

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

# Работы Института космических исследований Японии в области космической энергетики

М. Нагато, С. Сасаки, Й. Наруо, В.А. Ванке

*Достаточно очевидно, что проблемы экологически чистой энергетики относятся к числу первоочередных глобальных проблем, возникающих перед Человечеством. Не менее очевидно, что поиск путей решения этих проблем должен вестись сегодня по различным направлениям, основанным на различных физических идеях и принципах.*

PACS numbers: 95.40.+s

## Содержание

1. Введение (631).
  2. Научно-исследовательская программа DOE/NASA (632).
  3. Ранний этап работ Японии в области СКЭС (633).
  4. Проект СКЭС 2000 (SPS 2000) Института космических исследований Японии (635).
  5. Эксперименты MINIX и ISY-METS (637).
  6. Обсуждение (640).
- Список литературы (641).

## 1. Введение

Солнечная энергетика давно привлекает внимание специалистов прежде всего своей экологической чистотой и практически неистощимым (возобновляемым) характером энергии Солнца. В наземных условиях ее крупномасштабное применение затруднено, однако, изменчивым характером (суточные колебания интенсивности, влияние метеорологических условий) и низкой средней плотностью на поверхности Земли.

В данном обзоре мы хотели бы концептуально и кратко дать характеристику работ в области солнечной

космической энергетики с момента обсуждения этих идей на страницах "УФН" [1], выделив оригинальный вклад Института космических исследований Японии (The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) of Japan) в разработку этих фундаментальных проблем. Прежде всего напомним читателю суть идеи Солнечной космической электростанции (СКЭС<sup>1</sup>), предложенной в 1968 г. П.Е. Глазером [2] (рис. 1).

Крупные панели солнечных батарей размещаются на геостационарной орбите, т.е. на круговой орбите, расположенной в экваториальной плоскости и на расстоянии примерно 36 000 км от поверхности Земли. Угловая скорость вращения спутника на этой орбите равна угловой скорости вращения Земли, и, следовательно, он будет неподвижен относительно ее поверхности. Поток солнечной радиации на геостационарной орбите довольно интенсивен ( $1,4 \text{ кВт м}^{-2}$ ), а за счет естественного наклона экваториальной плоскости к плоскости эклиптики ( $23^\circ, 5'$ ) спутник будет практически непрерывно освещен потоком солнечной радиации (рис. 2) за исключением довольно кратковременных промежутков времени вблизи дней весеннего и осеннего равноденствия, когда этот спутник попадает в тень Земли. Эти проме-

**Макото Нагато, Сусуми Сасаки, Йошихиро Наруо.** SPS Working Group, Space Power Systems Section, Research Division for Space Applications, The Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara 229, Japan  
Тел. + 81 427 51 39 80. Факс + 81 427 59 42 39  
E-mail: e 34939@tansei.cc.u-tokyo.ac.jp  
E-mail: sasaki@isasmac1.newslan.isas.ac.jp  
**В.А. Ванке.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, 119899, Москва, Ленинские горы  
Тел. (095) 939-40-88  
Факс + 7 (095) 292-65-11  
E-mail: vanke@mesps.phys.msu.ru

Статья поступила 17 января 1994 г.

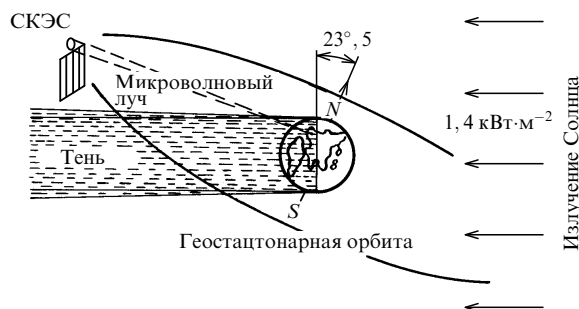


Рис. 1. СКЭС на геостационарной орбите

<sup>1</sup> В зарубежной литературе обычно используется аббревиатура SPS (Solar Power Satellite или Solar Power System).

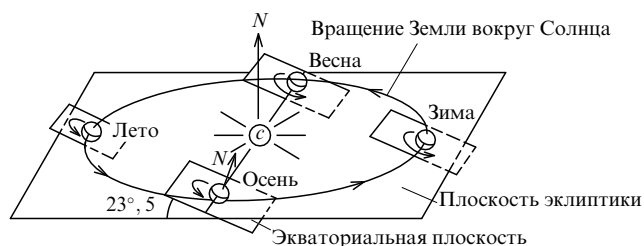


Рис. 2. Положения экваториальной плоскости Земли (плоскости орбиты СКЭС) по отношению к Солнцу и к плоскости эклиптики в различные времена года

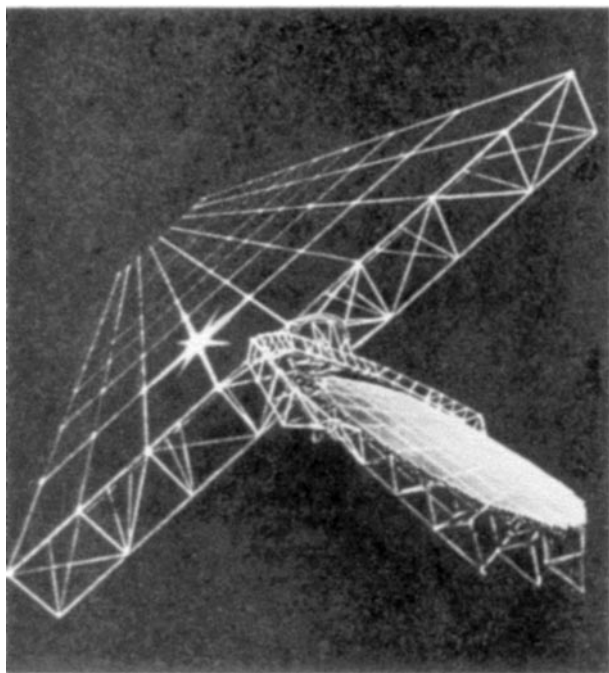


Рис. 3. Базовый вариант СКЭС научно-исследовательской программы DOE/NASA

жутки времени занимают в сумме не более 1% общей продолжительности года и могут точно предсказываться. Энергия, вырабатываемая солнечными батареями, преобразуется далее в микроволновую энергию и передается на поверхность Земли хорошо сфокусированным электромагнитным пучком на частоте 2,45 ГГц, который имеет очень низкие потери в атмосфере (менее 1%) даже при довольно интенсивных осадках (более 150 мм ч<sup>-1</sup>).

На поверхности Земли микроволновая энергия преобразуется специальной приемной системой в энергию постоянного или переменного тока технической частоты и раздается потребителям.

## 2. Научно-исследовательская программа DOE/NASA<sup>2</sup>

В 1977–1980 гг. в США была осуществлена специальная научно-исследовательская программа, направленная на определение перспектив СКЭС [3–13]. В рамках этой программы анализировалась возможность создания

60 СКЭС, мощностью 5 ГВт каждая, с темпом создания 2 СКЭС в год начиная с 2000 г. Программа курировалась Министерством энергетики США (DOE) и Национальным управлением по аэронавтике и исследованиям в области космического пространства (NASA).

Предшествующие этапы исследований [1, 2] позволили выбрать некоторый "базовый"<sup>3</sup> вариант СКЭС (рис. 3). Важно отметить здесь, что этот базовый вариант СКЭС не претендовал на единственность или строгую оптимальность технических решений, но за счет относительной конструктивной простоты должен был позволить проанализировать систему достаточно всесторонне и полно.

Анализировались две разновидности базового варианта с Si-солнечными батареями и с батареями на основе соединения GaAlAs. В последнем случае использованы простейшие плоские концентраторы со степенью концентрации равной 2. КПД солнечных батарей был выбран на уровне 12%, а результирующая эффективность микроволнового тракта передачи энергии — 56%.

