

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В КОСМОСЕ

С. Афтергуд

Эта работа представляет собой введение в технологию космической ядерной энергии, в ней дается обзор истории ее развития, приводится информация о современных исследовательских программах и рассматриваются вопросы применения систем, использующих космическую ядерную энергию.

Автор статьи работает в Федерации американских ученых в Вашингтоне.

Статья подготовлена в рамках совместного исследовательского проекта по сокращению вооружений, организованного Комитетом советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы и Федерацией американских ученых.

ПРИНЦИПЫ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Космическая ядерная энергетическая установка преобразует тепловую энергию ядерного источника в электрическую для питания какой-либо нагрузки. Элементы этого процесса иллюстрируются схемой на рис. 1.

Как правило, в космосе используется два типа источников ядерной энергии - ядерные реакторы и радиоизотопные источники. В космической системе, использующей ядерный реактор, источником энергии является тепло, выделяющееся в управляемой реакции деления урана. Это тепло через теплообменник-охладитель передается либо в статическую (например, теплоэлектрическую), либо в динамическую (например, турбина/генератор) систему преобразования, которая переводит его в электричество. Затем это электричество может быть "переработано" в форму, необходимую для полезной нагрузки. Ненужное тепло сбрасывается через радиатор. В изотопном источнике энергии тепло выделяется при естественном распаде радиоактивного изотопа. Во всех системах, запущенных в США, используется плутоний-238.¹ Это тепло, как и полученное в реакторе, можно преобразовать в электричество с помощью статического или динамического преобразователя.

Опять же, электричество перерабатывается в соответствии с требованиями нагрузки, а избыточное тепло сбрасывается.

По сравнению с альтернативными вариантами использование ядерных источников энергии дает значительный выигрыш в весе в тех случаях, когда потребность в энергии превышает десятки киловатт в течение нескольких дней. Количественные оценки параметров космических ядерных реакторов SP-100 и мультимегаваттных реакторов сравниваются с параметрами их химических и солнечных эквивалентов в табл. 1. Рисунок

2 иллюстрирует общую применимость различных источников энергии, ядерных и неядерных, в интервалах требований по мощности и длительности действия. Для всех практических целей использование ядерных реакторов необходимо, когда в течение длительного периода требуется обеспечивать умеренную или высокую непрерывную мощность.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Американская программа. В США работы по разработке небольших ядерных источников энергии для использования в космосе начались в 1955 году в рамках программы SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power - вспомогательные системы ядерной энергии).

Всего США запустили 22 космических аппарата, питающихся от одного или более радиоизотопных термических генераторов (РТГ). Кроме того, США запустили один спутник, питающийся от реактора. Перечень этих систем космической ядерной энергии представлен в таблице 2. Все использовавшиеся в этих полетах источники энергии были довольно маломощными. Самый мощный реактор SNAP 10A производил только 500 Вт электроэнергии. Американская программа по космическим реакторам была свернута в 1973 году, поскольку ни для каких запусков космический реактор не требовался. Только начало работы над программой SP-100, описываемой ниже, вызвало ее оживление. В США самый последний космический аппарат с РТГ-источником был запущен в 1977 году. Следующий корабль с РТГ-источником - это аппарат НАСА Галилей, который должен быть запущен к Юпитеру в октябре 1989 года.

Советская программа. В СССР было запущено более 30 спутников с ядерным реактором в качестве источника энергии, несколько спутников с РТГ-источниками и ап-

Таблица 1.

Солнечный и химический эквиваленты для двух космических реакторов

	Проектная масса, кг	Масса химического эквивалента, кг	Масса солнечных батарей, кг	Площадь солнечных батарей, м ²
SP-100	- 5,000	- 6 x 10 ⁶	10,000	750
Мультимегаваттный 10 МВт (эл.)	- 50,000	- 9 x 10 ⁷	1 x 10 ⁶	75,000

Таблица 2.

Системы космической ядерной энергии, запущенные США.

