекты. В своей работе Стрёмгрен описал 22 долгопериодические кометы. Оорт же, обобщив эти данные, выдвинул концепцию, стремящуюся объяснить первопричину подобного явления. Согласно его пред-

ставлениям, упомянутая выше область Солнечной системы состоит из объектов, удерживаемых слабым гравитационным воздействием Солнца, и орбиты таких объектов находятся на границе устойчивости. Впоследствии данная область получила название облако Оорта. Периодически, вследствие гравитационного воздействия проходящих рядом с Солнечной системой звезд, устойчивость орбит расположенных в этой области объектов нарушается и они под воздействием притяжения Солнца устремляются внутрь Солнечной системы. Объектами облака Оорта помимо комет, в зависимости от размера, могут быть и астероиды, и планетоиды.

...и наблюдения

Долгое время концепция существования облака Оорта оставалась лишь гипотезой, однако в 1992 году астрономы Дэвид Джуитт и Джейн Лу открыли объект (15760) Альбион с перигелием 35 а. е. и афелием 134 а. е. Открытие Альбиона послужило подтверждением существования пояса Эдварта–Койпера (или пояса Койпера), области пространства на расстоянии примерно между 30 и 60 а. е. от Солнца.

В 1996 году был открыт объект (15874) 1996 TL₆₆ с перигелием более 30 а. е. и большой полуосью более 50 а. е. Открытие показало необходимость создания классификации отдельной области пространства, которая бы содержала в себе такие объекты, перигелии орбит которых удалены на достаточное расстояние (более 30 а. е.), а большая полуось составляет не менее 50 а. е. Объекты, имеющие подобные орбиты, не могут быть захвачены в орбитальный резонанс 1:2 с Нептуном, радиус орбиты которого составляет 30 а. е. и орбитальный период равен примерно половине периода таких объектов но остаются при этом под гравитацион-

ным воздействием планеты-гиганта. Данная группа объектов носит название переходной, поскольку предполагается, что они постепенно за счет орбитальной эволюции переходят из области пояса Эдварта–Койпера во внешние части Солнечной системы.

Следующим значительным этапом исследования дальних уголков Солнечной системы стало открытие астрономами М. Брауном, Ч. Трухильо и Д. Рабиновичем в 2003 году объекта (90377) Седна (M.E. Brown, C. Trujillo, D. Rabinowitz, 2004), находившегося тогда на расстоянии порядка 80 а. е. от Солнца (перигелий Седны, согласно оценкам Лаборатории реактивного движения НАСА, составляет около 70 а. е., а афелий около 1000 а. е.). Затем в 2004–2006 годах последовал целый ряд открытий таких крупных объектов как Хаумеа, Макемаке, Эрида, Квавар, Орк (размером около 1–2 тыс. км), а также других известных на данный момент относительно небольших объектов пояса Койпера и рассеянного диска.

Именно обнаружение такого числа крупных объектов и привело к логическому удалению Плутона из списка планет и вместе с тем к формированию новой группы тел, получивших название «транснептуновые объекты» (ТНО). Небесные тела, отнесенные к этим объектам, в большинстве своем схожи по составу, а их орбиты практически всегда располагаются в поясе Койпера или за его пределами (Spohn T., Breuer D., Johnson T. (ed.), 2014).

Такие объекты, как Седна и 2000 CR105, относятся к рассеянному диску. 2000 CR105 хоть и был открыт немногим раньше Седны, обладает сравнительно небольшим диаметром (примерно 285 км), а также меньшим по сравнению с Седной расстоянием в афелии (393 а. е.).