Панели солнечных батарей все время перпендикулярны потоку солнечного излучения. Микроволновая антенна представляет собой обратно переизлучающую адаптивную антенную решетку, имеет вращающееся сочленение типа карданного подвеса и постоянно ориентирована на наземную приемную систему. Точная ориентация луча осуществляется за счет пилот-сигнала, излучаемого из центра наземной приемной системы и анализируемого на поверхности передающей антенны системой специальных датчиков. В качестве генераторов в передающей антенной решетке использованы клистроны, а в наземной приемно-преобразующей системе (rectenna<sup>4</sup>) — диполи над отражающей плоскостью, независимо нагруженные на полупроводниковые диоды с барьером Шоттки [1, 4].

Транспортировка осуществляется сначала на низкую орбиту с помощью специально созданных ракетно-транспортных средств с грузоподъемностью 400–500 т. Затем, используя электрореактивные двигатели, накопленные на низкой орбите заготовки и материалы буксируются на геостационарную орбиту, где специальные автоматы производят изготовление основных узлов и сборку конструкции СКЭС с минимальным уровнем ручного труда космонавтов.

К работам были привлечены 7 федеральных правительственных агентств, 4 лаборатории Министерства энергетики США, 15 университетов, 35 частных компаний и Национальная Академия наук США [10].

Краткая характеристика основных параметров СКЭС научно-исследовательской программы DOE/NASA приведена в табл. I.

Несмотря на внушительность многих цифр в табл. I, большинство аэрокосмических организаций и фирм, участвовавших в этой научно-исследовательской программе, подтвердило реальность создания такой принципиально новой энергосистемы уже через 20 лет с момента начала работ, если финансовая поддержка будет достаточной.

<sup>2</sup> Раздел написан с целью сохранить преемственность с предшествующей публикацией в "УФН" [1], посвященной проблемам СКЭС.

<sup>3</sup> В оригинале использован термин Reference system (of DOE/NASA SPS Concept Development and Evaluation Program).

<sup>4</sup> Rectenna (ректенна) от слов rectify и antenna (выпрямляющая антенна). См., например, [1, 6, 7, 30].

Таблица I. СКЭС в программе DOE/NASA

Общее число СКЭС	60
Мощность единичной СКЭС, ГВт	5
Размер панели солнечных батарей, км <sup>2</sup>	5 × 10
Диаметр передающей антенны, км	1
Масса единичной СКЭС, тыс. тонн	30–50
Размеры наземной приемной системы для широты местности 35°, км × км	10 × 13
Плотность мощности излучения в центре передающей антенны, кВт м <sup>-2</sup>	30
Плотность микроволновой мощности в центре наземной приемной системы, Вт м <sup>-2</sup>	230
Капитальные затраты на 20-летний подготовительный период, включая запуск первой СКЭС, млрд. долл.	110–120*
Стоимость каждой последующей СКЭС, млрд. долл.	11–12
Ресурс работы каждой СКЭС не менее, лет	30
Время окупаемости каждой СКЭС не более, лет	6

\* Или 25 млрд. долл. без стоимости разработки и создания специальных транспортных средств

Причем важно, что система просматривалась здесь полностью и не потребовалось бы новых фундаментальных знаний для ее реализации. В свою очередь новые достижения науки и технологии могли бы только улучшить технико-экономические показатели СКЭС.

К оценке результатов этих работ были привлечены Отдел технических экспертиз Конгресса США [11] и специально сформированный Экспертный совет<sup>5</sup> Национальной Академии наук США [12]. Первый из них предложил несколько уровней финансирования для продолжения исследований. Второй, подчеркнув перспективность СКЭС, как энергосистемы будущего, счел экономические оценки DOE/NASA заниженными в 2–2,5 раза и не рекомендовал специально финансировать эти исследования в ближайшие десятилетия, считая, что многие технические и технологические проблемы могут быть решены в результате выполнения других космических программ.

Важно отметить здесь, что уровень расхождения в экономических оценках в 2–2,5 раза находится, скорее всего, в пределах ошибки, если учесть, что речь шла об экономическом прогнозе на два десятилетия вперед и к тому же в такой бурно развивающейся области, как космическая наука и технология. Кроме того, в процессе экспертных оценок был, по существу, проигнорирован результат исследований одной из крупнейших аэрокосмических фирм — "Rockwell Int.", предложившей примерно в это же время иной вариант конструкции СКЭС, позволявший вдвое снизить капитальные затраты на ее создание [13].

Хотя этот документ [12] был подвергнут резкой и разносторонней критике, мы обращаем внимание на него, поскольку именно он, внешне неотрицательный, привел к сокращению, а затем и к прекращению государственного финансирования работ по линии СКЭС в США. А это в свою очередь привело практически к свертыванию работ и в ряде других стран.

Мы еще вернемся в заключительном разделе к осуждению проблем экономических экспертных оценок СКЭС, а пока подчеркнем лишь возросший за последние

5–8 лет интерес к этой новой и экологически чистой энергетической системе более чем в 20 странах мира [14, 15]. Международную координацию осуществляет Комитет по энергетике Международной Астронавтической федерации (International Astronautical Federation Power Committee), образованный в 1983 г.

### 3. Ранний этап работ Японии в области СКЭС

Появление идеи СКЭС в 1968 г. совпало по времени с образованием в Японии основных административных структур в области космической науки и технологии. В 1968 г. образована Комиссия по работам в области космоса (Space Activities Commission — SAC) при премьер-министре, а в 1969 г. создано Национальное агентство по развитию космических исследований (National Space Development Agency — NASDA) — квазиправительственная организация, находящаяся под контролем Агентства науки и технологии (Science and Technology Agency — STA) и имеющая свой собственный персонал, а также космические центры в Танегашима (Tanegashima) и Тсукубе (Tsukuba). Министерство международной торговли и индустрии (Ministry of International Trade and Industry — MITI) Японии вносит существенный вклад в развитие космических исследований.

В 1968 г. Токийский университет (University of Tokyo) готовился к запуску первого японского искусственного спутника, который был успешно осуществлен два года спустя. В связи с этим научно-техническая общественность была слишком занята, чтобы заметить появление идеи СКЭС.

Несколько позже предложение развивать технологию СКЭС было сделано MITI, которое также ответственно и за национальную политику в области энергетики.

В 1981 г. Институт космических исследований (ISAS) вышел из состава Токийского университета и приобрел самостоятельный статус в рамках Министерства образования, науки и культуры (Ministry of Education, Science and Culture — MOE) Японии, которое ответственно, в частности, за фундаментальные исследования и осуществляет их на базе университетов и собственных научно-исследовательских институтов. Одновременно с реорганизацией ISAS<sup>6</sup> была образована в нем специальная Секция космических энергосистем (Space Power Systems Section), и приступил к работе ежегодный Симпозиум по космической энергетике [17].

Разработка концепции базового варианта СКЭС DOE/NASA привлекла внимание научно-технической общественности Японии. Во многих отношениях идея "Энергия из космоса" была существенно более привлекательной для Японии, чем полет американцев на Луну.

Второй симпозиум по космической энергетике ISAS (1982 г.) сформулировал отношение Японии к результатам работ DOE/NASA по линии СКЭС, отметив, в частности:

СКЭС будет одним из решений проблемы непрерывно возрастающего потребления энергии и ограниченных природных ресурсов Японии. Однако многие проблемы должны быть преодолены, прежде чем СКЭС

<sup>5</sup> С составом этого совета читатель может познакомиться в [10].

<sup>6</sup> В 1992 финансовом году бюджет ISAS составил примерно 200 млн. долл., бюджет NASDA — около 1,7 млрд. долл.

сможет быть подключена к японской энергетической системе.

Полагают, что СКЭС будет дорогой энергосистемой, поскольку высока стоимость космической транспортировки. Это не будет соответствовать действительности, поскольку технология сможет решить эту проблему. Однако стоимость земли для ректенны (приемной системы) будет тем критическим фактором, который определит стоимость, вырабатываемой СКЭС энергии.

По этой причине исследования были начаты с проблем построения наземных приемных систем, ориентируясь на базовый вариант СКЭС DOE/NASA. Было предложено располагать ректенные системы вне суши — в пределах прибрежной 200-мильной экономической зоны вокруг Японии. Нужно было создать конструкции, устойчивые к землетрясениям, штормовым и ветровым нагрузкам. Удачное решение было найдено в виде плавающих конструкций [18], поблочно изготавливаемых и собираемых на специальных судах.