Дата запуска		Космический аппарат	Источник энергии	Высота км	Состояние или время жизни
29 июня	1961	Transit 4A	RTG*	930	выключен
15 ноября	1961	Transit 4B	RTG	1,030	отказал
28 сентября	1963	Transit-5BN-1	RTG	1,095	9 месяцев
5 декабря	1963	Transit-5BN-2	RTG	1,085	отказал
21 апреля	1964	Transit-5BN-3	RTG		выключен
3 апреля	1965	Snapshot	реактор	1,290	43 дня
18 мая	1968	Nimbus-B-1	RTG		выключен
14 апреля	1969	Nimbus III	RTG	1,100	отказал
14 ноября	1969	Apollo 12	RTG		на Луне
11 апреля	1970	Apollo 13	RTG		выключен
31 января	1971	Apollo 14	RTG		на Луне
26 июля	1971	Apollo 15	RTG		на Луне
2 марта	1972	Pioneer 10	RTG		за Плутоном
16 апреля	1972	Apollo 16	RTG		на Луне
2 сентября	1972	Transit-01-1X	RTG	770	работает
7 декабря	1972	Apollo 17	RTG		на Луне
5 апреля	1973	Pioneer 11	RTG		за Сатурном
20 августа	1975	Viking 1	RTG		на Марсе
9 сентября	1975	Viking 2	RTG		на Марсе
14 марта	1976	LES 8	RTG	35,785	работает
14 марта	1976	LES 9	RTG	35,785	работает
20 августа	1977	Voyager 2	RTG		за Ураном
5 сентября	1977	Voyager 1	RTG		за Сатурном

* Все американские RTG работают на плутонии-238; реактор Snapshot работает на уране-235.

Источники: Gary L.Bennett, James J.Lombardo, and Bernard J.Rock, "Development and Use of Nuclear Power Sources for Space Applications", Journal of the Astronautical Sciences, 29, 4, October-December 1981, pp.321-342; Nicholas L.Johnson, "Nuclear Power Supplies in Orbit", Space Policy, August 1986, pp.223-233. Значения высот даны на 1 января 1986 года.