На данный момент принадлежность Седны облаку Оорта является гипо-

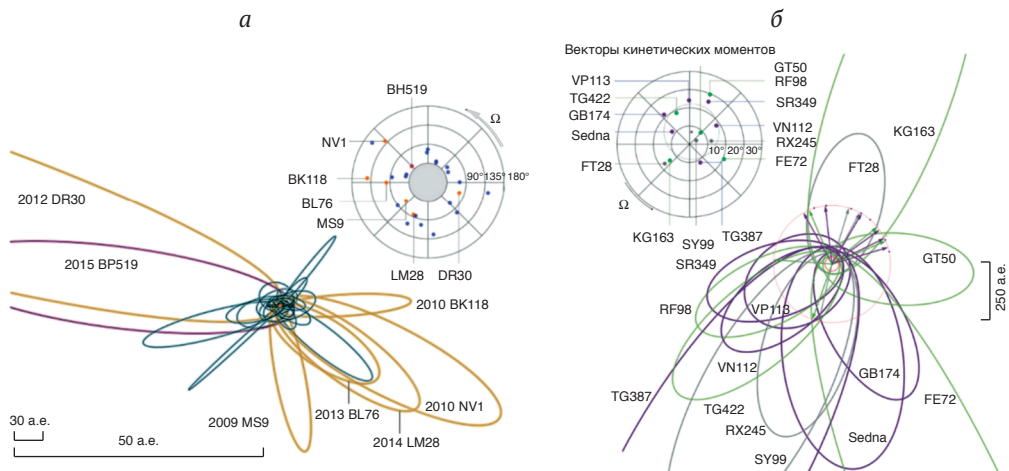


Рис. 1. а) Орбиты ТНО с большим наклонением к эклиптике; б) ТНО с близким значением долготы перигелия. На рисунке (б) четко видна кластеризация перигелиев у ЭТНО, что в свою очередь послужило толчком к развитию гипотезы о наличии не наблюдаемой в настоящий момент девятой планеты Солнечной системы – планеты X.

Источник: Batygin K. et al., 2019

тетической и требует отдельного рассмотрения.

К числу же наиболее вероятных кандидатов на принадлежность к облаку Оорта можно отнести седноид (541132) Лелеакухонуа, открытый в 2015 году, а также открытый в 2017 году астероид 2017 МВ₇, поскольку расстояние этих объектов в афелии превышает 2 тыс. а. е.

Особый интерес среди транснептуновых объектов представляют экстремальные ТНО (ЭТНО). К таковым относятся такие объекты, у которых большая полуось орбиты превышает 250 а. е., а перигелий составляет более 40 а. е. Последнее обуславливает отсутствие в их движении долгопериодических колебаний, вызванных нахождением в резонансе с Нептуном.

Используя базу данных Лаборатории реактивного движения НАСА, можно выбрать те ТНО, которые отвечают указанному критерию. Из более чем 1 млн малых небесных тел, находящихся в упомянутой базе данных, критерию ЭТНО соответствуют всего 18.

Среди ЭТНО стоит выделить группу седноидов, в которую входят лишь четыре объекта. Они представляют особый интерес, поскольку исследования показывают на возможную связь между орбитальными параметрами таких объектов, в частности кластеризацией по аргументу перигелия, и возможным существованием в Солнечной системе некоей до сих пор не обнаруженной девятой планеты, гипотезы о которой неизменно обсуждаются и исследуются среди астрономов (Эйсмонт Н.А., 2024).

Объект Седна

Среди ЭТНО объект Седна выделяется особо. Свое название он получил в честь великого духа (богини) коренных народов Арктики и Гренландии Седны, которая, согласно легендам, повелевает всеми морскими зверями и царствует в мире мертвых, представляющем собой бескрайнюю ледяную пустошь – Аддивун.

Будучи типичным представителем объектов пояса Койпера, Седна отличается от других сильно вытянутой орбитой и значительно большей удаленностью от Солнца в афелии. Поверхностный состав Седны также характерен для большинства объектов пояса Койпера, поскольку, согласно оценкам, ее поверхность представляет собой слой углеводородного осадка, образованного в результате облучения метана. Существование углеводородного осадка может быть причиной ярко-красного цвета поверхности Седны. В некоторых исследованиях приводятся данные, согласно которым под поверхностью Седны возможно наличие океана, подогреваемого внутренним теплом этого объекта.

