

Перспективы и вызовы космической энергетики

Гулиев И.А., Руснак А.В., Шарапова У.П.

В данном исследовании рассматривается потенциал космических энергетических технологий, в частности спутников с солнечными панелями и улавливания энергии солнечного ветра, как устойчивых альтернатив наземной выработке энергии. Проведя всесторонний обзор литературы, мы оцениваем текущее состояние технологий, экономическую целесообразность, экологическое воздействие и нормативные требования данных систем. Наш анализ показывает, что спутники с солнечными панелями могут обеспечивать непрерывную подачу энергии, не зависящую от погодных условий, при этом снижение стоимости запусков и развитие лёгких материалов повышают их рентабельность. Спутники для улавливания энергии солнечного ветра, хотя и находятся на ранних стадиях разработки, обладают потенциалом высокой энергоотдачи за счёт использования доступных ресурсов. Однако обе технологии сталкиваются с вызовами, такими как эффективность передачи энергии и экологические издержки запусков. Решение этих проблем посредством политических мер, технологических инноваций и международного сотрудничества может сделать космическую энергетику жизнеспособным источником чистой и масштабируемой энергии в будущем.

для цитирования

ГОСТ 7.1-2003

Гулиев И.А., Руснак А.В., Шарапова У.П. Перспективы и вызовы космической энергетики // Дискуссия. – 2025. – Вып. 134. – С. 107–114.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Космическая энергетика, солнечная энергия, энергия ветра, возобновляемые ресурсы, устойчивые энергетические решения.

Space energy prospects and challenges

Guliyev I.A., Rusnak A.V., Sharapova U.P.

This study examines the potential of space energy technologies, in particular solar-powered satellites and solar wind energy capture, as sustainable alternatives to terrestrial power generation. Through a comprehensive literature review, we assess the current state of the art, economic feasibility, environmental impact, and regulatory requirements of these systems. Our analysis shows that solar-powered satellites can provide continuous power independent of weather conditions, while lower launch costs and the development of lightweight materials make them more cost-effective. Although still in the early stages of development, solar wind energy satellites have the potential to deliver high energy yields by utilizing available resources. However, both technologies face challenges such as energy transfer efficiency and environmental launch costs. Addressing these challenges through policy, technological innovation, and international cooperation could make space energy a viable source of clean and scalable energy in the future.

FOR CITATION

Guliyev I.A., Rusnak A.V., Sharapova U.P. Space energy prospects and challenges. *Diskussiya [Discussion]*, 134, 107–114.

APA

KEYWORDS

Space energy, solar energy, wind energy, renewable resources, sustainable energy solutions.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство поклонников научной фантастики знакомы с концепцией сферы Дайсона – гипотетической структуры из солнечных панелей, окружающей звезду и собирающей бесконечное, почти безграничное количество энергии для человечества. Хотя эта идея выглядит захватывающе, она сталкивается с очевидными проблемами, такими как сложность добычи необходимых материалов и астрономические затраты. Однако существует более реалистичное предложение – рой спутников с солнечными панелями на околоземной орбите, которое привлекло внимание не только любителей фантастики, но и профессиональных астрономов и физиков.

Космические энергетические технологии обладают значительными преимуществами и перспективами для получения энергии без выбросов углерода, с высокой энергоэффективностью и экономической рентабельностью. Эти технологии

обещают низкие эксплуатационные расходы, масштабируемость и возможность международного сотрудничества, обеспечивая энергию как для нужд Земли, так и для перспективных внеземных баз. Их потенциал обусловлен стремительным технологическим прогрессом, растущим мировым интересом к их развитию и способностью эффективно вырабатывать неограниченную чистую энергию. В случае ответственного внедрения эти технологии могут стать ключевыми для будущего человечества: они не занимают пригодные для жизни территории, обеспечивают практически бесконечный источник энергии и обладают высокой масштабируемостью при низких затратах на обслуживание.

