

Симбирев Н.А., Суханов А.А., Старинова О.Л.

ОБСУЖДЕНИЕ СЦЕНАРИЯ ПОЛЕТА К НЕПТУНУ И ЕГО СПУТНИКАМ ТРИТОНУ И НЕРЕИДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ

Введение

Спутники Нептуна Тритон и Нереида в настоящее время остаются одними из наименее изученных спутников планет. Тритон по размеру, плотности и составу поверхности похож на карликовую планету Плутон. Считается, что это захваченный объект, который, возможно, изначально сформировался как независимый объект во внешней Солнечной системе. В какой-то момент ранней истории Тритона мог подойти слишком близко к Нептуну. Атмосферное сопротивление Нептуна или столкновение со спутником Нептуна замедлили Тритон достаточно, чтобы вывести его на вытянутую ретроградную орбиту. Огромные приливные деформации, которые при этом испытал Тритон, привели к плавлению ядра, которое претерпело дифференциацию: более плотный материал опустился в центр, а более летучие материалы поднялись на поверхность. Приливные взаимодействия затормозили Тритон на более близких к Нептуну участках его орбиты, в конечном итоге сделав его траекторию вокруг Нептуна почти круговой. Исследователи полагают, что под слоем льда может находиться целый океан жидкой воды и аммиака. Не исключено также, что вода на Тритоне могла существовать в жидком состоянии миллиарды лет [4]. В настоящее время известно, что поверхность Тритона ледяная и обладает высокой отражательной способностью. Считается, что поверхность Тритона охлаждалась быстрее, чем его внутренняя часть, и образовала толстый внешний слой преимущественно из водяного льда. По мере того, как подповерхностная вода замерзала, она расширялась, разрушая внешний слой льда, просачиваясь и заполняя трещины. Пересекающиеся трещины, видимые на изображениях поверхности

Тритона, сделанных «Вояджером», являются убедительным доказательством существования водяного льда внутри этой луны, поскольку никакие другие кандидаты на состав подповерхностного льда Тритона не расширяются при замерзании.

Нереида – третий по величине спутник Нептуна, отличающийся орбитой с необычайно большим эксцентриситетом. Нереида чрезвычайно тусклая, что затрудняет наблюдения даже с помощью самых крупных наземных телескопов. Поэтому о ней мало что известно, но данные об отражательной способности, полученные «Вояджером-2» в 1989 г., позволяют предположить наличие на поверхности льда и силикатов. Странная орбита Нереиды подтверждает гипотезу о том, что Тритон – это объект, который был захвачен гравитацией Нептуна и чей процесс захвата за миллиарды лет серьезно разрушил первоначальную лунную систему Нептуна.

Наличие более полных данных об упомянутых спутниках Нептуна и их строении позволило бы ответить на целый ряд важных вопросов, таких как процесс формирования Нептуна и его спутников, состав и строение объектов пояса Койпера, эволюция орбит планет и спутников при взаимодействии друг с другом и с захваченными объектами. Это приводит к необходимости рассмотреть перспективы создания отдельной миссии по изучению Нептуна и его спутников с близкого расстояния.

Характеристики и конфигурация космического аппарата

Существенной проблемой в исследовании далёких планет и их спутников является отсутствие эффективных космических транспортных систем, позволяющих доставлять большие объёмы полезного груза на столь большие расстояния. Одним из наиболее перспективных решений этой проблемы является использование двигательных установок малой тяги, обеспечивающих выполнение полёта с минимальным расходом рабочего тела. Использование электрической двигательной установки (ЭДУ) выдвигает ряд требований к системам космического корабля, прежде всего, к системе

электроснабжения с высокой выходной мощностью, что существенно ограничивает сферу применения ЭДУ [2].