Происхождение Седны – предмет многих рассуждений. Так, согласно версии первооткрывателей, Седна образовалась в Солнечной системе на стадии зарождения последней, а затем ее орбита претерпела изменения вследствие динамических эффектов, сопровождавших формирование Солнца в плотном звездном скоплении. Согласно другим версиям (Batygin K. et al., 2019; Trujillo C.A., Sheppard S.S., 2014), орбита Седны была изменена около 70 тыс. лет назад проходящей на расстоянии 52 тыс. а. е. от Солнца звездой Шульца, либо Седна могла быть захвачена в Солнечную систему из межзвездного пространства.

В своей работе Батыгин и Браун впервые предположили, что группирование экстремальных ТНО по долготе перицентра, равно как и наличие больших наклонов их орбит (больше 11 град к эклиптике), не может быть случайным. Исследовав динамические характеристики орбит ЭТНО, они предположили, что подобная кластеризация хорошо объясняется наличием в Солнечной системе еще одной,

ранее не обнаруженной девятой планеты (планеты X). В рамках их исследований предполагается, что орбита Седны была существенно изменена гравитационным воздействием именно этой планеты.

Исследование Седны с близкого расстояния смогло бы не только пролить свет на некоторые особенности ее строения и послужить проверкой выдвигаемых гипотез о ее происхождении, но и исследовать возможности существования планеты X. Поэтому в дальнейшем, говоря о построении полетных траекторий в далекие транснептуновые области, мы будем ориентироваться именно на Седну.

Полеты за пределы Нептуна

Исследование траекторий перелета к транснептуновым объектам проводилось с момента их открытия. Первые работы, посвященные полету в область за пределами Нептуна, появились еще в 1950-х годах. В частности, в знаменитой работе Г. Флэндро (Flandro G., 1966) были рассмотрены траектории облета всех планет-гигантов, а также использование гравитационных маневров для перелета к Плутону.

В рамках программы НАСА «Новые рубежи» был осуществлен полет космического аппарата «Новые горизонты» для изучения Плутона и его спутников. Результаты, полученные этим космическим аппаратом, смогли расширить понимание физического состава поверхности бывшей планеты. Благодаря данным, полученным с пролетной траектории, было установлено наличие у Плутона слабой атмосферы, также удалось получить ценные фотографии его поверхности.

В 2019 году аппарат «Новые горизонты» осуществил сближение с транснептуновым телом (486958) Аррокот.

КАК ДОБРАТЬСЯ К ТРАНСНЕПТУНОВЫМ ОБЪЕКТАМ?

Прямой полет с Земли

По какой же траектории должен двигаться космический аппарат, чтобы он смог преодолеть такие огромные расстояния и сблизиться с каким-либо транснептуновым объектом? Прежде чем переходить к описанию сложных способов достижения ТНО, рассмотрим простейший вариант, предполагающий отправку космического аппарата с обычным ракетным двигателем с низкой околоземной орбиты напрямую к исследуемому объекту. Такой способ называют «прямой перелет».

Прямой перелет к любому из транснептуновых небесных тел занял бы многие годы и потребовал бы расходов значительной массы топлива (т. е. большой так называемой характеристической скорости ΔV). Так, для прямого перелета от Земли к Седне нужно сообщить космическому аппарату импульс не менее 8.5 км/с у Земли и потратить на перелет примерно 120 лет.

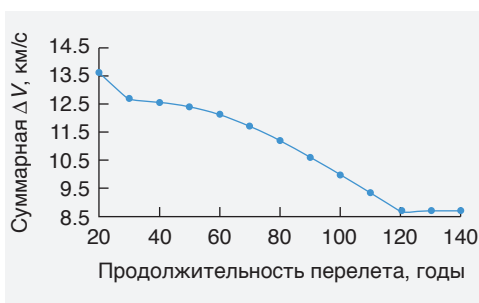


Рис. 2. Зависимость величины суммарной характеристической скорости ΔV от времени перелета к Седне (при прямом перелете с Земли). Источник: Зубко В.А., Суханов А.А., Федяев К.С. и др., 2021

Разумеется, подобные характеристики перелета полностью отвергают любые возможные дискуссии о его реалистичности. А затраты на более быстрый перелет, к сожалению, значительно превосходят возможности современной ракетно-космической техники.