Сегодня стоимость запусков достигла минимального уровня в истории и продолжает снижаться, технологии становятся всё более лёгкими и простыми в производстве. В то же время глобальный энергетический кризис усугубляется:

стоимость производства энергии растёт, а её потребление увеличилось примерно на треть по сравнению с 2000 годом. В этом контексте космическая энергетика представляется не только перспективным инвестиционным направлением, но и решением для удовлетворения растущих энергетических потребностей человечества.

В данной работе проводится всесторонний анализ космических энергетических технологий с фокусом на перспективных спутниках с солнечными панелями и концепции улавливания энергии солнечного ветра. Представлен обзор литературы по данной теме, анализ текущего состояния технологий и их экономической жизнеспособности, экологического воздействия, а также ключевых технических аспектов. Кроме того, рассматриваются необходимые нормативные и политические меры, которые могли бы способствовать внедрению этих технологий в будущем.

МЕТОДОЛОГИЯ

В данном исследовании рассматриваются два ключевых направления: спутники с солнечными панелями и использование энергии солнечного ветра. Анализ основан на изучении существующих технических исследований, их обобщении и систематизации для формирования целостного представления о данных технологиях. В рамках исследования проводится анализ затрат и экологического воздействия, позволяющий оценить текущее состояние технологий и их перспективы на будущее¹.

Вначале был проведён обзор литературы для общего понимания исследуемых направлений, после чего выполнен детализированный анализ экономических и экологических последствий внедрения каждой из технологий. Раздел «Текущее состояние» описывает современные достижения в области космической энергетики, а раздел, посвящённый политике и регулированию, охватывает существующие нормы и требования, а также те меры, которые необходимо принять для эффективной и ответственной интеграции этих технологий².

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

3.1. Солнечные спутники

Солнечная энергия обеспечивает около 6% мирового производства электроэнергии и явля-

1 Dvorsky G. How to Build a Dyson Sphere in Five (Relatively) Easy Steps. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.sentientdevelopments.com/2012/03/how-to-build-dyson-sphere-in-five.html (дата обращения: 22.02.2025).

2 Katete E. Is Space-Based Solar Power Our Future? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.greenmatch.co.uk/blog/2020/02/space-based-solar-power (дата обращения: 22.02.2025).

ется одной из самых быстроразвивающихся возобновляемых технологий. Простота её интеграции в открытые пространства, городскую и пригородную инфраструктуру делает её одной из наиболее заметных и широко распространённых чистых энергетических технологий. Солнечные панели могут устанавливаться как в масштабных солнечных фермах, так и на крыши частных домов [1]. Развитие ультратонких и прозрачных солнечных панелей также позволяет использовать их на фасадах небоскрёбов. Однако основной недостаток наземных солнечных установок заключается в зависимости от погодных условий, что ограничивает их эффективность. Космические солнечные спутники решают эту проблему.

Технология солнечных спутников основана на размещении солнечных панелей на околоземной орбите, что позволяет им собирать солнечную энергию на протяжении всего 24-часового цикла. В отличие от наземных систем, такие панели работают 99% времени, так как расположены выше мезосферы и облачного покрова. Эти спутники представляют собой потенциально высокоэффективный метод улавливания энергии: современные разработки делают панели всё тоньше и легче, а стоимость запусков ракет достигла исторического минимума. Главными проблемами остаются высокие начальные затраты и недостаточный уровень развития технологии микроволновой передачи энергии, необходимой для транспортировки собранной солнечной энергии на Землю [2].

Космические солнечные панели выделяются как энергоэффективная, экологически чистая и быстро развивающаяся технология. Исследования подтверждают её перспективность, отмечая, что «этота технология может затмить все существующие источники энергии, при этом оказывая минимальное негативное воздействие на окружающую среду». Современные материалы становятся дешевле и эффективнее: если раньше фотоэлементы изготавливались на основе кристаллического кремния, то сейчас разрабатываются более лёгкие тонкоплёночные солнечные батареи на основе теллурида кадмия, селенидов меди, индия и галлия, а также перспективные и недорогие перовскитные солнечные элементы. Будущее развитие технологий может включать установку батарей с большей ёмкостью и внедрение искусственного интеллекта для оптимизации выработки и использования энергии, управления энергосистемами и прогнозирования возможных неисправностей [3].