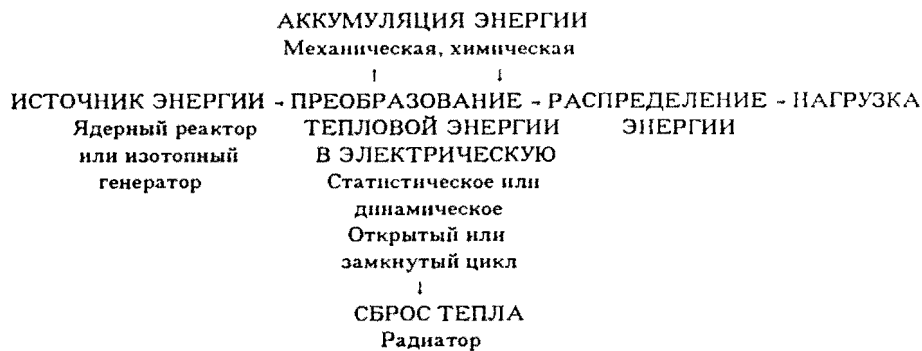


Рисунок 1

Схема процесса преобразования ядерной энергии в электрическую

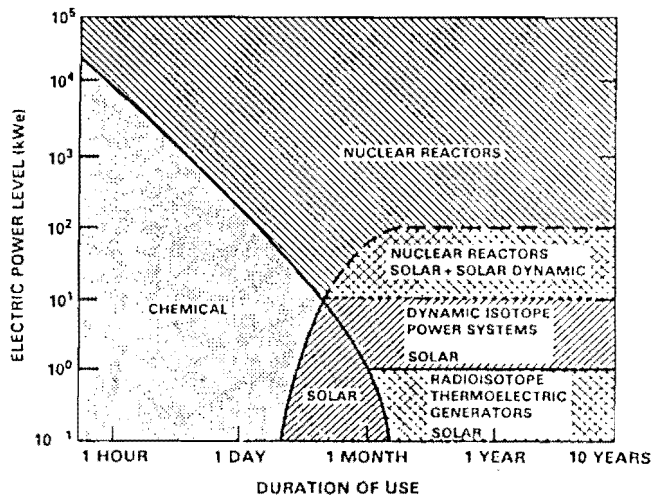


Рисунок 2

Возможные режимы применения космических энергетических систем

параты "Луноход". Список космических аппаратов с ядерными источниками энергии, запущенных в СССР, приведен в таблице 3. Советский Союз использовал космические реакторы для питания своих спутников с радиолокаторами морской разведки (ROR-SAT), которые были предназначены для обнаружения и слежения за кораблями ВМС США. Типичная высота их орбиты - 255 - 270 км. Такая низкая орбита расширяет возможности спутникового радиолокатора, но требует использования ядерной энергии вместо солнечных панелей, поскольку последние увеличивали бы сопротивление и сильно сокращали бы время жизни на орбите. Кроме того, аппарату, оснащенной солнечными батареями, необходима система хранения энергии для работы в тени Земли, что увеличивает его массу и порождает технические сложности.

Реактор сконструирован так, чтобы после окончания основной задачи, продолжающейся обычно 2 или 3 месяца, отделяться от спутника и переводиться на более высокую долгоживущую орбиту около 950 км. Неполадки в системе повторного запуска привели к преждевременному падению реактора со спутника Космос-954 в 1978 году и выпадению радиоактивных осколков в северо-западной Канаде. После этого инцидента конструкция была изменена так, чтобы в конце миссии активная зона реактора выбрасывалась из реактора, тем самым облегчая его уничтожение в верхних слоях атмосферы в случае возврата. Так было, когда Космос-1402 вошел в атмосферу в 1983 году. Даже если переход был успешным, активная зона реактора все равно отбрасывается после выхода на более высокую орбиту. В 1988 году стало известно о дальнейших из-

Таблица 3.

Космические аппараты с ядерным источником энергии, запущенные в СССР.

Дата запуска		Космический аппарат	Источник энергии	Значение высоты, км	Продолжительность работы
3 сентября	1965	Космос 84	RTG*	1,500	
18 сентября	1965	Космос 90	RTG	1,500	
27 декабря	1967	Космос 198	реактор	920	1 день
22 марта	1968	Космос 209	реактор	905	1 день
25 января	1969	возможен неудачный запуск RORSAT			
23 сентября	1969	Космос 300	RTG	повторяемый	
22 октября	1969	Космос 305	RTG	повторяемый	
3 октября	1970	Космос 367	реактор	970	1 день
1 апреля	1971	Космос 402	реактор	990	1 день
25 декабря	1971	Космос 469	реактор	980	9 дней
21 августа	1972	Космос 516	реактор	975	32 дня
25 апреля	1973	неудачный запуск RORSAT			
27 декабря	1973	Космос 626	реактор	945	45 дней
15 мая	1974	Космос 651	реактор	920	71 день
17 мая	1974	Космос 654	реактор	965	74 дня
2 апреля	1975	Космос 723	реактор	930	43 дня
7 апреля	1975	Космос 724	реактор	900	65 дней
12 декабря	1975	Космос 785	реактор	955	1 день
17 октября	1976	Космос 860	реактор	960	24 дня
21 октября	1976	Космос 861	реактор	960	60 дней
16 сентября	1977	Космос 952	реактор	950	21 день
18 сентября	1977	Космос 954	реактор	повторяемый	-43 дня
29 апреля	1980	Космос 1176	реактор	920	134 дня
5 марта	1981	Космос 1249	реактор	940	105 дня
21 апреля	1981	Космос 1266	реактор	930	8 дней
24 августа	1982	Космос 1299	реактор	945	12 дней
14 мая	1982	Космос 1365	реактор	930	135 дней
1 июня	1982	Космос 1372	реактор	945	70 дней
30 августа	1982	Космос 1402	реактор	повторяемый	120 дней
2 октября	1982	Космос 1412	реактор	945	39 дней
29 июня	1984	Космос 1579	реактор	945	90 дней
31 октября	1984	Космос 1607	реактор	950	93 дня
1 августа	1985	Космос 1670	реактор	950	83 дня
23 августа	1985	Космос 1677	реактор	940	60 дня

Продолжение таблицы 3.