Таким образом, простейшие способы перелета к столь удаленным объектам оказываются непригодными и приходится использовать более сложные сценарии.

Полет, использующий разгон у Солнца

Известная концепция миссии *Interstellar Probe* (ISP), разрабатываемая лабораторией прикладной физики (APL) Университета Джонса Хопкинса с 1990-х годов, предполагает разгон космического аппарата у Солнца за счет эффекта Оберта, т. е. за счет существенного увеличения орбитальной энергии аппарата при сообщении ему дополнительного импульса на минимальном расстоянии от Солнца (в перигелии гелиоцентрической орбиты). В рамках такого подхода требуется сближение космического аппарата с Солнцем на расстояние менее 6 млн км. Другими словами, для сравнения, космический аппарат должен подлететь к Солнцу ближе, чем солнечный зонд «Паркер», запущенный НАСА в 2010 году и работающий в настоящее время. Однако для обеспечения столь тесного сближения с Солнцем «Паркеру» потребовалось совершить 7 маневров у Венеры. А согласно концепции ISP, для перелета к Солнцу потребуются совершить единственный гравитационный маневр у Юпитера, который сообщит аппарату достаточный импульс, после которого КА сближится с Солнцем на расстояние 2–4 солнечных радиусов. Далее ему придается импульс величиной 15.1 км/с, достаточный для отправки в направлении звезды Эпсилон Эридана со скоростью 20 а. е./г (McNutt Jr, R. L. et al., 2000). В этом же

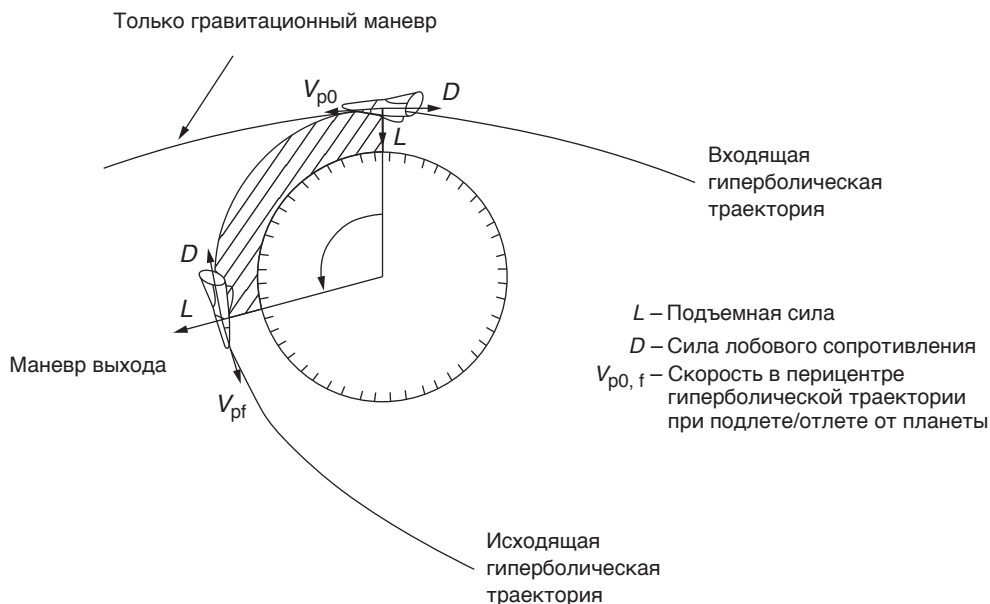


Рис. 3. Концепция аэрогравитационного маневра. Источник: Anderson Jr J.D. et al., 1991

исследовании авторы предложили способ сообщения КА такой величины импульса - использование принципа ядерного теплового двигателя. В рамках данной концепции предполагается, что жидкий водород, хранящийся в баках КА, нагревается Солнцем до температур свыше 3000 К, а затем расширяется в ракетном сопле, создавая тягу. Теоретически удельный импульс такой установки может достигать около 900 с.