Параллельно одна группа, руководимая Адачи, прорабатывала вопросы формирования и оптимизации электромагнитного пучка СКЭС с точки зрения КПД передачи энергии и подавления боковых лепестков излучения [19]. Другая группа, возглавляемая Ито, изучала вопросы применения круглых микрополосковых антенн<sup>7</sup> в приемной системе с целью подавления процессов переизлучения высших гармоник, которые могли приводить к серьезным помехам для систем навигации и связи [20].

Свой собственный вариант прототипа СКЭС было решено выбрать существенно меньшего уровня мощно-

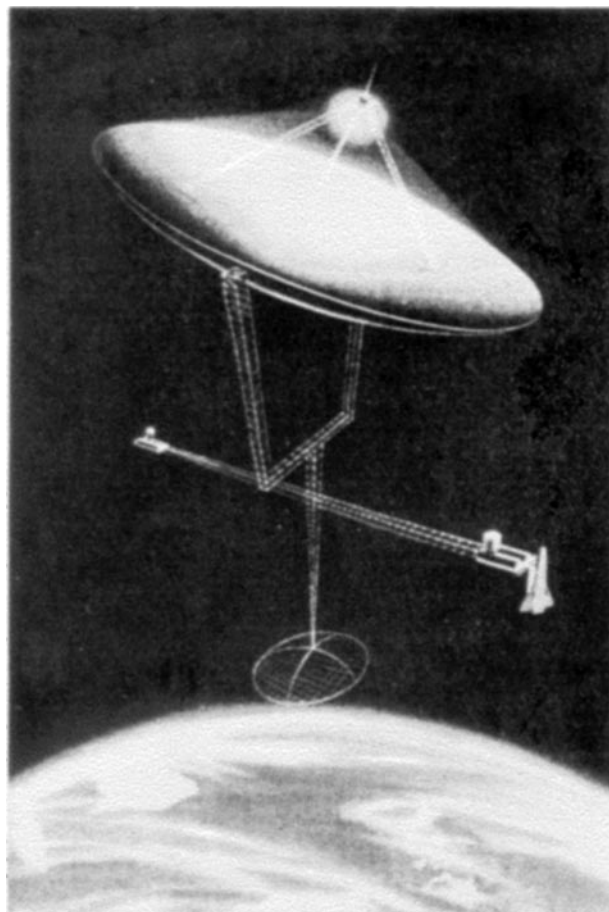


Рис. 5. Вариант СКЭС, использующий концентратор солнечной энергии, ее преобразование в тепловую с последующим накоплением и рассчитанный на уровень мощности 70 МВт (ISAS)

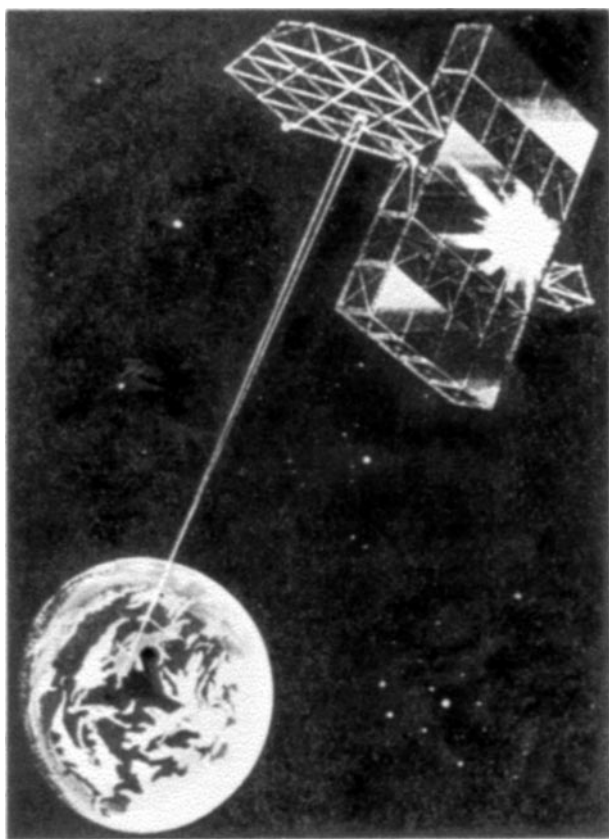


Рис. 4. Вариант СКЭС, использующий солнечные батареи и рассчитанный на уровень мощности 10 МВт (ISAS)

сти, обладающего облегченной конструкцией, и в виде, допускающим его реализацию уже в ближайшем будущем, например к 2000 г. (СКЭС 2000). Причем этот прототип должен разрабатываться не как космический аппарат, основанный обычно на дорогих технологиях, а скорее в виде космического сегмента наземной энергоструктуры. Задача прототипа СКЭС должна быть сравнительно проста — поставлять электрическую энергию с приемлемой стоимостью.

Только два варианта прототипа СКЭС имели техническую презентацию в Японии. Один из них — СКЭС с уровнем мощности 10 МВт (рис. 4) — был в 1983 г. взят за основу Комитетом по космической технологии Японской машиностроительной федерации для иллюстрации перспектив космических программ [21, 22]. Вторым — СКЭС с накоплением энергии и периодическим сбросом ее на Землю (рис. 5) — изучался ISAS и фирмой "Toshiba". Первый из них использовал фотоэлектрические батареи для преобразования энергии и был, по существу, малой копией базового варианта DOE/NASA, второй содержал концентратор солнечной энергии, накопитель тепловой

<sup>7</sup> Круглые антенны, в отличие от линейных, обладают собственными резонансами, расположенными не на кратных частотах. Это позволяет использовать эти антенны для подавления излучения второй и более высокого порядка гармоник генератора или гармоник, возникающих на нелинейности диода с барьером Шоттки при выпрямлении микроволновой мощности (ректенна). См. также рис. 12, б и 13.

энергии, имел термодинамический способ преобразования ее и был рассчитан на уровень мощности 70 МВт [23].

#### 4. Проект СКЭС 2000 (SPS 2000) Института космических исследований Японии

Сегодня Рабочая группа СКЭС<sup>8</sup> в Японии делится на тринадцать исследовательских подгрупп, специализирующихся в различных областях. Девять из них исследуют различные подсистемы СКЭС, остальные четыре изучают влияние на окружающую среду. Кратко тематику этих подгрупп можно сформулировать следующим образом.

*Изучение подсистем и технологий:*

- Микроволновое излучение мощности.
- Прием и обратное преобразование мощности микроволнового пучка.
- Большие конструкции в космосе.
- Технология мощных лазеров.
- Солнечные батареи.
- Термодинамические мощные генераторы.
- Двигатели.
- Космические роботы.

*Изучение влияния на окружающую среду:*

- Влияние космических аппаратов.
- Космическая электромагнитная обстановка.
- Системы связи.
- Биология и экология.

Анализ вариантов СКЭС, изображенных на рис. 4 и 5, показал, однако, что они слишком велики, чтобы обойтись без разработки специальных транспортных средств и использования слишком высокого уровня технологии создания больших космических конструкций.

Для упрощения системы было решено, что прототип СКЭС не должен содержать накопитель энергии, а принцип стабилизации рациональнее сделать гравитационным. Кроме того, было показано, что вращающееся сочленение между панелями солнечных батарей и микроволновой антенной является достаточно сложным узлом и, в принципе, не обязательно для облегченного варианта прототипа СКЭС, если его работу основывать на использовании солнечных батарей.

Поскольку даже небольшая СКЭС потребует многократных запусков ракетно-транспортного средства, весьма желательно, чтобы отдельный модуль, создаваемый после каждого запуска, уже мог обладать основными чертами СКЭС, позволяя, тем самым, сразу приступить к экспериментальному исследованию системы. Накапливание таких модулей в процессе последующих запусков позволит достраивать систему до заданного уровня. Это очень важная, хотя и достаточно общая, далеко не простая задача.

Так постепенно создавалась идеология того прототипа СКЭС, который получил название СКЭС 2000 (SPS 2000) и сегодня находится в процессе разработки (рис. 6, 7), однако предварительные итоги уже подведены [24, 25]. Конструкция его представляет собой треугольную ферму, две плоскости которой содержат солнечные батареи, а на нижней, обращенной к поверхности Земли, закреплена неподвижно относительно основного корпуса микроволновая излучающая антенна (рис. 6, а) [25–28].