Развитие технологии солнечных спутников идёт быстрыми темпами, чему способствует государственная поддержка, обеспечивающая финансирование и исследования. Основные проблемы, такие как высокая стоимость запусков и потенциальное воздействие на локальные экосистемы, могут быть решены за счёт использования дешёвого и экологически безопасного топлива, разработки которого ведутся уже несколько лет различными независимыми группами.

Экономический анализ технологии солнечных спутников также выглядит многообещающим. Доступно несколько вариантов финансирования, и выбор стратегии будет зависеть от того, какие организации займутся первыми проектами. Ожидается, что государственные агентства будут ориентироваться на более экономичные решения, тогда как частные компании смогут позволить себе более затратные, но при этом более энергоэффективные подходы. Принятые решения на ранних этапах внедрения технологий, вероятно, станут моделью для последующих проектов, если концепция солнечных спутников окажется успешной [4].

Хотя для реализации данной технологии не требуется радикальных технологических прорывов, остаются важные задачи: необходимо дальнейшее снижение массы солнечных панелей и разработка эффективного способа передачи энергии на Землю. На сегодняшний день коэффициент передачи энергии, хотя и показывает обнадёживающие результаты, пока не является оптимальным, и данное направление нуждается в дальнейшем развитии.

3.2. Солнечный ветер

Другим способом получения солнечной энергии является использование солнечного ветра – потока протонов и электронов, постоянно испускаемых Солнцем. Их можно улавливать с помощью технологий, таких как солнечные паруса или электрические паруса (e-sails). В настоящее время существует два признанных типа спутников, способных собирать солнечный ветер: спутник Дайсона-Харропа и спутник для улавливания солнечного ветра (Solar Wind Power Satellite). Однако оба требуют размещения на значительном расстоянии от орбиты Земли, что создаёт ряд ограничений и вызывает активные дискуссии среди учёных. Главная задача – найти наиболее эффективные способы размещения таких спутников, обеспечивающие их техническое обслуживание и удешевление производства.

Доступные исследования указывают на ряд ключевых преимуществ данной технологии.

Во-первых, высокая энергетическая эффективность: по оценкам, подобные системы теоретически способны генерировать «энергию, в 100 миллиардов раз превышающую потребности человечества». Во-вторых, низкая стоимость производства, поскольку базовая технология использует дешёвые и распространённые материалы, такие как медь. В-третьих, это полностью возобновляемый и экологически чистый источник энергии, не зависящий от погодных условий.

Тем не менее, существуют серьёзные ограничения. Главные из них – неэффективность размещения спутников и проблемы с передачей энергии. Для работы данной технологии солнечные паруса должны находиться в сотнях миль от Земли, что усложняет передачу собранной энергии, аналогично проблемам с передачей энергии у спутников с солнечными панелями. Кроме того, эффективность технологии зависит от большой площади поверхности: спутники должны быть огромными, чтобы эффективно улавливать солнечный ветер и оставаться заметными на значительных расстояниях. Дополнительные сложности создаёт магнитное поле Земли, которое затрудняет транспортировку энергии на поверхность.

Исследования в этой области продвигаются медленно, главным образом из-за недостаточного интереса со стороны научного и технологического сообщества. В сравнении с солнечными спутниками, концепция сбора энергии солнечного ветра пока менее проработана, а потому считается более рискованной с точки зрения инвестиций. Однако, если эта технология получит развитие, она может оказаться более дешёвой в производстве и обслуживании, чем спутники с солнечными панелями. Более того, многие технологические усовершенствования, необходимые для работы солнечных спутников, могут быть применимы и к солнечному ветру, а значит, прогресс в одной области неизбежно приведёт к прорыву в другой [5].

4.1. Солнечные спутники

Концепция спутников с солнечными панелями предполагает создание базового, чистого источника энергии, на основе которого можно разрабатывать другие технологии. В настоящее время эта область развивается стремительно. NASA проявляет значительный интерес к разработке солнечных спутников, так же как и десятки независимых и корпоративных исследователей. В последние годы появились компании, ориентированные на данную технологию, например, Reflect Orbital. Вместо солнечных панелей эта компания предлагает использовать зеркала, ко-

торые отражают солнечный свет на поверхность Земли, где он затем улавливается наземными панелями [6].