Дата запуска		Космический аппарат	Источник энергии	Значение высоты	Продолжительность работы
21 марта	1986	Космос 1736	реактор	950	92 дня
20 августа	1986	Космос 1771	реактор	950	56 дней
1 февраля	1987	Космос 1818	реактор	800	-6 месяцев
18 июня	1987	Космос 1860	реактор	950	40 дней
10 июля	1987	Космос 1867	реактор	800	-1 год
12 декабря	1987	Космос 1900	реактор	720	-124 дня
14 марта	1987	Космос 1932	реактор	965	66 дней

* RTG предположительно наполнены плутонием-210, который имеет продолжительность распада 138.39 дней.

Источники: Nicholas L. Johnson, "Nuclear Power Supplies in Orbit", Space Policy, August 1986, pp.227, 228. Пересмотрено и переделано при личном участии Джонсона 24 июня 1988 г. Значения высоты даны на 1 января 1986 г. для запусков до 1986 г. Космос 1818 и Космос 1867 предположительно были запущены для испытаний нового типа реактора Топаз.

менениях конструкции, затрагивающих автоматическую систему перезапуска.² Она срабатывает в случае одной из трех неполадок: потеря контроля высоты, прекращение работы реактора, пробой в электрической системе. По-видимому, первая из этих причин вызвала в последнюю минуту переход спутника Космос-1900 в 1988 году.

Публикации о советской космической ядерной программе редки и иногда противоречивы.³ Однако в 1988 году в СССР была опубликована информация о реакторе Космос-1900:⁴

"Сердцевина реактора состоит из 37 цилиндрических тепловых элементов, покрытых бериллиевыми отражателями. В качестве ядерного топлива используется сплав урана с молибденом, на 90% обогащенный ураном-235 (общий вес 31.1 кг)..."

Судя по анализу осколков спутника Космос-954, эти советские космические

реакторы работают на быстрых нейтронах.

Недавно Советский Союз официально сообщил, что в 1987-1988 годах были проведены летные испытания двух новых реакторов "Топаз".⁵ Испытания проводились при уровне мощности электроэнергии 10 кВт на орбитах с высотой около 800 км, время работы составило 6 месяцев и 1 год соответственно. Спутники, несущие реакторы Топаз, были предположительно отождествлены западными наблюдателями со спутниками Космос-1818 и Космос-1867.⁶

АВАРИИ И НЕПОЛАДКИ В КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Заметная часть - около 15% - всех американских и советских запусков аппаратов с ядерными энергетическими установками на борту окончилась авариями, отказами на старте или другими поломками. Ниже эти инциденты кратко перечисляются в хроно-

логическом порядке:⁷

1964

Когда американский навигационный спутник Транзит-5ВN-3 не вышел на орбиту 21 апреля, установленный на нем источник энергии РТГ SNAP 9А распался в атмосфере (как и было заложено в его конструкции на случай входа в атмосферу) на высоте около 50 километров. Из-за выброса 17000 кюри плутония-238 общее содержание этого изотопа в окружающей среде утроилось, а общая загрязненность (измеренная в кюри) от всех изотопов плутония (в основном, выпадения от испытаний ядерного оружия в атмосфере) увеличилась примерно на 4%.⁸

1968

18 мая американский метеорологический спутник Нимбус-В-1 из-за поломки на старте упал в Тихий Океан у самого калифорнийского побережья. Спустя 5 месяцев два установленных на нем РТГ SNAP 19А были извлечены неповрежденными.