<sup>8</sup> The ISAS SPS Working Group.

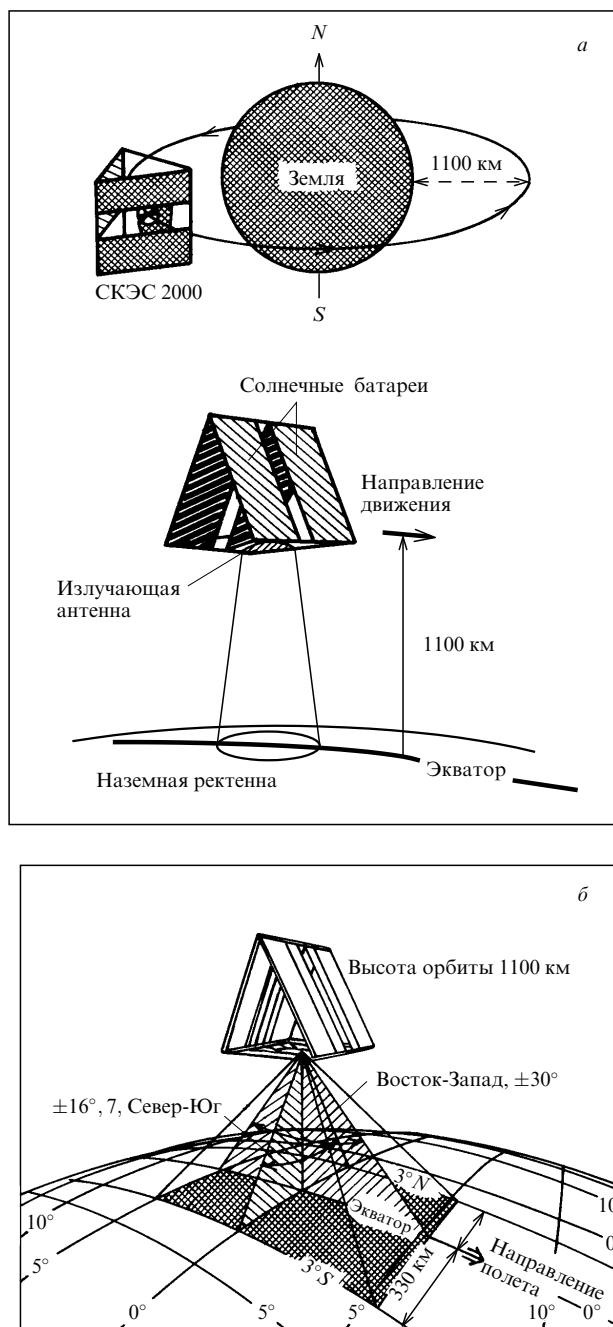


Рис. 6. а — Общая схема СКЭС 2000. б — Область сканирования микроволнового пучка СКЭС 2000

СКЭС 2000 будет иметь круговую орбиту в экваториальной плоскости Земли на высоте 1100 км от ее поверхности, а ось СКЭС ориентирована перпендикулярно направлению ее движения. Поскольку орбита расположена в экваториальной плоскости, энергоспутник проходит каждый оборот над одними и теми же точками Земной поверхности, тем самым создаются удобные условия для использования одной или нескольких ректенн (приемных наземных систем). Высота орбиты выбрана как некоторый компромисс между целым рядом требований (включая стоимость доставки, время работы с наземной ректенной, аэродинамическое торможение, степень деградации солнечных батарей и др.).

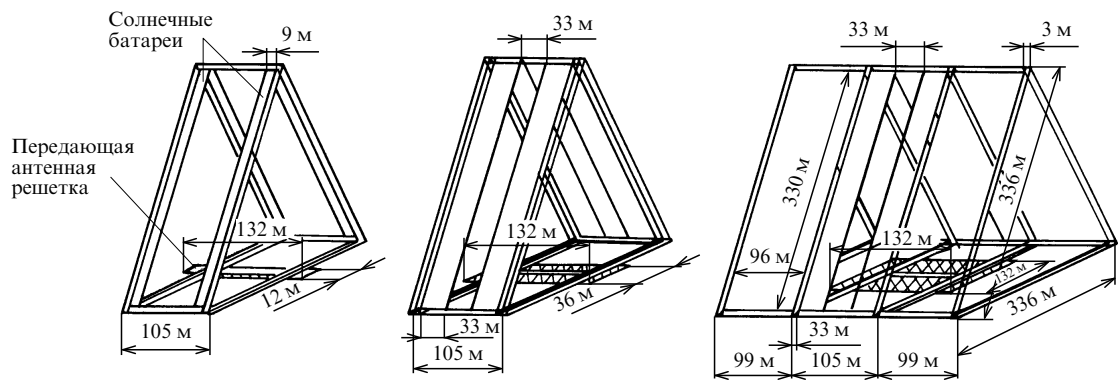


Рис. 7. Общая схема сборки СКЭС 2000. В результате двух первых запусков ракетносителя доставки создается модуль (левый рисунок), обладающий всеми основными чертами СКЭС 2000 и способный излучать 0,7 МВт микроволновой мощности. После 5 запусков (средний рисунок) система наращивается до уровня мощности 2,56 МВт. 16 запусков достаточны для создания полноразмерной (правый рисунок) СКЭС 2000 с излучаемой микроволновой мощностью 10 МВт

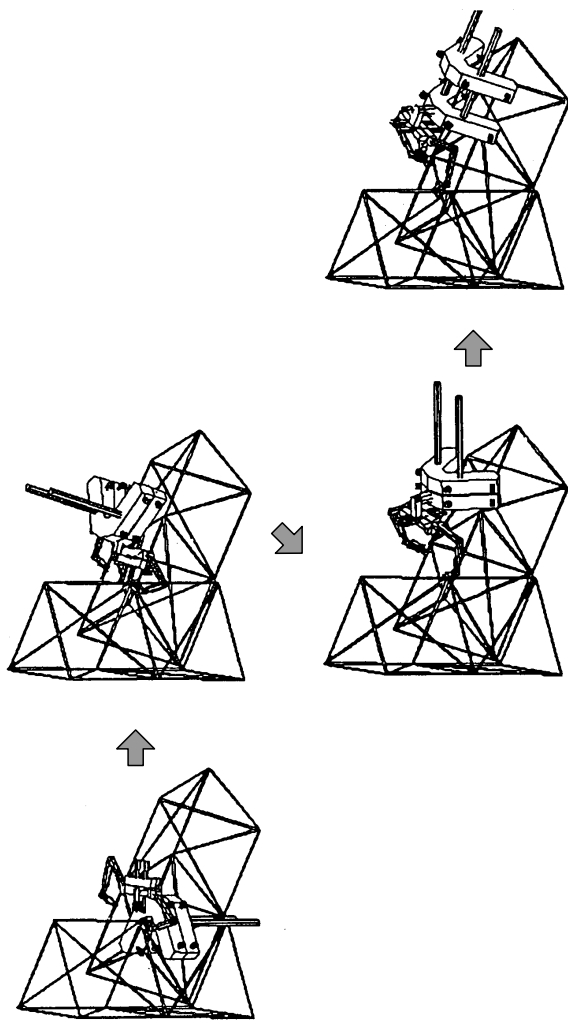


Рис. 8. Вариант робота, осуществляющего сборку ферм опорной конструкции СКЭС 2000

В интервале углов  $\pm 30^\circ$  (направление Восток — Запад) и  $\pm 16^\circ, 7'$  (направление Юг — Север) данная конструкция передающей антенны позволяет сканировать микроволновой луч (рис. 6, б) с тем, чтобы он попадал на приемную систему.

Одна из наиболее сложных задач — сборка конструкции СКЭС на орбите с помощью роботов. Рис. 8 иллюстрирует один из вариантов робота, осуществляющего сборку ферм опорной конструкции СКЭС 2000.