Анализируются и возможности использования солнечного паруса для отправки космического аппарата в межзвездное пространство (Левантовский В.И., 1980). Так, для перелета аппарата массой 90 кг при сближении с Солнцем на расстояние до 20 солнечных радиусов будет необходимо развернуть в космосе солнечный парус площадью 1650 м². Разумеется, сегодня доставить к Солнцу и развернуть в космосе подобный парус аппарат массой всего 90 кг никак не способен.

Оба описанных способа разогнать космический аппарат до необходимой скорости сегодня нереализуемы. С дру-

гой стороны, их обсуждение в научной среде открывает перспективы по созданию новых и усовершенствованию имеющихся технических средств, чтобы в не столь отдаленном будущем у человечества все же появилась возможность реализации столь амбициозных проектов.

Аэрогравитационные маневры

Интересным для практической реализации способом достичь окраин Солнечной системы является концепция получения ускорения космического аппарата и с помощью гравитационных маневров, и с помощью атмосферы планеты. Это способ получил в литературе название «аэрогравитационные маневры» (АГМ). Под АГМ понимается изменение гелиоцентрической скорости космического аппарата не только в результате поворота асимптотической скорости при гравитационном маневре, но и получение дополнительной прибавки к углу поворота за счет полета аппарата в атмосфере небесного тела. Эффект последнего достигается из-за

отрицательной подъемной силы, которая локально усиливает гравитационное притяжение, в результате аппарат получает дополнительную возможность по повороту своей траектории.

Выгоды от применения АГМ истекают из-за увеличения гелиоцентрической скорости космического аппарата при некотором уменьшении и сильном повороте (до 180°) вектора планетоцентрической асимптотической скорости в результате пролета атмосферы планеты. Во время пролета происходит уравнивание центробежной силы собственным весом аппарата и отрицательной подъемной силой, которая меняется вместе с силой сопротивления аппарата по мере падения его скорости в атмосфере. Для компенсации торможения в атмосфере скорость подлета к планете должна быть больше скорости отлета. Практическое применение АГМ становится возможным, когда отношение подъемной силы, действующей на аппарат, к силе лобового сопротивления (аэродинамическое качество) становится больше 2.4. Однако подобное пороговое значение аэродинамического качества в целом, так же как и в случаях, описанных ранее, нивелирует все преимущества данного подхода, поскольку технических средств, способных осуществить такой маневр, в настоящее время попросту не существует.

Использование термоядерного синтеза

Еще одним интересным способом является применение системы *Direct Fusion Drive* (DFD), обеспечивающей тягу и электрическую энергию для работы двигательной установки за счет реакции термоядерного синтеза $D-^3He$ (Aime P., Gajeri M., R.Y. Kezerashvili R.Y., 2021).

Разработчиками этой системы было продемонстрировано, что с ее помощью возможна доставка полутонного космического аппарата к классическим объектам пояса Эдварта–Койпера за 10 лет полетного времени, что приво-

дит к значительному интересу к подобной системе. Однако данная концепция находится в стадии разработки и для ее реализации потребуется время.

Среди всех перечисленных выше концепций перелета к транснептуновым телам в настоящее время для практической реализации пригодно лишь использование гравитационных маневров, которые уже давно зарекомендовали себя как эффективный практический инструмент и часто применяются в действующих космических миссиях.

Добраться до Седны

Построение траекторий перелета с помощью гравитационных маневров «Земля–Юпитер–Седна»

Поскольку Седна является одним из самых известных представителей ТНО, рассмотрим построение траектории перелета к транснептуновым объектам на ее примере.

Расчет возможных траекторий перелета к Седне с использованием гравитационных маневров проводился разными научными группами. В частности, хороших результатов удалось добиться ученым из Университета Теннесси (Baskaran G., Bonthalapati A.S., Lewis J.D., Malone K.J., Ved H.M., Lyne J.E., 2014; Cecio F. et al., 2022). Они исследовали достижение как Седны, так и некоторых других ТНО (по большей части объектов из пояса Эдварта–Койпера) с помощью гравитационных маневров у планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Полученные результаты показали, что наилучшим для достижения Седны является сценарий перелета «Земля–Юпитер–Седна». Такой полет, согласно оценкам авторов, потребует 7.42 км/с затрат характеристической скорости при длительности перелета всего 24.48 года.