1969

25 января в Советском Союзе был неудачный запуск. Возможно, это был РОРСАТ с ядерным источником энергии.

1969

23 сентября и 22 октября в СССР были запущены 2 автоматических лунных станции. Обе вышли на околоземную орбиту, но вошли в атмосферу несколько дней спустя. Согласно различным источникам, одна из них или обе имели тепловой источник с полонием-210. После их входа в атмосферу была обнаружена заметная радиоактивность.⁹

1970

В апреле сорвался запуск американской лунной станции "Аполлон-13". Отделившийся от нее посадочный лунный модуль упал в Тихий Океан. Достать ядерный источник SNAP 27 с плутонием так и не смогли, но замеры в атмосфере не показали выхода радиоактивности, так что считают, что РТГ остался неповрежденным.

1973

25 апреля советский РОРСАТ с ядерным источником упал в Тихий Океан из-за поломки на старте.

1978

Это одна из самых серьезных аварий с космическими ядерными источниками. Советский спутник Космос-954 вошел в атмосферу 24 января и разбросал тысячи радиоактивных обломков на более чем 100000 км² территории северо-западной Канады.¹⁰ Некоторые фрагменты были очень радиоактивными (гамма-излучение при соприкосновении до 500 рентген в час).

1983

Отделившаяся активная зона реактора

со спутника Космос-1402 вошла в атмосферу 7 февраля, распалась и рассеялась.¹¹

1988

Радиосвязь со спутником Космос-1900 была потеряна в апреле, что сделало невозможным управляемый перевод спутника на высокую удаленную орбиту. В конце концов 30 сентября, как раз за несколько дней до предсказанного входа в атмосферу, сработали запасные системы, и бортовой реактор был переведен на более высокую орбиту.¹²

СОВРЕМЕННЫЕ АМЕРИКАНСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЯДЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ

SP-100. В настоящее время в США развивается несколько космических ядерных программ. Центральной является работа над реактором SP-100. Его конструкция еще пересматривается, но многие важнейшие параметры уже определены, по крайней мере, предварительно. Они перечислены в таблице 4. На рис. 3 изображена схема конструкции SP-100. Характеристики гамма- и нейтронного излучения для предварительной конструкции SP-100 содержатся в таблице 5. Предлагаемый реактор обладает тепловой мощностью 2,3 МВт, которая преобразуется термоэлектрическим способом в 100 кВт электроэнергии. Конечной целью является получить для реактора отношение массы к мощности, равное 30 кг/кВт. В действительности, по оценкам вес рассматриваемой конструкции равен 4600 кг, что дает 46 кг/кВт. Элементы реактора, в том числе его оболочка и защитное покрытие, довольно малы - они занимают объем около 1 м³. Однако в целом SP-100 совсем не такой компактный, его общая длина более 25 м, а площадь панели радиатора - около 100 м².

Конструкция SP-100 допускает в принципе уменьшение по мощности электроэнергии до 10 кВт и увеличение до 1 МВт. Свыше 1 МВт реактор становится слишком тяжелым; данная конструкция не подходит для мультимегаваттных приложений.

Мультимегаваттные реакторы. Министерство энергетики США исследует также возможность создания космического ядерного реактора с уровнем электрической мощности более 1 МВт в рамках программы "Мультимегаваттные реакторы" (ММВ). По-видимому, бюджетные ограничения отодвинули выбор концепции его создания на период после 1991 года, а окончательную разработку ММВ реактора - за 2000 год.