Табл. 1. Значения среднего солнечного излучения для планет

Планета	Расстояние до Солнца, а.е.	Среднее солнечное излучение, Вт/м
Меркурий	0,387	9116,4
Венера	0,723	2611,0
Земля	1,0	1366,1
Марс	1,524	588,6
Юпитер	5,204	50,5
Сатурн	9,582	15,05
Уран	19,23	3,72
Нептун	30,10	1,51

Использование солнечных батарей для подобной миссии невозможно, так как из-за большой требуемой мощности и деградации панелей в условиях космического излучения при длительной эксплуатации солнечные батареи должны обладать огромной площадью и массой, что делает их слишком тяжёлыми по сравнению с другими системами. Но главным фактором, ставящим крест на использовании солнечных батарей для полёта к дальним планетам, является падение мощности солнечного излучения с увеличением расстояния от Солнца по закону обратных квадратов (табл. 1): так аппарат на орбите Юпитера на дистанции в 5,2 а.е. будет получать в 27 раз меньше электроэнергии, чем у Земли.

На данный момент в качестве источника энергии для энергоустановки КА наиболее реалистично смотрится использование энергии ядерного распада. Из всех известных человечеству управляемых источников энергии ядерное топливо обладает наибольшей удельной энергоёмкостью, поэтому ядерная энергетика является перспективным вариантом снабжения КА большими объёмами энергии в течение длительного времени [3].

В наше время наблюдается возрождение интереса к ядерным реакторам. NASA ведёт работу по созданию ядерного реактора Kilopower для размещения на КА и предназначенного для работы на поверхности Луны и Марса. Реакторы Kilopower будут иметь раз-

ную мощность - от 1 до 10 кВт и производить электроэнергию в течение 10 лет (табл. 2). В табл. 3 и 4 приведены характеристики двигательной установки и массовая сводка КА, который мог бы использоваться для проектируемой миссии в систему Нептуна. Именно эти характеристики использовались при анализе возможной схемы миссии.

Табл. 2. Параметры энергетической установки КА

Название	Kilopower
Концепция реактора	Двигатель Стирлинга
Состояние разработки	Прототип
Топливо	235U
Тепловая мощность, кВт	13,8 – 3 энергоблока
Электрическая мощность, кВт	3,2 – 3 энергоблока
Масса, кг	402 – 3 энергоблока

Табл. 3. Параметры двигательной установки КА

Название	JAXA IES-35 cm
Концепция реактора	Ксеноновый ионный двигатель
Состояние разработки	Лётные испытания
Тяга, Н	0,15
Удельный импульс, с	3500
Мощность двигательной установки, кВт	3
Ресурс, час	25000
КПД	0,87

Табл. 4. Массовая сводка КА

Масса КА, кг	850
Масса рабочего тела, кг	350
Сухая масса, кг	500
Масса энергоустановки, кг	402
Масса двигательной установки, кг	20
Масса топливного бака, кг	28
Масса системы связи, кг	22
Масса полезной нагрузки, кг	42,9
Масс-спектрометр, кг	14
Магнитометр, кг	1,5
Звёздный датчик, кг	0,8 x 2
Бортовое запоминающее устройство, кг	1,8

Рассмотрение возможной схемы перелёта к Нептуну

Рассматривается схема трёхэтапная схема полёта: запуск с низкой околоземной орбиты (НОО) (табл. 5) и уход от Земли; гелиоцентрический перелёт к Нептуну с двумя гравитационными манёврами у Земли, гравитационным манёвром у Юпитера; полёт в сфере влияния Нептуна с пролётом Нереиды и Тритона.

Табл. 5. Параметры исходной НОО

a , км	e	i , град	Ω , град	ω , град	M_0 , град	T (дата)
6571,0	0,01	51,6	100	260	100	13.01.2033

На первом этапе необходимо вывести космический корабль с НОО за пределы сферы влияния Земли с необходимой гиперболической избыточной скоростью. В связи с низкой тяговооружённостью (ТВО) ($TBO = 1,8 \cdot 10^{-5}$) запуск КА целесообразно осуществлять с использованием разгонного блока «Фрегат» (табл. 6).