Максимальная плотность мощности на передающей антенне в данном случае сравнительно невелика ( $500\text{--}600\text{ Вт м}^{-2}$ ), и СКЭС 2000 сможет использовать полностью полупроводниковую технологию — излучающие элементы антенной решетки имеют простую конструкцию: в виде прямоугольного резонатора с щелью, связанного с усилителем микроволновой мощности на полевых транзисторах (с КПД порядка 65%, выходной мощностью около 4 Вт и питающим напряжением 15 В).

Наземная приемная система базируется на использовании круглых микрополосковых приемных антенн, нагруженных на диоды с барьером Шоттки. Даже в центре приемной наземной системы плотность микроволновой мощности ниже американского стандарта на безопасный уровень длительного микроволнового облучения ( $10\text{ мВт см}^{-2}$ ), а на сравнительно небольшом расстоянии от края ректенны выполняется и самый жесткий в мире Российский стандарт ( $10\text{ мкВт см}^{-2}$ ). Таким образом, СКЭС 2000 — экологически чистая система. Основные параметры СКЭС 2000 [25–27] приведены в табл. II.

Таблица II. СКЭС 2000

Предполагаемый год создания	2000 г.
Время функционирования, лет	10
Излучаемая мощность, МВт	10
Тип солнечных батарей	a-Si
КПД солнечных батарей, %	15
Удельная мощность солнечных батарей, кВт кг <sup>-1</sup>	0,95
Размер передающей антенны, м×м	132×132
Диаметр наземной приемной системы, км	1
Рабочая частота, ГГц	2,45
Способ сборки	Роботы
Общая масса, тонн, в том числе: солнечные батареи	223,6
передающая антенна	37,5
Подходящие средства доставки	134,4
Число пусков ракетносителя для создания СКЭС 2000	"Ариан-5", "Протон"
	16

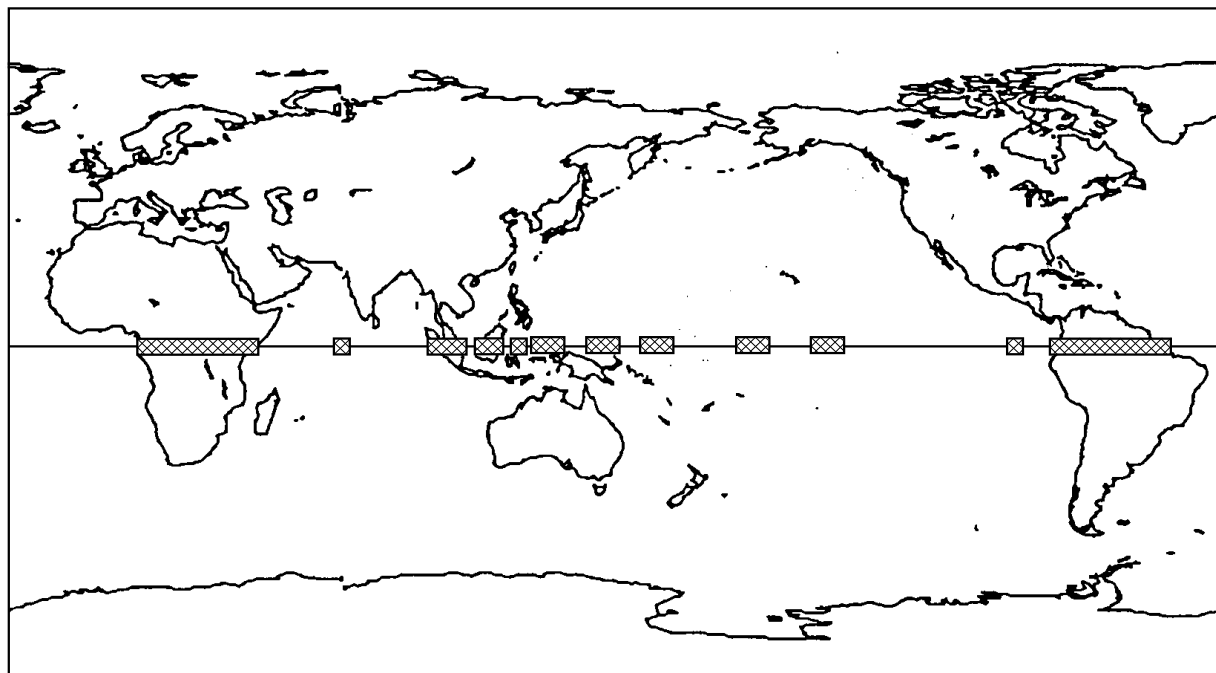


Рис. 9. Подходящие места расположения приемных систем для СКЭС 2000

СКЭС 2000 — импульсная система: время работы с ректенной (время пролета интервала углов  $\pm 30^\circ$  по отношению к нормали) порядка 200 с, т.е. немногим более 3 мин за один оборот. Причем все это только в дневное время, когда освещены и работают солнечные батареи. Однако главная задача СКЭС 2000 — проверить основные идеи и принципы, положенные в основу полномасштабных СКЭС, продемонстрировать жизнеспособность такой энергосистемы и одновременно накопить технологический опыт, необходимый для создания коммерческих систем.

Тем не менее дальнейшее развитие может идти здесь и в количественном отношении — серия энергоспутников типа СКЭС 2000, последовательно расположенных на той же орбите, существенно увеличит эффективность наземных приемных систем, которые могут быть расположены вдоль экватора (рис. 9) и поставлять энергию развивающимся странам [28].

Запланированный на 1995 год запуск независимого космического модуля (Space Flight Unit — SFU), осуществляемый совместно ISAS, MITI и STA, позволит провести ряд экспериментов, имеющих непосредственное отношение к СКЭС 2000 (диагностика космической плазмы, разворачивание двумерных конструкций в космосе, высоковольтные солнечные батареи и др.).

Эксперимент Microwave Garden, осуществляемый в настоящее время на территории ISAS, также имеет непосредственное отношение к проекту СКЭС 2000. Два однотипных участка, площадью  $15 \text{ м}^2$  каждый, содержат одинаковые биологические объекты. Один облучается микроволновой мощностью с плотностью  $10 \text{ мВт см}^{-2}$ , другой участок служит контрольным. Пока не зарегистрировано какого-либо заметного эффекта, связанного с присутствием микроволнового облучения с таким уровнем плотности мощности.

## 5. Эксперименты MINIX и ISY-METS

*"... Электротехника, прежде чем прийти на службу энергетике, занималась в прошлом веке исключительно вопросами электросвязи (телеграф, сигнализация и пр.). Вполне вероятно, что история повторится: сегодня электроника используется преимущественно для радиосвязи, но ее будущее лежит в решении крупнейших проблем энергетики".*

П.Л. Капица

(лауреат Нобелевской премии; сентябрь 1962 г. [29]).

Микроволновый тракт передачи энергии является важнейшим звеном СКЭС. Его отработка в наземных условиях ведется уже сравнительно давно и весьма результативно (см., например, [1, 30, 31]).

Однако микроволновый пучок СКЭС будет проходить через ионосферную плазму. Интенсивность микроволнового пучка СКЭС примерно на 11–12 порядков превышает интенсивность электромагнитных пучков, используемых в обычных каналах космической связи. Теоретически были предсказаны нелинейные эффекты при прохождении мощного пучка СКЭС сквозь ионосферную плазму [32–34].

