

КОНТРОЛЬ НАД КОСМИЧЕСКИМИ ЯДЕРНЫМИ РЕАКТОРАМИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ (ОБЩИЙ ОБЗОР)

*Джозел Р. Примак, Нэнси Е. Абрамс, Стивен Афтергуд, Дэвид У. Хафемейстер,
Дэниэл О. Хирш, Роберт Мозли, О.Ф. Прилуцкий, С.Н. Родионов, Р.З. Сагдеев*

Незащищенные ядерные реакторы являются самыми легкими и наиболее живучими источниками электроэнергии для спутников военного назначения с большим сроком активного существования. Ограничение их применения сейчас, до испытания и развертывания нового поколения больших космических ядерных реакторов в СССР и США, может помочь затормозить гонку космических вооружений.

Ядерные энергетические установки в космосе использовались Советским Союзом и Соединенными Штатами, начиная с шестидесятых годов. В Советском Союзе ядерные реакторы были установлены более чем на тридцати спутниках радиолокационной морской разведки, известных на Западе под названием РОРСАТ. Два спутника из этой серии из-за неисправности бортовых систем непреднамеренно вошли в земную атмосферу и загрязнили окружающую среду радиоактивными продуктами, а третий спутник, "Космос-1900", едва избежал этой участи.

В Соединенных Штатах сейчас разрабатываются намного более мощные реакторы (наиболее продвинутым проектом является реактор SP-100); основным назначением этих реакторов будет обеспечение электроэнергией космических средств Стратегической оборонной инициативы (СОИ). Рабочая группа Федерации американских ученых (ФАУ) и Комитета советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы (КСУ) провела изучение предложения по запрещению ядерных реакторов на околоземных орбитах. Предложение ФАУ и КСУ, включающее этот запрет, приведено в приложении к статье.

Первые пять статей этого раздела, подготовленные членами рабочей группы, содержат исторический обзор развития ядерных энергетических установок для космических аппаратов и подтверждают возможность верификации ограничений на ядерные реакторы на околоземных орбитах. Последняя статья, подготовленная сотрудниками НАСА Розеном и Шнайером, посвящена применению ядерных источников энергии в космосе для мирных целей.

Обзор предназначен для общего введения в вопросы контроля над ядерными реакторами военного назначения, включая предлагаемый запрет ядерных реакторов на околоземной орбите.

Информация об авторах приведена в разделе "Примечания и ссылки".¹

Эта статья подготовлена в рамках Совместного исследовательского проекта по сокращению вооружений Федерации американских ученых и Комитета советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ

Соединенные Штаты вывели на орбиту первый космический реактор, SNAP 10A, в 1965 году. В этом небольшом исследовательском реакторе с электрической мощностью в 500 Вт, как и во всех последующих установках, в качестве топлива использовался редкий делящийся изотоп урана U-235. Реактор работал в течение 43 суток, пока не был выключен в результате случайной неисправности в системе электроснабжения. До сих пор спутник с этим реактором остается на орбите высотой 1300 км.²

В Советском Союзе было запущено по крайней мере 33 спутника для морской радиолокационной разведки (РОРСАТ) с ядерными реакторами на борту; по крайней мере один из них не вышел на заданную орбиту.

Радиолокатор, обеспечиваемый ядерным реактором, предназначен для слежения за кораблями американского военно-морского флота,³ в Соединенных Штатах для этой цели применяются другие методы. Спутники типа РОРСАТ располагаются на очень низких орбитах высотой около 250 км. Требование к малой высоте орбиты вытекает из очень быстрого уменьшения эффективности радиолокаторов с расстоянием до цели R, приближенно пропорционального

$$R^4 = R^2(\text{вниз}) * R^2(\text{вверх})$$

На таких малых высотах из-за торможения в атмосфере даже спутники с малым поперечным сечением будут снижаться очень быстро. Поэтому на таких спутниках вместо солнечных батарей большой площади прихо-

дятся использовать компактные ядерные реакторы.