Предложено более десятка концепций ММВ системы, но многие принципиальные вопросы еще ждут своего решения. Министерство энергетики разделило требования, предъявляемые к мультимегаваттным реак

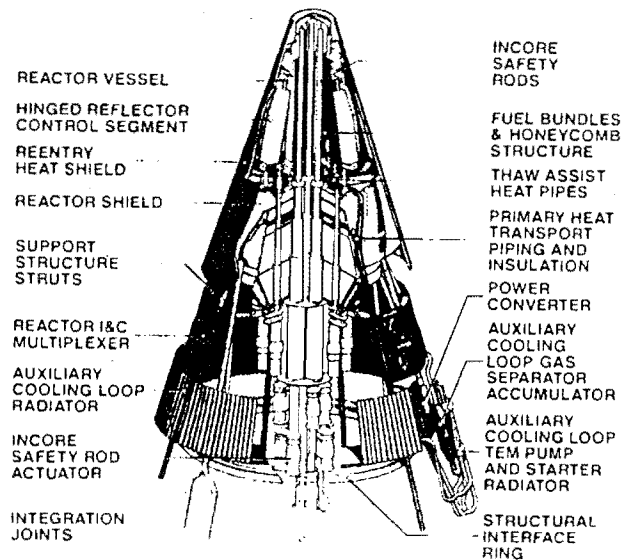


Рисунок 3
Схема энергетического блока реактора SP-100.

Таблица 4.

Характерные параметры SP-100

Тепловая энергия	2.3 мегаватт
Электрическая энергия	100 киловатт
Продолжительность работы	7 лет полной работы сверх 10-ти летнего периода
Топливо	нитрит урана
Масса топлива	-190 килограмм
Обогащенное топливо	89-97% урана-235
Энергия конверсии	термоэлектрическая
Площадь радиатора	106 м ²
Температура радиатора	-800 К
Диаметр цилиндра реактора	35 см
Нейтронная защита	гидрид лития
Защита от гамма-излучения	вольфрам
Общая масса защиты	1000 кг
Основанно на сообщениях SP-100 Project Integration Meeting, 19-21 July 1988, Long Beach, California.	

Таблица 6

Предварительные оценки энергетических требований систем СОИ

Вид действия	Основа	Тревога	Взрыв
BSTS	4 - 10	4 - 10	4 - 10
SSTS	5 - 15	5 - 15	15 - 20
Лидар	15 - 20	15 - 20	50 - 100
Лидар с построением изображения	15 - 20	15 - 20	100 - 500
Лазерный осветитель	5 - 10	5 - 10	50 - 100
Допплеровский лидар	15 - 20	15 - 20	300 - 600
Носитель перехватчиков	2 - 30	4 - 50	10 - 100
Химический лазер	50 - 100	100 - 150	100 - 200
Боевое зеркало	10 - 50	10 - 50	20 - 100
Ускорители	20 - 120	1000 - 10000	$1 \times 10^5 - 5 \times 10^5$
Электромагнитная пушка	20 - 120	1000 - 10000	$2 \times 10^5 - 5 \times 10^6$

Источник: Strategic Defense Initiative Organization. Reprinted in SDI: Technology, Survivability, and Software (Washington DC: US Congress, Office of Technology Assessment, OTA-ISC-353, May 1988), p.142

торам, на три категории:¹³

Десятки мегаватт, открытый цикл (рабочая жидкость выливается).

Десятки мегаватт, замкнутый цикл.

Сотни мегаватт за сотни секунд, открытый или замкнутый цикл.

Изотопные энергетические установки.

Такие установки можно разделить на радиоизотопные термические генераторы (РТГ), где выполняется термоэлектрическое преобразование, и динамические изотопные энергетические системы (ДИЭС), которые выполняют динамическое преобразование энергии. Радиоактивный изотоп плутония-238 используется в качестве источника тепла в обоих системах.

За последние 30 лет источники РТГ

прошли путь от первых систем SNAP до современных Тепловых Источников Общего Назначения (ТИОН), которые предполагается установить на борту миссий НАСА "Галилео" (два РТГ) и "Улисс" (один РТГ). ТИОН будет иметь тепловую мощность 4,4 кВт и содержать 9,4 кг плутония.¹⁴ Радиоизотопные тепловые источники используются также в небольших количествах для обеспечения теплом чувствительных элементов космического корабля, которым вредит низкая температура. На аппарате "Галилео", направляемом к Юпитеру, помимо двух РТГ ТИОН будет установлено еще около 130 таких легких радиоизотопных нагревателей, выделяющих 1 Вт тепловой мощности каждый.¹⁵