Однако такой подход имеет свои недостатки. Хотя он позволяет собирать солнечную энергию и ночью, он становится неэффективным в условиях плохой погоды, поскольку видимый и ультрафиолетовый свет не проникают сквозь облака. В отличие от этого, традиционные спутниковые технологии используют микроволны, которые менее подвержены атмосферным помехам. Преимуществом зеркальных спутников является их низкая стоимость: поскольку они не содержат солнечных батарей, их производство обходится дешевле, а меньший вес позволяет запускать больше спутников при сниженных расходах [7].

Главным фактором для успешного внедрения спутниковых солнечных электростанций является государственная поддержка. В настоящее время большая часть разработок осуществляется частными компаниями и отдельными исследователями, но для полноценного внедрения технологий необходимо государственное финансирование и нормативное регулирование.

Фотогальванические элементы достигли беспрецедентной эффективности и их развитие продолжается. Разработка ультратонких солнечных панелей представляется особенно перспективной, так как такие технологии позволяют значительно сократить затраты на запуск и материалы. Ключевые игроки, такие как США, Япония и Китай, уже проявляют значительный интерес к этим технологиям, что свидетельствует о дальнейшем расширении научных и промышленных разработок [8].

Одной из ключевых нерешённых проблем остаётся технология передачи энергии. Основными кандидатами являются микроволны и мощные лазеры: микроволны менее мощные, но безопаснее, в то время как лазеры могут передавать больше энергии, но представляют опасность при неконтролируемом использовании.

Для размещения солнечных спутников предлагаются два основных типа орбит: геостационарная и орбита «Молния». Геостационарная орбита требует больших затрат на запуск, но обеспечивает стабильную передачу энергии благодаря постоянному расстоянию от Земли. Орбита «Молния» дешевле с точки зрения наземных систем, поскольку её высокая эксцентриситетность позволяет спутникам периодически находиться ближе к Земле, обеспечивая более надёжную передачу энергии в определённые временные промежутки.

4.2. Солнечный ветер

Текущие исследования технологий улавливания солнечного ветра находятся на удовлетворительном уровне, и накоплено значительное количество данных о механизмах сбора энергии в космосе. Частицы солнечного ветра, движущиеся с высокой скоростью, могут быть улавливаемы с помощью солнечных и электрических парусов (e-sails). Концепция e-sail была предложена в 2004 году финским учёным Пеккой Янхуненом.

Основное предназначение таких технологий – движение в космосе. В связи с этим разные модели электрических парусов проходят испытания, их разрабатывают в рамках изучения солнечных парусов [9]. В последние два десятилетия NASA активно работало над созданием солнечных парусников с новыми системами движения. Несмотря на инвестиции в размере \$30 миллионов, первый запуск прототипа NanoSail-D завершился неудачей: спутник не смог выйти на орбиту, что вызвало сомнения в перспективах солнечного парусного движения.

Однако другие миссии, такие как IKAROS, разработанный Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA), продемонстрировали успешное применение солнечного паруса. Хотя IKAROS не достиг орбиты Венеры, как было запланировано, он стал важной вехой в исследованиях e-sail, что подтвердило возможность сбора энергии солнечного ветра с использованием подобных технологий³.

Ещё один значимый проект – программа Lightsail, реализуемая под эгидой ULTRASat и финансируемая за счёт спонсоров. В рамках программы было запущено два аппарата:

– **Lightsail-1**, который после 18 дней тестирования был успешно развернут 7 июня 2015 года.

– **Lightsail-2**, запущенный в июне 2019 года, который управлял своим положением относительно Солнца и выявил ряд проблем, включая частичное развертывание солнечных панелей и управление маховиком момента. В 2022 году он вошёл в атмосферу Земли и прекратил своё существование.