Табл. 6. Характеристики разгонного блока «Фрегат»

Начальная масса с максимальной заправкой, кг	6235
Конечная масса, кг	945
Максимальный рабочий запас топлива, кг	5235
Тяга ДУ: режим большой тяги, кН	19,9
Удельный импульс: режим большой тяги, с	333,2

На втором этапе космический корабль на пути к Нептуну совершает два облёта Земли и один облёт Юпитера. В 2030-х гг. редкое совмещение Нептуна и Юпитера позволит совершить гравитационный манёвр вокруг Юпитера на пути к Нептуну, что уменьшает количество топлива и сокращает время полёта. Чтобы достичь Юпитера, КА использует двойной гравитационный манёвр Земля-Земля (EEGA).

Третий этап включает в себя три группы манёвров: торможение корабля и выход на опорную орбиту вокруг Нептуна; последовательность тормозных манёвров, обеспечивающая пролёт Нереиды на заданной дистанции; пролёт Тритона.

Манёвр ЕЕГА, гравитационный манёвр у Юпитера и полёт к Нептуну

Для достижения Юпитера выполняются два облёта Земли (манёвр ЕЕГА), схема которых показана на рис. 1 и 2. После выхода из сферы действия Земли КА проходит полный виток и в перигеентре орбиты даёт импульс, который выводит аппарат на промежуточную орбиту с периодом 1,3 года [II]. Эта орбита используется для фазирования космического корабля. Через 2,5 витка, когда он занимает подходящее положение относительно Земли, выполняется манёвр ЕЕГА.

Перед первым пролётом Земли аппарат в апоцентре орбиты двигателями малой тяги корректирует свою траекторию (2) и обеспечивает пролёт Земли на заданной дистанции, что позволяет перевести космический корабль на орбиту с периодом 1,5 года.

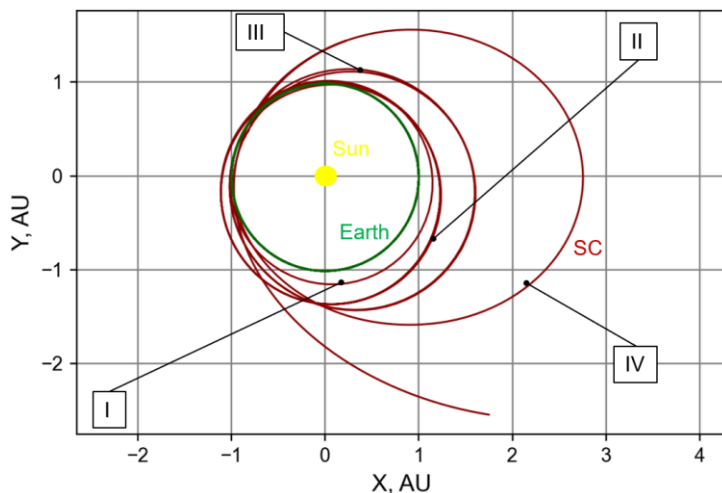


Рис. 1. Траектория выполнения манёвра ЕЕГА: I – стартовая орбита КА, II – промежуточная орбита КА, III – орбита КА после первого пролёта Земли, IV – орбита КА после второго пролёта Земли

