

Межзвездные перелеты как комплексная задача радиофизики

А.С. Дмитриев

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп.7, chaos@cplire.ru*

Обсуждаются радиофизические аспекты, выдвинутой несколько лет назад, идеи создания и посылки флота парусных нано кораблей к звездной системе Альфа Центавра с помощью гигантской, но вполне реалистичной решетки лазерных излучателей, используемой в качестве внешнего источника создания тяги и формы организации подобных проектов в России.

Ключевые слова: межзвездные полеты, Альфа Центавра, нанокрафт

Interstellar flights as a complex problem of radiophysics

A.S. Dmitriev

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS.

The radiophysical aspects of the idea of creating and sending a fleet of sailing nanocrafts to the Alpha Centauri star system using a giant, but quite realistic array of laser emitters, used as an external source of traction and a form of organizing similar projects in Russia are discussed.

Keywords: interstellar flights, Alpha Centauri, nanocraft.

Введение

Отечественный читатель широко познакомился с идеей межзвёздных полетов в 1957 году, когда журнал «Техника молодежи» начал публикацию романа И.А. Ефремова «Туманность Андромеды» [1]. До запуска первого искусственного спутника Земли оставалось еще полгода, но идея освоения космоса уже витала в воздухе. И разница между полетом в космос и полетом к звездам для большинства читателей не казалась столь масштабной, как это есть на самом деле: и то, и другое, было еще фантастикой.



Рис. 1. Начало публикации романа И.А. Ефремова «Туманность Андромеды» в журнале Техника молодежи. 1957 год.

1. Ранние представления о реализации идеи межзвездных перелетов

Прошло всего несколько лет и задача полета к звездам стала широко обсуждаться в научно-технической литературе.

В качестве примеров приведем книги [2,3], посвященные рассмотрению принципов движения в космическом пространстве со скоростями, намного превышающими первую, вторую и третью космические скорости. Ведь для того, чтобы долететь до ближайших звезд нужны скорости сопоставимые со скоростью света, т.е. десятки тысяч километров в секунду и больше, что превосходит первые три космические скорости, по меньшей мере на три порядка. Анализ известных источников энергии и рабочих тел быстро показал, что все возможные источники знакомые человечеству на тот момент, и даже гипотетические схемы представляются, если и потенциально достижимыми, только в очень удаленной и туманной перспективе. Кроме того, не удалось выявить этапы, достижения которых существенно приближало бы хотя бы технологически к решению целевой задачи.

В последние несколько десятилетий надежды по решению грандиозной задачи полета к звездам стали связывать с использованием для ускорения космических аппаратов внешних источников энергии, прежде всего формирующих направленное электромагнитное излучение диапазона видимых и более коротких длин волн. Эта идея возникла по историческим масштабам времени практически сразу после изобретения лазера [4]. Однако, было показано, что и она сталкивается в случае полета полномасштабных межзвездных кораблей (а это объекты массой, как минимум, сотни и тысячи тонн) с невообразимыми для современного состояния науки и техники масштабами требуемых энергетических затрат и заоблачного уровня технологий.

Постепенно пришло понимание, что задача межзвездных перелетов требует какого-то конструктивного переформулирования. И мысль человеческая постепенно стала сдвигаться в этом направлении.

2. Исходная идея

Breakthrough Starshot (Прорыв: Звездный выстрел) - это исследовательская и инженерная программа стоимостью 100 миллионов долларов, целью которой является демонстрация концепции новой технологии, позволяющей осуществить полет сверхлегкого беспилотного космического аппарата со скоростью 20% от скорости света; и заложить основу для полета к Альфе Центавра в течение одного поколения.

В рамках инициативы Breakthrough Initiatives, Starshot был запущен Юрием Мильнером и Стивеном Хокингом в 2016 году и финансируется фондом, основанным Юрием и Джулией Мильнер [5].