С помощью ДИЭС можно получать элект-

трическую мощность в диапазоне 1-10 кВт. При мощности меньше 1 кВт масса РТГ недостаточно мала. При мощности больше 10 кВт масса источника ДИЭС становится чрезмерной, и предпочтительнее воспользоваться небольшим ядерным реактором. Сторонники ДИЭС указывают, что она менее заметна в инфракрасном диапазоне (излучает меньше тепла: см. ниже), менее заметна на радиолокаторах (компактна), излучает меньше нейтронов и гамма-квантов по сравнению с реакторами, использующими ядерные реакции деления.¹⁶

Однако для одной единственной 6-киловаттной ДИЭС требуется огромное количество плутония-238 - 53 кг.¹⁷ Это примерно в два с половиной раза больше, чем осадки всех изотопов плутония (измеренные в кюри) после всех испытаний ядерного оружия в атмосфере.

ВОЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ¹⁸

И современные, и предлагаемые космические ядерные источники энергии, особенно на околоземных орбитах, применяются, в

основном, в военных целях.

Как отмечалось выше, Советский Союз использует ядерные реакторы для оснащения спутников-наблюдателей, которые обнаруживают и следят за американскими морскими судами.¹⁹

В США различные космические программы ядерной энергии развиваются в рамках Стратегической Оборонной Инициативы, для создания мощного космического оружия и орбитальных платформ. Если бы не СОИ, то Соединенным Штатам были бы практически не нужны многие из разрабатываемых в настоящее время космических ядерных источников энергии.

Определение архитектуры Стратегической оборонной системы далеко от своего завершения, и определить точную роль ядерной энергии в окончательной системе невозможно. Но организация Стратегической оборонной инициативы, Министерство энергетики, исследовательская группа Американского Физического Общества (АФО) по оружию направленной энергии и Управление по оценке технологии в целом согласны, что, по-видимому, ядерные реакторы в космосе являются существенной частью более позд-

Таблица 5

Характеристики гамма- и нейтронного излучения SP-100

	Центр	Незащищенная поверхность	Защищенная поверхность	Полезная нагрузка
Быстрые нейтроны (н/см ² за 7 лет)	-1×10^{23}	-3×10^{21}	-3×10^{16}	4×10^{12}
Поток быстрых нейтронов (н/см ² сек)	5×10^{14}	-1.3×10^{13}	-1.3×10^7	2×10^4
Фотоны (рад за 7 лет)	-1×10^{13}	-5×10^{11}	-2×10^8	5×10^5
Фотоны (рад/сек)	4.5×10^4	-2.3×10^3	-9×10^{-1}	2.3×10^{-3}
Нейтронное ослабление защиты:				7.5×10^5
Фактор поглощения гамма-излучения		вольфрамом:		70
		гидридом лития:		50
Общее поглощение гамма-излучения защитой:				3.5×10^3
* Эти оценки включают поглощение нейтронов и гамма-излучения на расстоянии, включающем и защиту. Основывались на General Electric's SP-100 Ground Engineering System Baseline Design Study, 1984, pp.3-28.				

них этапов СОИ - тех, где будет использоваться оружие направленной энергии.

Члены Комитета АФО объясняли, что даже:²⁰

"для получения электрической мощности в несколько десятков киловатт требуется использовать ядерные реакторы по двум причинам. Первая - живучесть: большая площадь солнечных батарей делала бы спутник очень уязвимым к действиям нападающей стороны. Вторая причина - надежность: предполагаемое длительное нахождение спутника на орбите могло бы уменьшить надежность источника энергии (солнечных батарей) из-за радиационного повреждения, временной масштаб которого составляет около 10 лет..."