После завершения миссии Lightsail-2 NASA продолжило разработку солнечных парусников, запустив в апреле 2024 года самую современную миссию **ACS3 (Advanced Composite Solar Sail)**.

Таким образом, в последние годы был достигнут значительный прогресс в разработке e-sail.

³ NASA. New Study Updates NASA on Space-Based Solar Power. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.nasa.gov/organizations/otps/space-based-solar-power-report/ (дата обращения: 22.02.2025).

Исследования солнечного ветра и технологий его использования продолжаются и в будущем они могут привести к созданию эффективных систем по сбору энергии из солнечного ветра.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

5.1. Солнечный ветер

Две основные технологии для сбора и передачи энергии солнечного ветра, которые на данный момент признаны на глобальном уровне, включают спутники Dyson Harrop и Solar Wind Power.

Технология Dyson Harrop представляет собой мегаструктуру, охватывающую Солнце. Это самоподдерживающаяся система, использующая электроны, генерируемые Солнцем, для питания магнитного поля. Эта технология имеет способность выдерживать мощные удары солнечного ветра и теоретически может быть более экономичной, чем использование солнечных панелей, из-за большего запаса меди по сравнению с фотогальваническими панелями. По словам самого Харропа, эта система спутников солнечного ветра способна производить в 100 миллиардов раз больше энергии, чем требуется Земле каждый год. Однако, несмотря на идеальность этой системы, она является малореалистичной из-за колоссальных затрат на материалы. Например, предложения разобрать Меркурий для получения необходимых материалов звучат эксцентрично, но, если учесть, что для этого потребуется поверхность, примерно в 600 миллионов раз превышающая площадь Земли, эти идеи могут казаться более обоснованными. Тем не менее, получить финансирование для такого проекта крайне маловероятно, а технологические возможности человечества слишком ограничены для реализации этого плана⁴.

Более реалистичной идеей для спутников солнечного ветра является создание роя спутников, которые будут вращаться вокруг Земли. Такая схема потребует гораздо меньше материалов и технических усилий. Одной из главных проблем при использовании спутников солнечного ветра является передача энергии на Землю с такого большого расстояния⁵. Поскольку солнечный ветер требует гораздо более близкого расположения к Солнцу для эффективного сбора, рассеяние луча неизбежно на таких дистанциях. Расширение

4 NESDIS. Does Space Junk Fall from the Sky? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.nesdis.noaa.gov/news/does-space-junk-fall-the-sky#:~:text=On%20average%2C%20a%20total%20of (дата обращения: 22.02.2025).

5 New Space Economy. Advantages and Disadvantages of Space-Based Solar Power. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: newspaceeconomy.ca/2024/04/15/advantages-and-disadvantages-of-space-based-solar-power/ (дата обращения: 22.02.2025).

энергии из узкого луча в радиус, который может составлять тысячи километров, приводит к значительным потерям энергии. Чтобы сохранить собранную энергию, луч необходимо захватить и снова сфокусировать с помощью линзы диаметром в десятки километров – механизм, который человечество пока не способно создать. В настоящее время экологическое воздействие гипотетической модели Dyson Harrop неизвестно, поскольку многие ее свойства еще не изучены.

В отличие от этого, спутник Solar Wind Power использует кольцевой солнечный парус, ориентированный на Солнце. Эта модель, в отличие от Dyson Harrop, может быть построена с использованием уже доступных материалов, что делает ее более реальной и выполнимой технологией. Среди ее множества преимуществ – защита от разрушения солнечным ветром, почти 100% эффективность, лазерная передача энергии на удаленные спутники, космические станции или планетарные установки, а также использование сверххладильных металлов, которые менее подвержены старению или воздействиям, чем более хрупкие системы солнечных панелей. Однако, как и в случае с Dyson Harrop, на данный момент спутники Solar Wind Power не исследуются в достаточной степени, и они не производятся или не запускаются в космос, что затрудняет получение информации о возможном воздействии на окружающую среду.

5.2 Солнечные спутники

Несмотря на то, что солнечные спутниковые системы еще требуют значительных технологических разработок для их функционирования на крупномасштабном уровне, уже существуют планы по созданию совместимой и финансово эффективной космической солнечной энергетической системы. Основным преимуществом космической солнечной энергии является ее способность обеспечивать электроэнергию, когда наземные системы не могут этого сделать – ночью и при плохих погодных условиях.