Председателем Консультативного комитета проекта Starshot по предложению Мильнера стал профессор Лев, декан факультета астрономии Гарвардского университета. За некоторое время до формального старта программы, в середине 2015 года, молодые сотрудники Леба, начали сортировать варианты межзвездных перелетов на невозможное, невероятное и выполнимое. В декабре того же года они получили статью Филипа Любина, физика из Калифорнийского университета в Санта Барбара, названную «Дорожная карта к межзвездному полету» [6]. На основе своих предшествующих исследований по исследованию возможностей создания систем защиты Земли от метеоритной опасности в рамках проекта DE-STAR, профинансированного DARPA, Любин выбрал двигательную установку с лазерной фазированной антенной решеткой, то есть большим количеством маленьких лазеров, объединенных вместе так, чтобы их свет когерентно образовывал единый луч. Этот лазерный луч толкает, несущий парус, чип, который должен будет двигаться с хорошей долей световой скорости, чтобы достичь другой звезды за пару десятилетий. (Подобная

идея была опубликована в 1976 году физиком и писателем-фантастом Робертом Форвардом; который назвал эту схему Starwisp [7].) Хотя технология все еще была больше научной фантастикой, чем фактом, «я в основном передал Starshot дорожную карту», - рассказывал Любин, согласившийся присоединиться к проекту.

3. Концепция программы

Программа Breakthrough Starshot воплощает подход Кремниевой долины к космическим путешествиям, использующий экспоненциальный прогресс в ключевых областях технологий с начала 21 века.

Система доставки включает две составляющие: Нанокрафты и Систему Светового луча.

Нанокрафт - это роботизированный космический аппарат, состоящий из двух основных частей: StarChip (Звездный чип) и Lightsail (Световой парус).

StarChip. Закон Мура позволил резко уменьшить размер микроэлектронных компонентов. Это дает возможность создать пластину граммового масштаба, несущую камеры, фотонные двигатели, источник питания, навигационное и коммуникационное оборудование, и составить полностью функциональный космический зонд.

Lightsail. Достижения в области нанотехнологий приводят к созданию все более тонких и легких метаматериалов, обещающих сделать возможным изготовление парусов метрового масштаба толщиной не более нескольких сотен атомов и массой в граммы.

Световой луч. Рост мощности и снижение стоимости лазеров в соответствии с законом Мура привели к значительному прогрессу в технологии излучения света. Между тем, фазированные решетки лазеров (формирующие «световые лучи») потенциально могут быть увеличены до уровня 100 гигаватт.

Проект Breakthrough Starshot стремится довести эффект масштаба до астрономических размеров.

Корабли StarChip могут производиться серийно по цене iPhone и отправляться на миссии в большом количестве для обеспечения избыточности и покрытия.

4. Техническая реализация системы

Ключ к системе заключается в способности создать фотонный ускоритель. Для релятивистского полета ($> 0,1$ с) также необходима разработка зондов сверхмалой массы. Фотонный ускоритель представляет собой лазерную фазированную решетку, которая устраняет необходимость в разработке одного очень большого лазера и заменяет его большим количеством небольших (кВт класса) лазерных усилителей, которые по своей сути имеют фазовую синхронизацию, поскольку они питаются от обычного затравочного лазера. Этот подход также устраняет обычную оптику и заменяет ее фазированной решеткой из небольших оптических элементов, которые представляют собой тонкопленочные оптические элементы. Эта лазерная матрица была описана в статьях [6,7] и называется DE-STAR (**D**irected **E**nergy **S**ystem for **T**argeting of **A**steroids and **E**xplo**R**ation Система направленной энергии для наведения на астероиды и исследования). Рассматриваются системы DE-STAR квадратной формы и разных размеров DE-STAR – 1,2,3 и 4, со стороной квадрата, соответственно, 10, 100, 1000 и 10000 метров.