Первый эксперимент, получивший аббревиатуру MINIX (Microwave Ionosphere Nonlinear Interaction eXperiment), был предложен Кайа и Матсумото и осуществлен в 1983 г. Эксперимент проводился с помощью одноступенчатой зондирующей ракеты, содержащей отделяемую носовую часть (рис. 10). Ракета достигала высоты 250 км и имела полезную нагрузку 150 кг. Два магнетронных генератора с рупорными антеннами, ориентированными вдоль и поперек направления

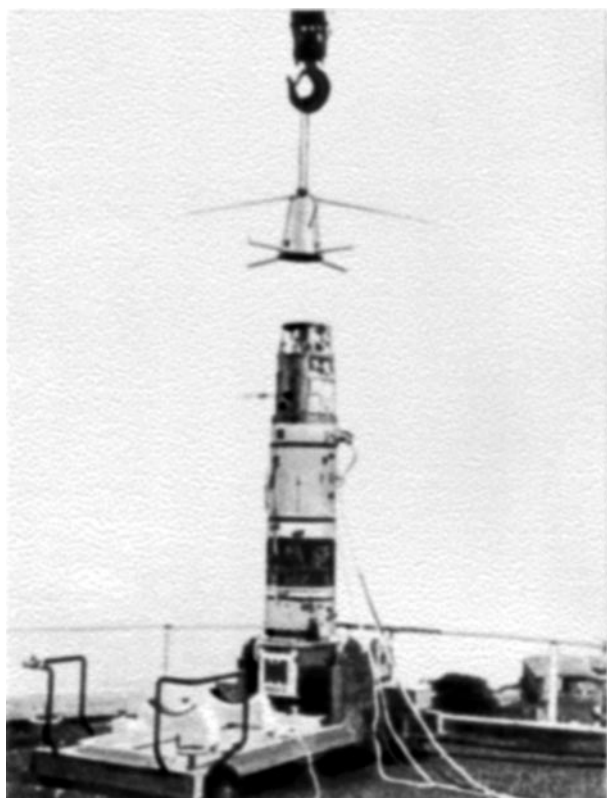


Рис. 10. Предполетные испытания зондирующей ракеты S-520-6. Имитируется отделение носовой части, содержащей приемную (микроволновую и низкочастотную) аппаратуру

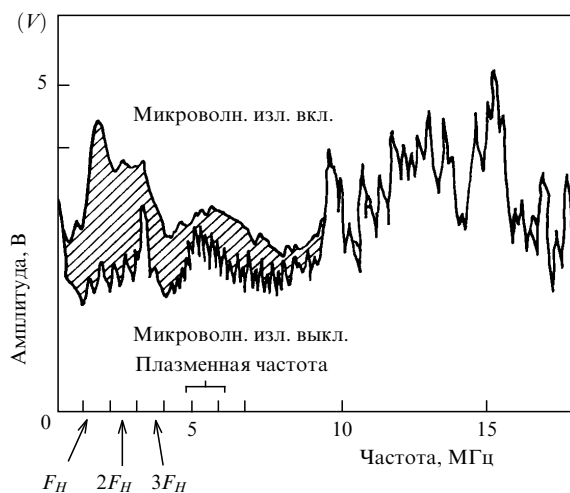


Рис. 11. Динамический спектр плазменных волн, наблюдавшихся в эксперименте MINIX ( $F_H$  — локальное значение электронной циклотронной частоты)

движения и установленные на основной ракете, излучали непрерывно 800 Вт мощности на частоте 2,45 ГГц. Отделяемая часть содержала измерительную аппаратуру в нескольких диапазонах длин волн.

Эксперимент содержал три фазы. Первая из них проводилась на высотах 85–100 км и была направлена на изучение теплового нагрева ионосферы. Во время этой фазы отделяемая часть была соединена с основной. Вторая фаза была подобна первой, но генераторы микроволнового излучения работали в импульсном режиме: 5 с

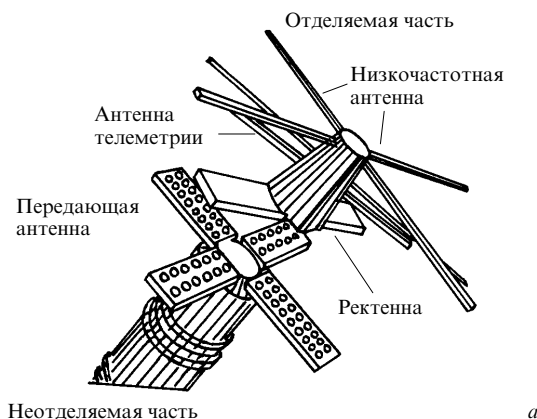


Рис. 12. а — Общая схема расположения функциональных узлов эксперимента ISY-METS. б — Панели излучающей микроволновой фазированной антенной решетки, использующей круглые полосковые излучающие элементы

работа и 5 с пауза. Третья фаза начиналась с полного отделения носовой (измерительной) части ракеты. При этой фазе была достигнута максимальная высота. Экспериментальная система проходила область с максимальной электронной плотностью, где ожидалось возбуждение различных волн.

Результаты эксперимента могут быть кратко суммированы следующим образом: эффект теплового нагрева не был зарегистрирован; наблюдалось заметное возбуждение волн вблизи частот с 1,5-кратным значением локальной электронной циклотронной частоты (рис. 11). Наконец, наземная приемная система фиксировала излучаемые микроволны, но не зарегистрировала рассеянных волн [16, 35–38].

В феврале 1993 г. был осуществлен второй эксперимент по передаче энергии в космосе [39], получивший аббревиатуру ISY-METS (International Space Year Microwave Energy Transmission in Space). Этот эксперимент был предложен Рабочей группой СКЭС в 1991 г. и по общему целевому назначению был близок к первому. Однако эксперимент проводился уже на существенно улучшенной материально технической основе. Впервые активная фазированная решетка использовалась для передачи энергии в космосе и была выполнена в виде четырех прямоугольных взаимно перпендикулярных раскрывающихся панелей (рис. 12, а). Каждая из них содержала по 16 круглых полосковых излучателей (рис. 12, б), питаемых от микроволновых усилителей на полевых транзисторах с высокой эффективностью и выходной мощностью 13 Вт. Для управления формой распределения амплитуды и фазы на передающей антенной решетке использовался компьютер. Приемная микро-

волновая система состояла из двух частей. Одна из них имела дисковую микрополосковую конструкцию и была разработана Научно-исследовательской лабораторией систем связи (Communication Research Laboratory — CRL), другая — Техасским университетом (Texas A&M University) и использовала взаимно перпендикулярные линейные диполи также с использованием полосковой конструкции (рис. 13). Отделяемая часть имела, кроме того, несколько типов антенн для регистрации плазменных волн в низкочастотном диапазоне.

Эксперимент содержал две фазы (рис. 14). Все антенны для наблюдения плазменных волн и микроволновая приемная антенна были раскрыты через 55 с после старта. Микроволновая излучающая антенна развернута через 2 с после этого. Во время первой фазы эксперимента разделение измерительной носовой части и основного ракетносителя не проводилось. На этом этапе регистрировались плазменные волны и нестабильности ионосферы.

Направление излучения микроволновой антенной решетки могло меняться в процессе эксперимента. Для расширения возможностей были выбраны четыре основных направления излучения: вдоль оси ракеты, под углом  $30^\circ$  к нему, вдоль направления локального геомагнитного поля и перпендикулярно к нему.

Микроволновое излучение (примерно 800 Вт) было включено через 65 с после старта и являлось периодическим: 7 с — излучение, 3 с — пауза.

Пример динамического спектра плазменных волн показан на рис. 15. Левый рисунок — спектр при наличии микроволнового излучения, центральный — при его отсутствии, на правом рисунке приведен разностный спектр, отчетливо иллюстрирующий возбуждение плазменных волн вблизи локальной плазменной частоты под действием мощного микроволнового излучения. Вместе с тем, циклотронный спектр колебаний, наблюдавшийся в более раннем эксперименте MINIX (см. рис. 11), здесь не зафиксирован. Передающая антенна MINIX была рупорной, в ее апертуре локальная плотность микроволновой мощности достигала  $15 \text{ Вт см}^{-2}$ , в то время как в эксперименте ISY-METS максимальная плотность мощности в 150 раз ниже ( $0,1 \text{ Вт см}^{-2}$ ), что, по-видимому, было недостаточным для возбуждения заметного уровня циклотронных колебаний.