Совместимая наземно-космическая солнечная система может включать спутники, создавая базовую структуру для поддержания наземных панелей, которые могут быть полностью поддержаны космическими панелями, способными производить энергию ночью, когда спрос на энергию снижается, и могут поддерживать наземные панели в моменты пикового спроса в течение дня. Однако для этого потребуется установить систему отслеживания на спутниках, хотя это можно избежать, если командовать спутникам произво-

дить энергию только в периоды пикового спроса. Энергия становится более дорогой, когда спрос на неё достигает пика, при этом цены на энергию могут возрастать в 2–4 раза, и продажа энергии, производимой упрощёнными спутниками в такие моменты, может быть более экономически эффективной. Такой компромисс означает, что спутники не будут жизнеспособной основной системой для наземных установок, однако это значительная экономия средств, которая должна быть учтена⁶. Наземные солнечные установки можно легко преобразовать в приёмные и интегрирующие солнечные установки, так как приёмник SPS работает почти так же, как солнечная панель, что позволит сэкономить на стоимости и площади. Краткосрочные энергетические рынки (спотовые рынки) могут стать местом, где солнечные спутники имеют преимущество – они должны быть способны быстро (в течение десятой доли секунды) переключаться на область с краткосрочным, но высоким спросом. Задачи такого рода очень прибыльны и могут сделать солнечные спутники более экономичными, но базовые технологии должны быть дополнительно развиты, чтобы обеспечить такую быструю трансляцию, что, возможно, сделает сам спутник дороже в производстве. Основное преимущество солнечных спутников, однако, заключается в их способности работать круглосуточно и в плохую погоду – также возможно полностью использовать это преимущество, сделав солнечные спутники базовой системой для наземных солнечных установок.

Экологическое воздействие солнечных спутников – это область, которая требует более глубокого изучения. Хотя солнечная энергия является чистой и практически бесконечной, есть моменты, которые стоит учитывать при анализе воздействия запуска спутников на окружающую среду. Известно, что запуск ракет влияет на местные экосистемы, выбрасывает вредные загрязнители в атмосферу и истощает озоновый слой. На данный момент «снижение глобального содержания озона в стратосфере составляет 0,01%, но достигает 0,15% в верхней стратосфере» – эта статистика может увеличиться с ростом рынка космических запусков, и следует быть осторожными при дальнейшем расширении этой отрасли. Были предложены «зелёные» системы ракетного двигателестроения (например, перекись водорода класса НТР, порошки алюминия и магния с водой,

⁶ Planetary Society. The Future of Solar Sailing. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.planetary.org/articles/the-future-of-solar-sailing#:~:text=The%20solar%20sail%20reentered%20Earth (дата обращения: 22.02.2025).

а также жидкое топливо на основе НАН), однако на сегодняшний день ограничения этих возможных «зелёных» ракетных топлив слишком велики: некоторые, такие как перекись водорода класса НТР, трудно производить в больших количествах, другие, например порошки алюминия и магния с водой, многообещающие, но недостаточно исследованные⁷. Электрическая тяга для малых спутников также многообещающая, но требует дальнейших разработок для надежной установки в крупных масштабах.

Основной вопрос экологического воздействия: будет ли чистая энергия, производимая солнечными спутниками, достаточно компенсировать воздействие их производства и запуска? Если чистые системы двигателей для этих спутников окажутся жизнеспособными для запуска, эта технология уже будет невероятно перспективной. Солнечные панели дешевы в производстве, и если для массового производства будет разработан легкий и простой солнечный спутник (что уже находится в процессе), то это обеспечит практически бесконечный источник чистой и бесплатной энергии. Расходы на запуск и производство могут быть компенсированы за счет обслуживания рынков в пиковые периоды, на рынках краткосрочной энергии или путем использования солнечных спутников в качестве базовой платформы для наземных солнечных панелей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данного исследования – предоставить всесторонний обзор, анализ и оценку жизнеспособности будущих энергетических технологий и их внедрения. Мы освещаем экономические, энергетические и экологические перспективы космической энергетики, включая солнечный ветер и спутники солнечной энергии, основываясь на предыдущих исследованиях и детальном анализе текущего и будущего состояния этих технологий.