Полномасштабная DE-STAR 4 (50-70 ГВт) будет разгонять космический корабль массой несколько грамм с лазерным парусом масштаба 1 м примерно до 26% скорости света примерно за 10 минут, что позволит достичь Марса (1 а.е.) за 30 минут, пройти 1000 а.е. за 12 суток и достичь Альфы Центавра примерно за 20 лет. Тот же драйвер направленной энергии (DE-STAR 4) может также разогнать полезную нагрузку 100 кг

до примерно 1% от скорости света и полезную нагрузку в 10 000 кг до скорости более 1000 км/с. Систему можно масштабировать до любого уровня мощности и размера массива, где требуется компромисс между желаемой массой и скоростью космического корабля.

Дорожная карта может начаться с НАМНОГО более скромных систем, включая наземные испытания, испытаний на спутниках масштаба CubeSat, возможно, испытаний на МКС и все более сложных системах. Полезное тестирование может начаться на уровне субкиловатт, поскольку система в основном «самоподобна», и все устройства являются масштабированными версиями других. Нет никакого внутреннего барьера для скорости, кроме скорости света, и, таким образом, в отличие от других технологий, здесь нет «тупика». Эта технология масштабируется в огромном диапазоне масс. «Лазерный фотонный драйвер» может приводить в движение практически любую массовую систему с конечной скоростью, зависящей только от масштаба построенного драйвера. Поскольку система является модульной и масштабируемой, начальные затраты очень скромны, поскольку полезны даже небольшие системы.

5. Технические параметры вариантов системы

Размеры полезной нагрузки. После создания подходящего лазерного ускорителя полезная нагрузка может быть любого размера от миниатюрных релятивистских зондов, таких как зонд на одной плате для межзвездных полетов, прототип коорого обсуждается ниже, до больших космических кораблей, способных перевозить людей в Солнечной системе. Некоторые примеры многих возможных сценариев миссий показаны ниже. Важно, что один и тот же лазерный ускоритель можно использовать для запуска последовательно или параллельно любого количества космических аппаратов, и, таким образом, система используется и окупается на большом количестве космических полетов.

Ниже приводится избранный набор возможных миссий [6]. При расчетах предполагалось, что:

- масса отражателя равна базовой массе космического корабля (т. е. масса системы без учета отражателя, или общая масса системы в два раза больше базовая масса космического корабля);
- отражатель имеет толщину 1 микрон, а плотность отражателя равна принято равным $1,4 \text{ г/см}^3$;
- лазерная решетка имеет длину стороны 10 км, а отражатель — имеет квадратную форму.
- указанная масса является базовой массой космического корабля и, следовательно, массой отражателя.
- мощность лазера предположительно 70 ГВт.

Вариант 1

- Масса нанокraftа 1г - космический аппарат в масштабе пластины с отражателем размером 0,85 м, допускающий работу со значительным уровнем интенсивности света.

- Время, когда дифракционное лазерное пятно равно размеру рефлектора, $T = 186 \text{ с}$.

- Расстояние, когда лазерное дифракционное пятно равно размеру отражателя, $R = 4,01 \times 10^9 \text{ м}$.

- Скорость, когда лазерное дифракционное пятно равно размеру отражателя, $V_m = 4,31 \times 10^7 \text{ м/с}$.

- Бета $\beta = V/C$, когда дифракционное пятно лазера равно размеру отражателя, $\beta = 0,14$.
- Скорость при постоянном освещении $V_i = 6,10 \times 10^7$ м / с.
- Бета при постоянном освещении $\beta = 0,20$.
- Ускорение при полном освещении отражателя $a = 2,37 \times 10^4$ g.

Вариант 2

- Масса нанокraftа **10 г** – космический аппарат с несколькими пластинами с отражателем размером 2,7 м.
- Время до момента, когда пятно лазерной дифракции равно размеру отражателя, $T = 1050$ с.
- Расстояние, когда лазерное дифракционное пятно равно размеру отражателя, $R = 1,27 \times 10^{10}$ м.
- Скорость, когда лазерное дифракционное пятно равно размеру отражателя, $V_m = 2,43 \times 10^7$ м/с.
- Бета, когда лазерное дифракционное пятно равен размеру отражателя $\beta = 0,081$
- Скорость при постоянном освещении, $V_i = 3,43 \times 10^7$ м/с.
- Бета при постоянном освещении, $\beta = 0,11$.
- Ускорение при полном освещении отражателя $a = 2,37 \times 10^3$ g.