Последующие исследования (Zubko V., 2022) показали, что при снижении требований к величине характеристической скорости и использовании вышеупомянутой схемы полета достичь

Седны возможно и за меньшее время: 18–20 лет, с увеличением затрат потребной характеристической скорости до 7.5–9 км/с.

Полет к Седне с последующим выходом на орбиту ее искусственного спутника потребует как большого стартового импульса, так и тормозного импульса, поскольку масса Седны мала, а скорость космического аппарата относительно объекта высока. Поэтому наилучшим с точки зрения технической реализации способом исследования этого небесного тела становится его изучение с пролетной траектории.

Рассматривается также полет к Седне с использованием двигателя малой тяги и выводением искусственного спутника на орбиту вокруг Седны. С использованием малой тяги выход на орбиту объекта возможен, и при использовании тяжелых и сверхтяжелых ракет-носителей масса спутника Седны составит около 50–100 кг.

В 2022 году итальянские ученые предложили спроектировать космическую миссию по отправке малого космического аппарата к Седне. Проект получил название *TransEptuniAn Sedna ProBe for Outer exploratiON* (TEASPOON, рус. «чайная ложка»), целью проекта должна быть фотосъемка объекта и проведение несложных экспериментов, осуществимых с пролетной траектории. В основе подхода к проектированию траектории лежало использование классической схемы «Земля–Юпитер–Седна» с дополнительным импульсом при пролете Юпитера. Рассматривалась дата старта в 2033 г. оду и суммарная длительность перелета к Седне 26 лет.

Разработанные схемы полета к Седне были достаточно простыми, предполагающими минимальное количество гравитационных маневров. Однако, как мы увидим дальше, можно получить еще лучшие результаты при использовании дополнительных маневров у внутренних планет Солнечной системы с незначительным увеличением полетного времени.

Построение траекторий перелета с помощью дополнительных гравитационных маневров у Земли и Венеры

Характеристическая скорость, требуемая для прямого перелета к Юпитеру в оптимальную дату старта, составляет порядка 6.3 км/с. Эту требуемую скорость можно существенно уменьшить, используя гравитационные поля Венеры и Земли на начальном участке полета. Существуют разные варианты последовательности гравитационных маневров у Венеры и Земли; однако наименьшую величину характеристической скорости, необходимую для полета к Юпитеру, обеспечивает схема перелета «Земля–Венера–Земля–Земля» (Zubko V.A., Sukhanov A.A., Fedyaev K.S., Koryanov V.V., Belyaev A.A., 2021).

Перелет «Земля–Венера–Земля» имеет продолжительность в пределах 1.1–1.5 года и существенно увеличивает гелиоцентрическую скорость космического аппарата, однако ее все же недостаточно для достижения Юпитера без значительного активного маневра (т. е. маневра с использованием дви-

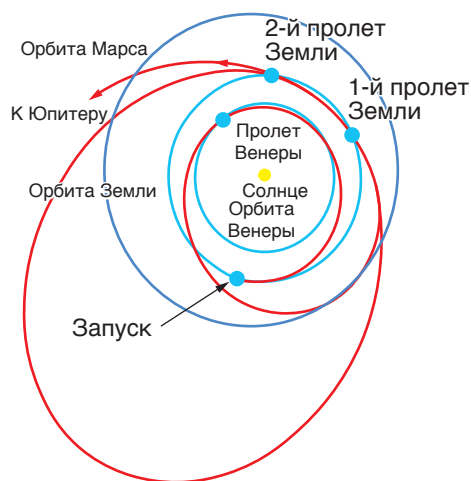


Рис. 4. Иллюстрация перелета «Земля–Венера–Земля–Земля». Источник: Зубко В.А., Суханов А.А., Федяев К.С. и др., 2021