Официальные лица программы СОИ разделяют энергетические потребности СОИ на три категории: режим ожидания (базовая нагрузка), режим тревоги, боевой режим. В режиме ожидания требуется от нескольких до 100 кВт непрерывной электрической мощности в течение всей жизни системы для текущих функций эксплуатации и управления, таких как наблюдение, связь, обработка данных, контроль высоты, охлаждение. Режим тревоги будет включаться при угрозе конфликта и, согласно оценкам организации СОИ, может потребовать до 10 МВт электроэнергии в течение одного года за все время жизни системы. Боевой режим, с учетом действительного включения оружия направленной энергии, может потребовать сотни мегаватт энергии за десятки или сотни секунд. В таблице 6 представлены предварительные оценки энергетических требований некоторых систем СОИ.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Получаемый плутоний-238 в действительности содержит около 83% плутония-238, 15% плутония-239 и небольшие количества других изотопов плутония. Период полураспада плутония-238 - 87,8 лет.
2. См. показания Д.Хирша на слушаниях Комитета по энергии и природным ресурсам Сената США, 13 сентября 1988. См. также Т.М. Foley, в "Aviation Week & Space Technology", 19 сентября 1988, стр. 20.
3. Статья R. Townsend Reese and Charles P. Vick в "Journal of the British Interplanetary Society", vol. 36, 1983, стр.457--462 представляет интерес, хоть и содержит некоторые несоответствия. Статья Nicholas L. Johnson в "Space Policy", август 1986, стр.223-233 является очень информативной, также как и ежегодник "Советский год в космосе" того же автора (Colorado Springs, Colorado: Teledyne Brown Engineering).
4. Отчет Госкомитета СССР по использованию атомной энергии, представленный в Международное Агентство по Атомной Энергии. Воспроизведено в телеграмме Американской миссии в Вене, Австрия, Государственному Секретарю США, 27 сентября 1988.
5. William J. Broad в "New York Times", 15 января 1989, стр.А1; сообщение ТАСС "Созданы ядерные энергетические установки для космических кораблей", 5 января 1989.
6. Частное сообщение, Николас Джонсон, 24 июня 1988.
7. Дальнейшую информацию и ссылки можно найти в статье S. Aftergood в "Bulletin of the Atomic Scientists", октябрь 1986, стр.40-43.
8. E.P.Hardy, P.W.Krey and H.L.Volchok, Nature, 16 февраля 1973, стр.444.
9. Johnson, 1986, стр.227; William J. Broad "New York Times", 8 февраля 1983, стр. C1,C2.
10. W.K.Gummer et al., "Космос-954: происхождение и природа обнаруженных обломков", (Hull, Quebec: Canadian Government Publishing Center, INFO-0006, май 1980), стр.11.
11. Robert Leifer et al., Science, 238, 23 октября 1987, стр.512-3.
12. William J. Broad в "New York Times", 14 мая 1988; 16 William Harwood в "Washington Post (UPI)", 2 октября 1988, стр. А6.
13. Philip .. Klass в "Aviation Week & Space Technology", 1 февраля 1988, стр. 59.
14. Gary L. Bennett et al., в "Proceedings of the 21st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference", том 3, август 1986, стр.1999-2011.
15. Анализ безопасности легкого радиоизотопного нагревателя, отчет MLM-3293, октябрь 1985.
16. Gary L. Bennett and James J. Lombardo, в "Proceedings of the 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference", том 1, август 1987, стр.366-372. ДИЭС были недавно перепроектированы в ТЭПС (турбинные энерго-преобразующие системы).
17. Предполагается 20-процентная эффективность преобразования и 0.56 Вт/г плутония-238.
18. Дальнейшую информацию о применении см. в S.Aftergood, Space Policy, февраль 1989, стр.25-40.
19. Nicholas L. Johnson, "Советский год в

космосе 1985" (Colorado Springs, Colorado: Teledyne Brown Engineering, 1985), стр.39; см. также Министерство обороны США "Советские вооруженные силы

1985", стр.53; и "Aviation Week & Space Technology", 26 августа 1985, стр. 23.
20. Physics Today, ноябрь 1987, стр.52-53.