Вариант 3

- Масса аппарата **1 кг** - системы класса CubeSat с отражателем размером 27 м.
- Время, когда дифракционное лазерное пятно равно размеру рефлектора, $T = 3,32 \times 10^4$ с.
- Расстояние, когда лазерное дифракционное пятно равно размеру рефлектора, $R = 1,27 \times 10^{11}$ м.
- Скорость, когда дифракционное лазерное пятно равно размеру отражателя, $V_m = 7,67 \times 10^6$ м/с.
- Бета, когда лазерное дифракционное пятно равно размеру отражателя, $\beta = 0,026$
- Скорость при непрерывном освещении $V_i = 1,08 \times 10^7$ м / с
- Бета при постоянном освещении $\beta = 0,036$
- Ускорение при полном освещении отражателя $a = 23,7$ g.

Вариант 4

- Масса аппарата 10 кг — значительные возможности визуализации с 85-метровым отражателем.
- Время до момента, когда пятно лазерной дифракции сравняется с размером отражателя $T = 1,86 \times 10^5$ с.
- Расстояние, при котором пятно лазерной дифракции равно размеру отражателя $R = 4,01 \times 10^{11}$ м.
- Скорость, когда пятно лазерной дифракции равно размеру отражателя $V_m = 4,31 \times 10^6$ м/с.
- Бета, когда пятно лазерной дифракции равно размеру отражателя $\beta = 0,014$.
- Скорость при продолжительном освещении $V_i = 6,10 \times 10^6$ м/с
- Бета с продолжающимся освещением $\beta = 0,020$.
- Ускорение при полностью освещенном отражателе $a = 2,37$ g.

Приведенные варианты использования полномасштабной версии лазерной системы ускорения показывают большую гибкость возможностей использования такой техники

запуска высокоскоростных космических зондов и масштабируемость космических миссий по массам аппаратов и их количеству. Еще одно обстоятельство, которое может быть положено в основу «дорожной карты» развития этой технологии заключается в возможности поэтапного масштабирования характеристик таких ускорителей. Например, революционным шагом для перелетов в пределах солнечной системы была бы реализация возможности разгона космических аппаратов с массой в 10 кг до скоростей порядка 100 км/сек.

6. Комплекс радиофизических задач при реализации проекта

Уже первичное ознакомление с проектом Starshot показывает, что техника и техника, которые предполагается в нем использовать, кардинально отличаются от тех, которые используются в классической ракетно-космической технике.

Традиционные средства выведения используются в этом случае ограниченно для выведения частей системы на околоземные орбиты. Основная же и революционная роль возлагается на генерацию электромагнитного излучения, формирование пучков этого излучения, вопросы распространения этого излучения, его взаимодействия с высокоэффективными зеркалами парусов нанокraftов, создание и обеспечение работы систем связи этих сверхминиатюрных объектов с наземными средствами связи и комплекс проблем, обеспечивающих решение этих задач.

Таким образом «центром тяжести» основы межзвездной транспортной системы становится ее радиофизическая составляющая.

Рассмотрим некоторые детали этого комплекса радиофизических проблем.

Как отмечалось выше, проект предполагает создание массива лазеров, например, в высокогорных районах Земли и создание специальных нанокraftов – массива космических фемптоспутников, которые разгоняются излучением этих лазеров.