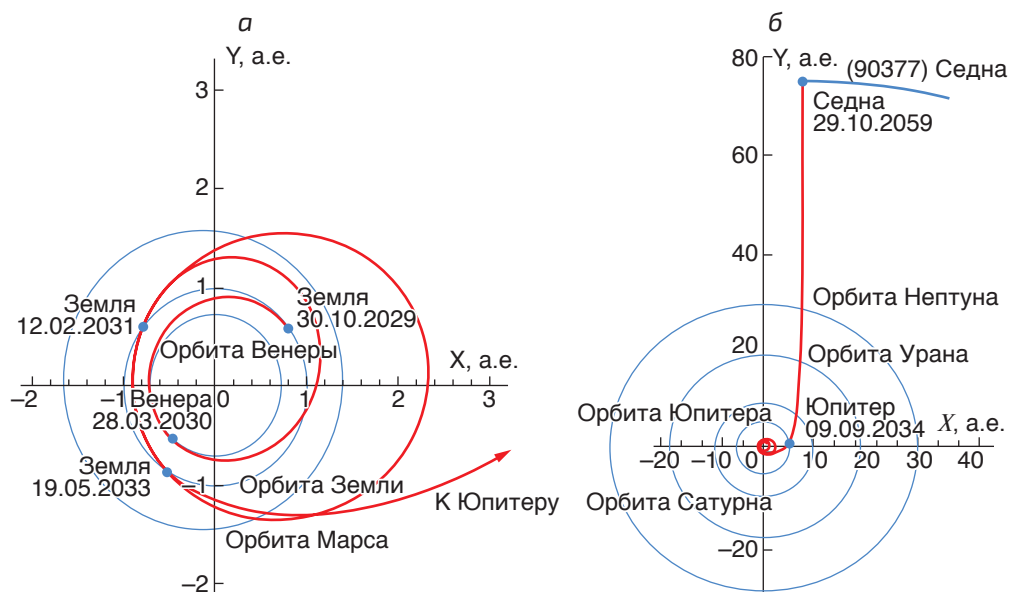


Рис. 5. Траектория перелета к Седне в 2029 году: от Земли до перелета к Юпитеру (а) и от Юпитера до Седны (б). Источник: Зубко В.А., Суханов А.А., Федяев К.С. и др., 2021

гательной установки самого аппарата). Поэтому после пролета Земли космический аппарат переводится на эллиптическую гелиоцентрическую орбиту с периодом 2 или 3 года с возвращением снова к Земле. При повторном пролете Земли ее гравитационного поля уже оказывается достаточно для приращения скорости, необходимого для дальнейшего пассивного полета к Юпитеру.

Стоит отметить, что также хорошо известна модификация описанной схемы, предполагающая сообщение аппарату импульса в афелии его орбиты на участке перелета «Земля–Земля».

Будучи хорошо известными среди баллистиков, подобные схемы применялись в реализации миссий *Galileo*, *JUICE*, *Casini–Huygens* и, частично, *Juno*, а также в выполняемой на данный момент миссии *Europa Clipper* (присутствует часть «Земля–Земля–Юпитер»).

Описанную схему снова можно применить, для примера, к Седне. Результаты предварительных расчетов показали, что ближайшее стартовое окно, обеспечивающее минимум затрат характеристической скорости, наступит в

2029 году. В этот год перелет к Седне станет возможен с затратами около 4.6 км/с при длительности перелета 30 лет.

При этом основные затраты характеристической скорости составят 3.7 км/с, затрачиваемых на старт к Венере, а также дополнительно еще 900 м/с потребуются сообщить космическому аппарату в момент второго сближения с Землей. Высота пролета Юпитера в рамках реализации данной схемы составит примерно 1 млн км, что обеспечивает относительно низкую радиационную дозу и снижает риски повреждений аппарата при сближении с планетой-гигантом.

Еще одним интересным результатом применения данной схемы для исследования траекторий перелета к ЭТНО является определение оптимальной по затратам характеристической скорости траектории перелета к астероиду 2012 VP113, предполагаемому объекту внутренней части облака Оорта.