Отделение носовой части для осуществления второй фазы эксперимента началось через 222 с после старта. Измеренное значение относительной скорости между ними оказалось равным  $8,6 \text{ см с}^{-1}$ . Передача микроволновой энергии проходила без-

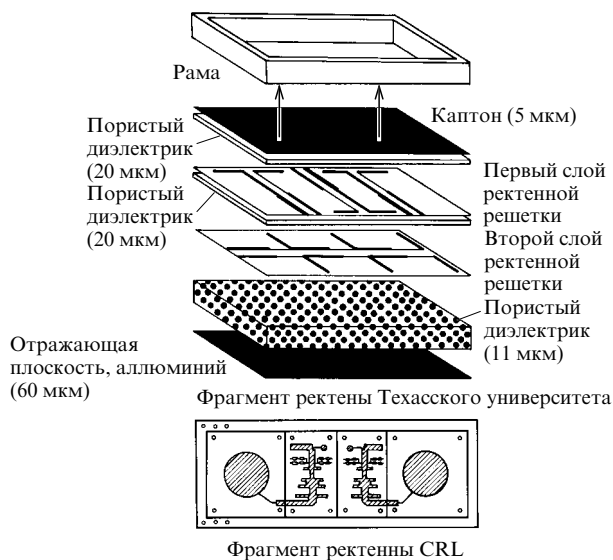


Рис. 13. Два варианта ректенн, использованных в эксперименте ISY-METS: фрагмент ректенны Техасского университета, фрагмент ректенны CRL

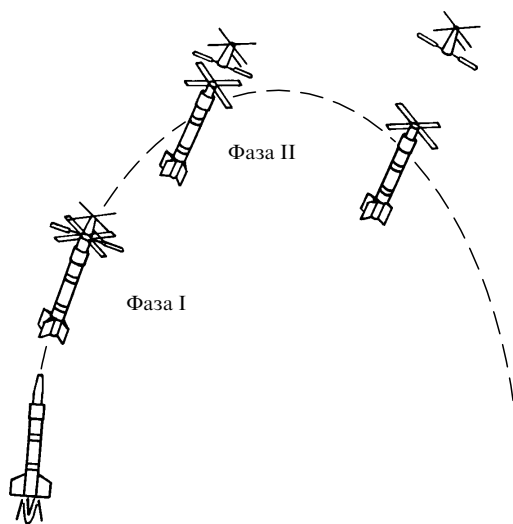


Рис. 14. Схема эксперимента ISY-METS

упрежно в полном соответствии с показателями наземных испытаний. Какого-либо заметного влияния плазменных волн на КПД передачи энергии отмечено не было.

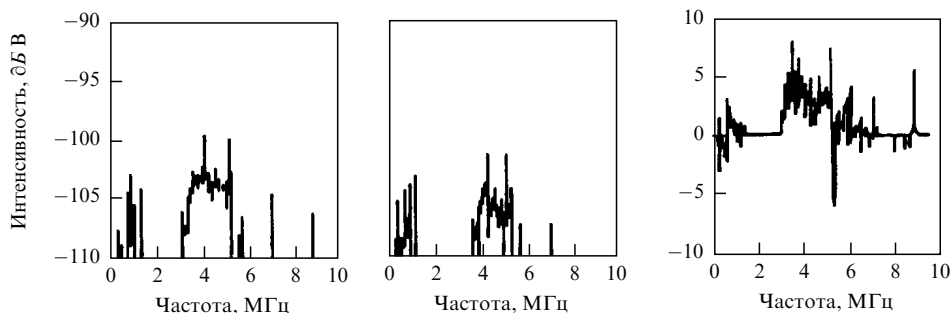


Рис. 15. Спектр плазменных волн, наблюдавшихся в эксперименте ISY-METS

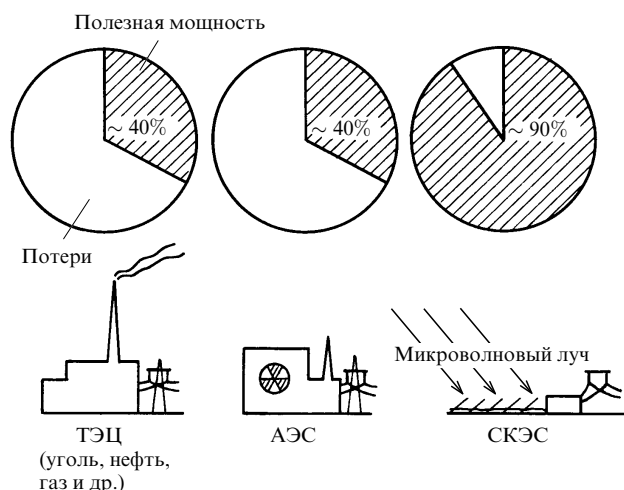


Рис. 16. Тепловые потери для различных типов электростанций

Часть результатов ISY-METS эксперимента находится, однако, еще в стадии обработки и будет опубликована позднее.

## 6. Обсуждение

Сформулируем прежде всего те преимущества, которые будет иметь СКЭС как энергосистема будущего:

1) СКЭС использует неистощимую (возобновляемую) энергию Солнца, т.е. того, уже созданного природой термоядерного котла, благодаря которому существует все живое на нашей планете.

2) Не расходуются ограниченные по размерам и ценные для технологических процессов будущего природные ресурсы Земли (уголь, нефть, газ и др.).

3) Отсутствуют какие-либо выбросы, загрязняющую атмосферу.

4) СКЭС обеспечивает минимальные тепловые потери (рис. 16), что довольно существенно — проблема теплового загрязнения является одной из наиболее крупных глобальных проблем, возникающих перед Человечеством.

5) Нет проблем, связанных с захоронением радиоактивных отходов и/или отработавшего ресурс радиоактивного оборудования.

6) Нет проблем, связанных с  $\text{CO}_2$ .

7) Высокая степень безопасности для населения Земли.

8) Наземная приемная система может быть приподнята над Земной поверхностью и обладать на 80–90% прозрачностью для солнечного излучения. Это позволяет эффективно использовать ее площадь для сельскохозяйственных или промышленных целей.

9) Микроволновый пучок СКЭС может легко перебрасываться с одной приемной системы на другую, обеспечивая тем самым возможность оперативного переключения территориально удаленных потребителей.

Возникает вполне естественный вопрос: почему такая, казалось бы, перспективная энергетическая система с трудом пробивает себе дорогу в жизнь? Ответ на этот не простой вопрос, вряд ли сегодня может быть однозначным и полным. И все же можно выделить здесь две основные проблемы — общественное мнение и финансовый риск.

Сегодня каждый школьник знает об усилиях, предпринимаемых в области термоядерного синтеза, но далеко не каждый специалист в физике, технике, энергетике и даже в космических исследованиях<sup>9</sup> имеет достаточно полное представление о СКЭС. Нередко можно услышать мнение, что невозможно создать таких размеров антенну в космосе, а если и можно, то микроволновый пучок сожжет все живое и т.д.

Существенным здесь может оказаться и то, что СКЭС — "новопришелец" в сферу энергетики, где сложилась вполне определенная расстановка интересов и сил и где уже по конъюнктурным соображениям появление этих новых идей далеко не всегда встречает понимание и поддержку.

Своеобразен подход, обычно используемый для экономических оценок рентабельности СКЭС. Стоимость кВт-ч энергии, которую будет вырабатывать СКЭС, вычисляется исходя из затрат на ее создание, а затем полученная таким образом цифра сравнивается с соответствующим показателем уже существующих энергосистем — тепловых электростанций, гидроэлектростанций, атомных электростанций и др. (например, [12]). Можно посмотреть на эту проблему и с несколько иной точки зрения. Создание каждой полномасштабной СКЭС означает замену одной из существующих энергосистем, расходующих природные ресурсы и/или загрязняющих (воздействующих на) среду обитания человека. И кто может сегодня ответить точно на вопрос о том, сколько центов за кВт-ч нужно добавить при экспертных оценках существующих энергосистем, разрушающих, в конечном итоге, экологическую оболочку Земли или обладающих повышенной взрывоопасностью, и сколько центов за кВт-ч нужно убавить у СКЭС, где эти проблемы отсутствуют.

Вполне вероятно, что в будущем только для того, чтобы решить возникающие глобальные проблемы, Человечество будет просто вынуждено осуществлять проекты таких масштабов, которые сегодня нам представляются абсолютно нереальными.

Нужно иметь в виду к тому же, что при реализации столь крупных космических программ, как создание СКЭС, когда работы будут вестись на грани технических возможностей и с неизбежным привлечением самых современных научных достижений, технологий и методов, экономическая отдача начнется уже в процессе разработки этих систем, за счет использования промежуточных результатов в смежных областях науки и техники.