В процессе его реализации предстоит создать технологии, решающие как минимум следующие проблемы, которые смело можно отнести к радиофизическим или к имеющим существенную радиофизическую составляющую:

- построение километровых массивов сфазированных лазерных излучателей;
- генерация и хранение нескольких гигаватт-час энергии для каждого запуска;
- использование возможностей адаптивной оптики в реальном времени, для компенсации атмосферных явлений;
- фокусировки луча света на световом парусе в течение нескольких минут для разгона нанокraftов до необходимой скорости (20% от скорости света);
- получения изображений во время полета, в том числе изображений планет, передача этой и другой научной информации на Землю с помощью бортовой лазерной коммуникационной системы;
- использование лазерных излучателей для получения данных с нанокraftов более чем через четыре года спустя после их запуска.

Эти требования на сегодняшний день представляют собой серьезные инженерные проблемы, которые предстоит решить. Так, например, предполагаемая лазерная двигательная система по своим масштабам значительно превосходит все работающие сегодня аналоги. Однако значительный опыт создания «монстров», связанных с электромагнитными излучениями, уже есть. В части приемников к нему относятся большие радиотелескопы и многоэлементные оптические телескопы с суммарной апертурой больше 8 метров (например, телескоп Субару 261 зеркало, телескоп VTL 150 осевых и 64 боковых зеркала). В области передающих систем примерами могут служить станции загоризонтной радиолокации типа Дуга («Русский дятел»), имеющие размеры более 200 метров и излучаемую мощность 40 МВт [10], а также комплекс

ионосферных измерений HAARP с антенной решеткой из 180 антенн и излучаемой мощностью около 4 МВт.

7. Состояние разработок компонент

Прогресс в области нанокraftов. В качестве примера нанокraftа идеологи проекта приводят пример наноспутника KіlSat-2, который имеет размер 35x35x5 мм и весит менее 5 г. Это полнофункциональный космический объект, способный собирать информацию об окружающем его космическом пространстве с помощью нескольких, размещенных на нем датчиков и передавать эту информацию на землю на расстояния до 500 км со скоростью до 100 бит/сек [11].

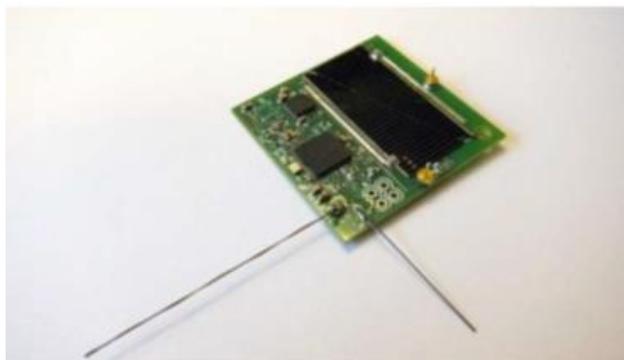


Рис. 2. Наноспутник (нанокraft), разработанный в Корнельском университете [11]

Световые паруса. Эксперимент «Знамя 2». 4 февраля 1993 года космический корабль «Прогресс М-15» отстыковался от орбитальной космической станции «Мир» и, отойдя на расстояние 160 метров, развернул солнечный парус. Парус представлял собой круг диаметром 20 метров, состоящий из отдельных секторов. Он был выполнен из металлизированной полимерной пленки толщиной 5 мкм.



Рис. 3. Космический аппарат «Прогресс М-15» с развернутым солнечным парусом.

В ходе программы «Знамя» были выполнены условия международного конкурса «Колумб 500», где победителем должен был стать тот, кто первым развернет в космосе солнечный парус. Однако, американская сторона, это достижение проигнорировала

Лазерные излучатели. Последние годы рост мощности лазеров и падение их стоимости подчиняется закону Мура. Это позволит в недалеком будущем создать специальные фазированные массивы лазеров («light beamer»), мощностью до 100 гигаватт.