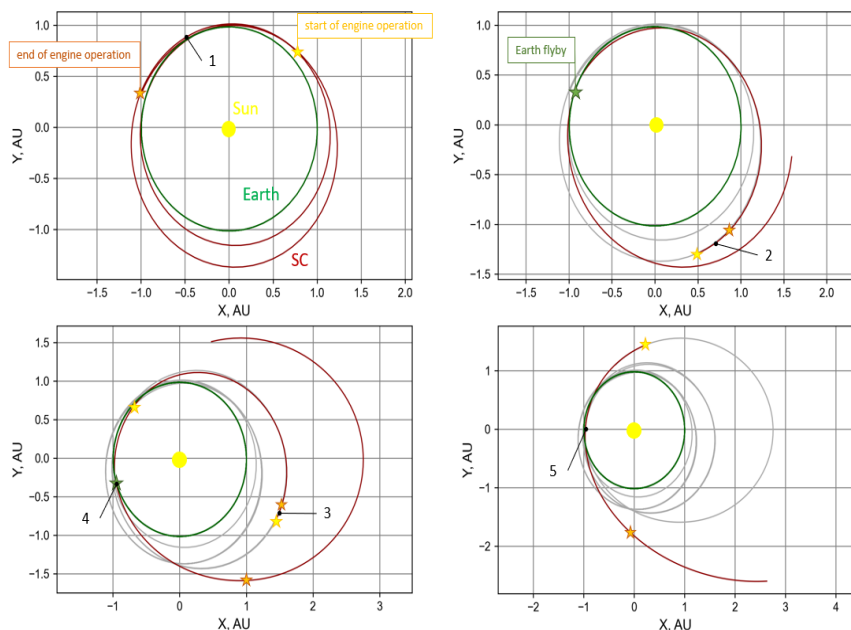


Рис. 2. Траектория выполнения манёвра EEGA:
1–5 – активные манёвры, совершаемые ЭДУ КА

Через 1,5 витка КА займёт подходящее положение для реализации второго пролёта Земли. Проведя коррекцию траектории в апоцентре орбиты (3), аппарат направляется к Земле. Так как приращения энергии от пассивного облёта планеты недостаточно для перехода на фазирующую орбиту с заданным периодом 2,5 года, то необходимо совершить активный облёт планеты (4).

После двух пролётов Земли КА все ещё не хватает энергии, чтобы достичь Юпитера. Поэтому необходим длинный участок разгона в перицентре орбиты (5). После этого участка космический корабль достигает Юпитера и совершает гравитационный манёвр. Облёт Юпитера сообщает КА дополнительную скорость, корректирует плоскость его орбиты и направляет его к Нептуну (рис. 3).

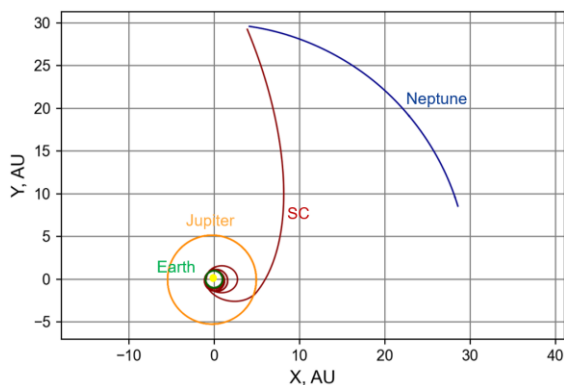


Рис. 3. Траектория полёта: гравитационный манёвр у Юпитера и дальнейший полёт к Нептуну

Полёт в сфере действия Нептуна: пролёты Нереиды и Тритона

После входа в сферу действия Нептуна необходимо замедлить КА, чтобы выйти на опорную орбиту вокруг Нептуна. Из-за высокой скорости сближения торможение начинается сразу после входа в сферу действия Нептуна (т.е. на расстоянии около 86 800 тыс. км от планеты). Торможение осуществляется за один длительный активный манёвр, который переводит КА на высокоэллиптическую опорную орбиту вокруг Нептуна (рис.4).