Вспомним программу "Аполлон" (полет человека на Луну, США, примерно 25 млрд. долл.). Это была исключительно престижная по замыслу космическая программа, не направленная на получение какой-либо прямой экономической отдачи. И, тем не менее, она многократно (примерно в 7–12 раз по различным оценкам) окупилась прежде всего за счет использования новейших разработок и технологий, достигнутых в процессе выполнения этой программы, в самых разнообразных сферах человеческой деятельности.

<sup>9</sup> Может быть, в Японии эта проблема несколько шире известна. Опрос общественного мнения более чем 100 специалистов в области космических исследований показал, что свыше 40% из них дали высший балл СКЭС по степени важности проблемы. Статистика для года реализации оказалась следующей: минимальный — 2008 г., максимальный — 2026 г., средний — 2015 г.

Международное сотрудничество — важнейший фактор снижения коммерческого риска. Причем развивающиеся страны, как потенциально крупные потребители этой энергии, могут уже сегодня принимать участие в работах, направленных на создание СКЭС.

СКЭС 2000 — простейший путь продемонстрировать обществу, что же такое "Энергия из космоса", а также накопить необходимый организационный и технологический опыт для создания больших систем, снизив тем самым коммерческий риск.

Рабочая группа СКЭС Института космических исследований Японии активно работает над проектом СКЭС 2000 и открыта для международного сотрудничества.

## Список литературы

1. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Проблемы солнечных космических электростанций *УФН* **123** (4), 633 (1977).
2. Glaser P.E. Power from the Sun: its future *Science* **162**, 857 (1968).
3. *Satellite Power System (SPS) Concept Development and Evaluation Program Plan*, July 1977 — August 1980 /DOE/ET-0034. February 1978.
4. *Satellite Power System (SPS) Concept Development and Evaluation Program System Definition Technical Assessment Report* /DOE/ER-10035-03. December 1980.
5. *A Bibliography for Satellite Power System (SPS) Concept Development and Evaluation Program* /DOE/ER-0098. April 1981.
6. Ванке В.А., Лесота С.К., Рачников А.В., Саввин В.Л. СКЭС просится на орбиту *Энергия: экономика, техника, экология* (1), 9 (1986).
7. Ванке В.А., Лесков Л.В., Лукьянов А.В. *Космические энергосистемы* (М.: Машиностроение, 1990).
8. *Solar Power Satellites — the Emerging Energy Option* (Eds Glaser P.E., Davidson F.P., Csigi K.I.) (Ellis Horwood Ltd., 1993).
9. Glaser P.E. History and Outlook. In [8], p. 7.
10. Koormanoff F.A., Bloquist C.E. The Satellite Power System: Concept Development and Evaluation Programme. In [8], p. 26.
11. *Solar Power Satellites* (Office of Technology Assessment. OTA-E-144, August 1981).
12. *Electric Power from Orbit: a Critique of a Satellite Power System* (National Research Council: National Academy Press, July 1981).
13. *Advanced Satellite Power System Concept* (Downey, CA: Rockwell International. PD 80-61, 1980).
14. *Proceedings of the Second International Symposium "SPS 91, Power from Space"* (Paris: SEE/EDF Edition, 1991).
15. *Proceeding of the Third International Symposium "SPS RIO 92" ("Space Power Systems and Environment in the 21st Century")* (Rio de Janeiro: SEE/EDF Edition, 1992).
16. Nagatomo M. SPS Activities in Japan. In [8], p. 119.
17. *Proceedings of the 1st-12th ISAS Space Energy Symposia* (ISAS Editions, Japan, 1981–1993).
18. Yamashita Y., Hashimoto H. Concept of SPS offshore receiving station and potential sites. In *Proc. of the 3rd ISAS Space Energy Symposium* (ISAS Edition, 1983).
19. Uno T., Adachi S. Optimization of aperture illumination for radio wave transmission *IEEE Trans. Antennas and Propagation* **AP-32** (6), 628 (1984).
20. Itoh K., Akiba Y. A Consideration on rectenna for microwave power reception from SPS. In *Proc. of the Second ISAS Space Energy Symposium* (ISAS Edition, 1982).
21. A Report on the Future Forecast of the National Space Industry (Japan Machinery Federation, July (1983), p. 160 (in Japanese).
22. Nagatomo M. 10 MW Satellite Power System; a Space Station mission beyond 2000 *Space Power* **6** (2), 299 (1986).
23. Akiba R., Yokota H. System Analysis of Energy Storable Orbital Power Station (ESOPS) in Medium Altitude Equatorial Orbit. In *Proc. of the Pacific ISY Conference — A Planning Meeting for the International Space Year*. August 19–21, 1987. Kona, Hawaii.
24. Nagatomo M., Sasaki S., Naruo Y. Summary report on Conceptual Study of Solar Power Satellite System. In *Proc. of the 12th ISAS Space Energy Symposium* (ISAS Edition, 1993), p. 115.
25. *SPS 2000 Concept Design Documents / S2-T1-X* (ISAS Edition, July 1993) (in Japanese).
26. Naruo Y. On the Construction method of Solar Power Satellite SPS 2000. In *Proc. of the ISME Annual Conference on Robotics and Mechatronics (ROBOMECH '92)* (1992), p. 425.
27. Nagase T., Naruo Y. Weight estimation and modularization of SPS 2000. In *Proc. of the 12th ISAS Space Energy Symposium* (ISAS Edition, 1993), p. 128.
28. Nagatomo M., Itoh K. An evolutionary Satellite Power System for International Demonstration in Developing Nations. In [14], p. 353.
29. Капица П.Л. *Электроника больших мощностей* (М.: Изд-во АН СССР, 1962).
30. Brown W.C. Status of beamed power transmission technology and applications at 2.45 Gigahertz *Space Power* **8** (3), 339 (1989).
31. Brown W.C. Experimental radiation cooled magnetrons for space use *Space Power* **11** (1), 27 (1992).
32. Matsumoto H. A theoretical analysis of non-Linear Interaction between strong microwave for Solar Power Station and the ionosphere *Todai Uchu-Ken Houkoku* **15**, 3 (1979) (in Japanese).
33. Kaya N., Matsumoto H. Space Chamber Experiments of Ohmic Heating by High Power Microwaves from Solar Power Satellite *Geophys. Res. Lett.* **8** (11), 1289 (1981).
34. Matsumoto H. Numerical estimation of SPS microwave impact on ionospheric environment *Acta Astronautica* **9** (3), 493 (1982).
35. Nagatomo M., Kaya N., Matsumoto H. Engineering aspect of the Microwave Ionosphere Nonlinear Interaction Experiment (MINIX) with Sounding Rocket *Acta Astronautica* **13** (1), 23 (1986).
36. Kaya N., Matsumoto H., Miyatake S., Kimura I., Nagatomo M., Obayashi T. Nonlinear interaction of strong microwave beam with ionosphere *Space Power* **6** (2), 181 (1986).
37. Matsumoto H., Kimura T. Nonlinear excitation electron cyclotron wave by a monochromatic strong microwave *Space Power* **6** (2), 187 (1986).
38. Kimura I., Matsumoto H., Kaya N., Miyatake S. Plasma wave excitation by intense microwave transmission from space vehicle *Adv. Space Res.* **8** (2), 291 (1988).
39. Akiba R., Miura K., Hinada M., Matsumoto H., Kaya N. ISY-METS Rocket Experiment. ISAS Report. No. 652 (September (1993)).

## SPS-INVESTIGATION AT THE INSTITUTE OF SPACE AND ASTRONAUTICAL SCIENCE OF JAPAN

**Makoto Nagatomo, Susumu Sasaki, Yoshihiro Naruo**

*SPS Working Group, Space Power System Section, Research Division for Space Applications, The Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara 229, Japan*

*Tel. +81 427 51 39 80. Fax +81 427 59 42 39. E-mail: e34939@tansei.cc.u-tokyo.ac.jp*

*E-mail: sasaki@isasmac1.newslan.isas.ac.jp*

**Vladimir A. Vanke**

*M.V. Lomonosov State University, Physics Department, Leninskiy Gory, 119899, Moscow, Russia*

*Tel. (095) 939-4088. Fax (095) 292-6511. E-mail: vanke@mesps.phys.msu.su*

Bibliography — 39 references

*Received 17 January 1994*