Всего проект Breakthrough Starshot потребует:

— постройки в высокогорных районах километрового массива лазерных излучателей;

- генерации и хранения нескольких гигаватт-час энергии для каждого запуска;
- запуска «материнского корабля», который выведет на высокую орбиту тысячи нанокрафтов;
- использования возможностей адаптивной оптики в реальном времени, для компенсации атмосферных явлений;
- фокусировки луча света на световом парусе в течение нескольких минут для разгона нанокрафтов до необходимой скорости (20% от скорости света);
- учета влияния столкновений с межзвездной пылью в пути;
- захвата изображения планет, передачи другой научной информации на Землю с помощью бортовой лазерной коммуникационной системы;
- использования лазерных излучателей для получения данных с нанокрафтов спустя более 4 лет после их получения.

Некоторые из этих требований представляют собой значительные инженерные вызовы, которые предстоит решить команде проекта. Предлагаемая лазерная двигательная система по своим масштабам значительно превосходит все работающие сегодня аналоги. Сама суть проекта предполагает глобальную кооперацию и взаимодействие.

Состояние разработок лазеров. В начале 1990 годов коллектив сотрудников российской компании НТО «ИРЭ-Полус» разработал первые прототипы волоконных усилителей света с диодной накачкой, по мощности превышающие зарубежные аналоги. Позже основатель этой компании В. П. Гапонцев создал международную корпорацию IPG Photonics, которая в настоящее время контролирует 80 % мирового рынка волоконных лазеров большой мощности. Эти лазеры можно рассматривать, в качестве достаточно продвинутых прототипов для лазерных излучателей массива лазерных излучателей системы разгона нанокрафтов.

Подробно проблема создания фазированных решеток лазеров требуемых масштабов рассмотрена в [12].

8. Манифест «Эврика»

Чтобы активировать концентрацию усилий, связанных с проектом StarShot, Ю. Мильнер подготовил и опубликовал воззвание, которое назвал «Манифестом ЭВРИКА» [13].

В этом документе он заявляет, что наша цивилизация нуждается в миссии. Эта миссия, по его мнению, заключается в исследовании и познании нашей Вселенной. Миссия нужна чтобы обеспечить наше выживание, резко улучшить нашу жизнь и построить галактическую цивилизацию. Далее Мильнер отмечает важность и значение настоящего момента и значение направленности искусственного интеллекта для миссии. Основными способами продвижения миссии он считает ускорение Научной революции и зарождение Нового Просвещения. Для реализации этих планов нужно:

- инвестировать ресурсы в фундаментальные науки и космонавтику;
- позволить искусственному интеллекту способствовать научному прогрессу;
- прославлять ученых как героев;
- ориентировать образование на всеобщую историю и использовать силу искусства, чтобы объяснить ее.

9. Россия не может себе позволить быть второй

При всем уважении к Илону Маску, его идея, связанная с колонизацией Марса, не греет мне душу. Она грандиозна, затратна и, наверное, может стать важной вехой при взаимодействии человечества с КОСМОСОМ. Однако идеологически эта идея

недалеко ушла от классических воззрений на космические полеты внутри Солнечной системы, которым уже больше века. Она постоянно обсуждается в научной и популярной литературе и стала слишком обыденной, чтобы возбудить эмоции землян до уровня осознания некоторой миссии человечества. Кроме того, даже такие грандиозные и дорогие программы как Марсианский проект Маска, с научной точки зрения дадут только точечное представление о Солнечной системе в целом. А для ее тотального исследования требуются совсем другие методы.

Проекты типа «Starshot» с этой точки зрения выглядят как яркие вспышки надежды. Надежды, связанной с возможностью в обозримом будущем прорваться в межзвездное пространство, и достичь ближайших звезд в итоге этого прорыва. Создать технологии и технические средства, позволяющие изучать солнечную систему на всю глубину и существенно менее затратно, чем с помощью средств классической космонавтики, к тому же с значительно большими скоростями исследования.

Важно отметить, что проекты такого типа, находящиеся на начальном этапе, требуют не гигантских материальных и финансовых затрат, а серьезной концентрации интеллектуальных усилий научно-технического и философско-идеологического сообщества. Относительно невысокие требуемые на первых этапах объемы средств не дают существенного преимущества при реализации такого проекта сверхбогатым экономикам, что позволяет их эффективно участвовать в реализации даже небогатым странам. Значительно более важно для успешной реализации, по меньшей мере, на начальных стадиях является наличие элементов космизма в идеологии общества, наличие исторических успехов в деле освоения космического пространства, желание и воля постичь КОСМОС. С этим у России и союзных с ней государств, все в порядке.