Работа рассматривает потенциал космических энергетических установок, возможности их дальнейшего изучения, усовершенствования и масштабируемости с учетом текущих затрат на производство и запуск, а также их энергетической эффективности и экологического воздействия.

Ключевые аспекты, затронутые в данной статье, включают: технологии космической энер-

⁷ Planetary Society. The Planetary Society's LightSail 2 Mission Reenters Atmosphere... – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.planetary.org/press-releases/the-planetary-societys-lightsail-2-mission-reenters-atmosphere-completes-mission (дата обращения: 22.02.2025).

гетики, их эффективность, масштабируемость и возникающие перед ними вызовы. Также обсуждаются перспективы развития данной отрасли, а также политика и регулирование, которые необходимо разработать для того, чтобы индустрия космической энергетики развивалась в интересах как окружающей среды, так и общества.

Путем выявления ограничений, систематизации и анализа существующей информации о космических энергетических технологиях, результаты исследования вносят вклад в имеющиеся научные работы и подчеркивают необходимость дальнейших исследований в данной области.

References

1. *Bassetto, M. A Comprehensive Review of Electric Solar Wind Sail Concept and Its Applications // Progress in Aerospace Sciences.* –2022. – Vol. 128. – P. 100768.
2. *Dallas, J. The Environmental Impact of Emissions from Space Launches: A Comprehensive Review // Journal of Cleaner Production.* – 2020. – Vol. 255. – № 1. – P. 120209.
3. *Harrop Brooks, L., Schulze-Makuch, D. The Solar Wind Power Satellite as an Alternative to a Traditional Dyson Sphere and Its Implications for Remote Detection // International Journal of Astrobiology.* – 2010. – Vol. 9, № 2. – Pp. 89–99.
4. *Iyer, V. How Do You Clean up 170 Million Pieces of Space Junk? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: fas.org/publication/how-do-you-clean-up-170-million-pieces-of-space-junk/ (дата обращения: 09.11.2024).*
5. *Johnson, L. Status of Solar Sail Technology within NASA // Advances in Space Research.* – 2011. – Vol. 48, № 11. – Pp. 1687–1694.
6. *Kang, L. Enhancing Risk/Safety Management of HAN-Based Liquid Propellant as a Green Space Propulsion Fuel: A Study of Its Hazardous Characteristics // Process Safety and Environmental Protection.* – 2023. – Vol. 177. – Pp. 921–931.
7. *Landis, G. A. Reinventing the Solar Power Satellite.* – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ntrs.nasa.gov/citations/20040045153 (дата обращения: 25.11.2024).
8. *Miller, T., John, C. Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water // Journal of KONES Powertrain and Transport.* – 2016. – Vol. 23, № 1.
9. *Murphy, D. Metals from Spacecraft Reentry in Stratospheric Aerosol Particles // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* – 2023. – Vol. 120, № 43.

Информация об авторах

Гулиев И.А., кандидат экономических наук, заместитель директора Международного института энергетической политики и дипломатии Московского государственного института международных отношений МИД РФ (г. Москва, Российская Федерация).

Руснак А.В., студент Британской школы MCS (г. Москва, Российская Федерация).

Шарапова У.П., студент Школы Pine Crest (г. Москва, Российская Федерация).

© Гулиев И.А., Руснак А.В., Шарапова У.П., 2025.

Information about the authors

Guliyev I.A., Ph.D. in Economics, Deputy Director of the International Institute of Energy Policy and Diplomacy of the Moscow State Institute of International Relations of the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation).

Rusnak A.V., student at the British MCS School (Moscow, Russian Federation).

Sharapova U.P., student at Pine Crest School (Moscow, Russian Federation).

© Guliyev I.A., Rusnak A.V., Sharapova U.P., 2025.