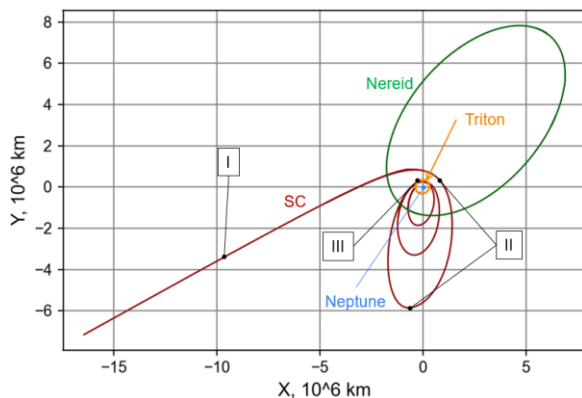


Рис. 4. Траектория полёта в сфере действия Нептуна: I – манёвр перехода на опорную эллиптическую орбиту, II – два манёвра торможения, для прохождения Нереиды, III – 2 манёвра торможения, для прохождения Тритона

Далее выполняются основные задачи миссии: пролёты Нереиды и Тритона. Пролёт Нереиды возможен в перицентре её орбиты, когда КА окажется на наименьшем расстоянии от спутника. Таким образом, для решения задачи сближения с Нереидой потребуется небольшая коррекция орбиты комбинацией двух манёвров торможения: одного в апоцентре опорной орбиты, другого в перицентре результирующей орбиты. Пролёт Нереиды будет осуществляться с высокой относительной скоростью, что затруднит наблюдение за спутником. Использование двух активных манёвров позволяет вывести КА на переходную орбиту, обеспечивающую пролёт Нереиды на расстоянии 10 тыс. км 30 июля 2063 г.

Пролёт Тритона реализуется по аналогичной схеме: два манёвра торможения в перицентре орбиты позволяют фазировать КА и выполнить облёт Тритона на расстоянии 10 тыс. км 18 октября 2063 г. Количество и продолжительность манёвров может варьироваться в зависимости от целевого времени полёта и расхода топлива. Представленный вариант обеспечивает кратчайшее время полёта.

Заключение

Разработан возможный сценарий миссии по изучению Нептуна и его спутников Тритона и Нереиды с близкого расстояния в 10 тыс. км. Для такой миссии предлагается использовать КА, оснащённый современной ионной двигательной установкой с удельным импульсом 3500 с и тягой 0,15 Н. Показано, что при начальной массе 850 кг и продолжительности полёта 30 лет общая масса рабочего тела не превысит 350 кг. В настоящее время ни один из разрабатываемых проектов полёта к Тритону не предполагает изучение с близкого расстояния других спутников Нептуна, в частности Нереиды. Поэтому мы считаем, что наше исследование окажет помощь в будущих исследованиях Нептуна и его спутников.

Библиографический список

1. А.А. Суханов Астродинамика. М.: Изд. ИКИ РАН, 2010. – 202 с.
2. В.В. Ивашкин, В.Г. Петухов, Траектории перелета с малой тягой между орбитами спутников Земли и Луны при использовании орбиты захвата Луной. Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2008. – 32 с.
3. Х.В. Леб, А.И. Моголкин, В.А.Обухов, В.Г. Петухов, Г.А. Попов Анализ многоразового лунного транспортного корабля, использующего ядерную энергетическую установку. М.: Наука, 2021. – 25 с.
4. Ellis D. Miner. Triton. Encyclopædia Britannica: электронная версия, 2016. – URL: <https://www.britannica.com/place/Triton-astronomy>

УДК 629.7

Сметана В.В., Ли Ц., Давыдов И.Е.

РАСЧЁТ ДИНАМИКИ ВОЗМУЩЁННОГО ДВИЖЕНИЯ МНОГОРАЗОВОГО РАКЕТНОГО БЛОКА

Введение

На данном этапе развития ракетно-космической техники остро стоит задача проектирования средств выведения с повторно используемыми частями. Данная концепция позволяет значительно уменьшить стоимость запусков. Уже были реализованы проекты американской компании SpaceX (Falcon9) и новозеландской компании RocketLab (Electron), а также произведен успешный тест китайского блока-прототипа Hyperbola-2Y (рис. 1).