Так, было установлено, что перелет «Земля–Венера–Земля–Земля–Юпитер» с датой старта в 2026 году позволяет осуществить попутный пролет Нептуна и сблизиться с объектом 2012 VP113

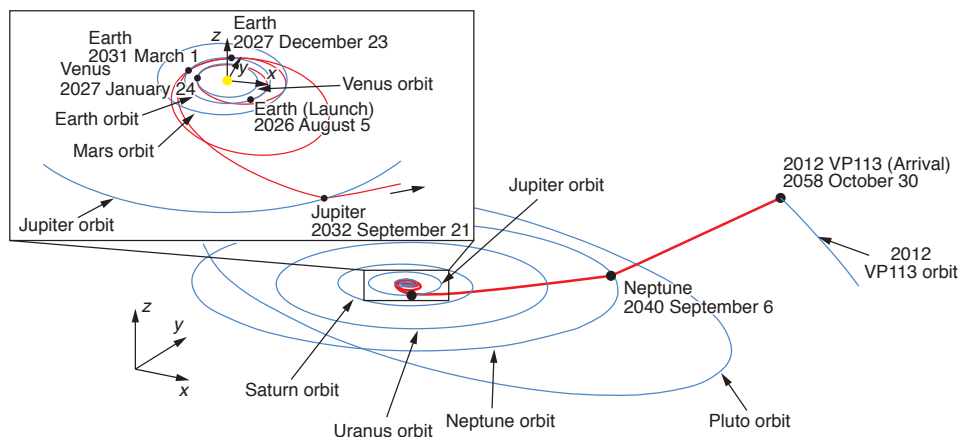


Рис. 6. Траектория полета к 2012 VP в 2026 году по схеме «Земля–Венера–Земля–Земля–Юпитер–Нептун» со временем полета 32.7 года. Источник: Zubko V.A., Belyaev A.A., 2021

через 32.7 лет после старта с затратами всего 3.8 км/с и полностью пассивными, т. е. безымпulsными, маневрами у других планет.

При этом также было обнаружено, что исключение облета Нептуна из такой схемы приводит к достижению глобального оптимума по характеристической скорости лишь при длительности полета 37.9 лет для той же даты старта.

На пути к межзвездному пространству

Подводя итог, стоит отметить, что в данной статье лишь в самом общем виде рассмотрена задача построения траекторий перелета к транснептуновым объектам, отмечены лишь основные трудности и возможные способы их преодоления. Сама проблема исследований дальних объектов космоса гораздо шире и едва ли может быть охвачена в одной работе.

Тема дальних космических полетов, включая полеты за пределы транснептуновой области, активно обсуждается в международном научном сообществе. Так, например, в рамках крупнейшего международного астронавтического конгресса этой теме посвящена панельная секция 52-го симпозиума IAA по поиску внеземного интеллекта (SETI).

Кроме того, на традиционно проводимой каждые два года генеральной ассамблее COSPAR выделена специальная панельная секция для обсуждения научных направлений, интересующих ученых в изучении пространства за пределами Нептуна. Также отдельно следует отметить проводимый каждые два года межзвездный симпозиум (последний прошел в 2023 году в университете Мак-Гилла в Канаде, став седьмым по счету). В рамках этого симпозиума представители как индустрии, так и науки обсуждают вопросы практической реализации полета в ближнюю межзвездную область на расстояние примерно 400 а. е.

Однако, несмотря на всю сложность проблемы, все же можно надеяться, что еще в этом столетии станет возможным наблюдение за продолжением миссий «Вояджер» и «Новые горизонты» хотя бы в исследовании объектов ЭТНО как следующего шага на пути к звездам.

Литература

1. Spohn T., Breuer D., Johnson T. (ed.). Encyclopedia of the solar system. Elsevier, 2014.
2. Эйсмонт Н.А. Существует ли девятая планета? // Земля и Вселенная. 2024. № 2. С. 20–29.
3. Левантовский В.И. Механика космического полета в элементарном изложении, 3-е изд., дополненное и переработанное. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 512 с.