Вопрос в том, как организовать такой проект. Наверное, форма организации должна принципиально отличаться от тех форм, которые использовались в СССР и РФ при реализации космических программ. Навскидку видно, что здесь не требуется максимальная концентрация усилий государства, как это было при реализации космической программы в СССР, или просто выделение каких-то денег, в надежде, что рыночные механизмы сделают свое дело, не сулят успеха. Мало чем может помочь и американский опыт при постановке и реализации космических программ: у нас просто другая технико-экономическая среда, которая определяющим образом формирует путь развития того или иного технологического направления.

Нужно думать, как нам это организовать. При любом варианте организации, на старте процесса и его начальной стадии нужно иметь общественную площадку, на которой можно было бы организовать периодический обмен идеями и результатами в области межзвездных коммуникаций, как между индивидуальными лицами, так и между заинтересованными научно-техническими группами.

В истории нашей страны есть по меньшей мере два примера общественных объединений, которые при поддержке государства, сыграли выдающуюся роль в развитии и освоении новейших для своего времени направлениях техники. Это Комитет содействия воздушному флоту России, на средства которого в 1909 году были заложены основы военно-воздушного флота, и Осоавиахим, заслуги которого в пропаганде, развитии и продвижении новейшей техники в Советском Союзе трудно переоценить.

Так что у нас имеется богатый опыт общественной самоорганизации для решения сложнейших научно-технических задач.

Осталось начать. Время не ждет.

Литература

1. И.А. Ефремов. Туманность Андромеды. М.: Молодая гвардия. 1957.
2. В.П. Бурдаков, Ю.И. Данилов. Ракеты будущего. М.: Атомиздат. 1980. 155 с.
3. А.С. Дмитриев, В.А. Кошелев. Космические двигатели будущего. М.: Знание. Серия. Космонавтика, Астрономия. 3/1982. 64 с.
4. G. Marx, Interstellar Vehicle Propelled by Terrestrial Laser Beam // Nature. 211. P. 22. 1966.
5. Breakthrough Initiatives, “Breakthrough Starshot,” 2020. <https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>. Y. Milner. Breakthrough Starshot.
6. P. Lubin. A Roadmap to Interstellar Flight // JBIS. V. 69. P. 40-72. 2016.
7. G. Hughes, P. Lubin, J. Bible, J. Bublitz, J. Arriola et al. DE-STAR: Phased-array laser technology for planetary defense and other scientific purposes // SPIEDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie.
8. R. Forward. Roundtrip interstellar travel using laser-pushed lightsails // Journal of Spacecraft and Rockets V. 21. P. 187-195, 1984.
9. A. Finkbeiner. Near-Light-Speed Mission to Alpha Centauri. A billionaire-funded plan aims to send a probe to another star. But can it be done? // Scientific American. V. 316(3) P. 30-37. 2017.
10. И.Н. Дубровский, В.И. Костюченко. История загоризонтной радиолокационной системы «Дуга» // Приволжский научный вестник. № 7(11). 2012. С. 17-22.
11. Z. Manchester, M. Peck, A. Filo. KickSat: A Crowd-Funded Mission To Demonstrate The World's Smallest Spacecraft // August 2013. Conference: AIAA/USU Conference on Small Satellites // <https://www.researchgate.net/publication/307454621>
12. C.P. Bandutunga, P.G. Sibley, M.J. Ireland and R.L. Ward. Photonic solution to phase sensing and control for light-based interstellar propulsion // Journal of the Optical Society of America B. V. 38, No. 5. P. 1477-1486. 2021.
13. Yu. Milner. EUREKA MANIFESTO. The Mission for Our Civilization // 2021. 100 p.