После завершения активного существования спутника реактор должен переводиться на "безопасную" орбиту хранения высотой около 950 км. Время жизни спутника на этой орбите составляет около нескольких сотен лет, в течение которых большая часть радиоактивных продуктов деления должна распадаться.

Два спутника типа POPCAT случайно вошли в верхние слои атмосферы после вероятного отказа системы вывода на высокую орбиту. "Космос-954" вошел в атмосферу 24 января 1978 года, загрязнив радиоактивными продуктами территорию северной Канады. После отказа системы выведения спутника "Космос-1402" было использовано новое устройство выброса топливных элементов реактора, которые разрушились в верхней атмосфере над южной частью Атлантического океана 7 февраля 1983 года.

"Космос-1900" перестал воспринимать радиокоманды с Земли в апреле 1988 года, что не позволило перевести его на более высокую орбиту. Снижение орбиты "Космоса-1900" было подтверждено советскими и американскими источниками в пятницу 13 мая 1988 года.⁴ 30 сентября 1988 года, незадолго до ожидаемого входа спутника в плотные слои атмосферы, сработала резервная автоматическая система вывода спутника на высокую орбиту. Согласно оценкам, в реакторе спутника "Космос-1900" содержится около 30 кг высокообогащенного урана-235, его тепловая мощность составляет около 75 кВт, а электрическая около 5 кВт.^{5,6}

Учитывая неисправности на спутниках "Космос-954, 1402 и 1900", вместе с одним или двумя неудачными запусками, можно принять, что средняя доля аварийных запусков спутников типа "POPCAT" составляет около 15%. Эта величина примерно соответствует доле аварийных запусков американских спутников с ядерными источниками энергии на борту.⁷

Советские специалисты по космическим ядерным реакторам недавно объявили, что в Советском Союзе было проведено два запуска экспериментальных реакторов новой конструкции на орбиты высотой в 800 км ("Космоса-1818" 1 февраля 1987 года и "Космоса-1867" 10 июля 1987 года).⁸ Генерация электроэнергии в новых реакторах производится в размещенных внутри блока топливных элементов термоионных приборах, более эффективных по сравнению с применявшимися ранее термоэлектрическими генераторами (термопарами). Электрическая мощность новых реакторов предположительно составляет 10 кВт.

СОИ И АМЕРИКАНСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

В Соединенных Штатах в ходе выполнения программы Rover/NERVA для разработки ядерного ракетного двигателя в конце шестидесятых и начале семидесятых годов были построены и испытаны на наземных стендах несколько мощных ядерных реакторов. Были проведены разработки нескольких проектов космических ядерных реакторов для генерации электроэнергии, но до начала программы СОИ потребность в подобных установках была невелика.⁹

По рекомендации Национальной Академии наук США, опубликованной в 1983 году, до объявления стратегической оборонной инициативы, на программу разработки космического ядерного реактора с электрической мощностью в 100 кВт следовало выделять 10-15 миллионов долларов в год.¹⁰ Текущее финансирование этой программы, получившей название SP-100, в десять раз больше рекомендованной величины. Выступавший на слушаниях в Конгрессе представитель Министерства энергетики США заявил:¹¹

"Я могу честно сказать, что главной движущей силой возрождения [программы ядерных космических реакторов] является стратегическая оборонная инициатива [Президента Рейгана]. Я думаю, что если бы этого фактора не было, то нам бы было очень трудно найти достаточное количество определенных проектов, необходимое для поддержания наших усилий на том уровне, о котором мы говорим сейчас."

Развертывание противоракетных систем космического базирования, предлагаемых программой СОИ, или противоспутниковых систем может включать, помимо прочих устройств, системы оружия направленной энергии (лазеры, орбитальные зеркала отражатели излучения наземных лазеров, ускорители частиц высоких энергий, гиперскоростные пушки), требующие большой электрической мощности. Энергетические потребности подобных орбитальных боевых станций могут быть разделены на три категории:

Питание служебных систем в обычном режиме, включающее обеспечение инерциальной ориентации и стабилизации космического аппарата. Большие потенциальные потребности в электроэнергии могут быть связаны с криогенным охлаждением химического топлива.

Режим повышенной готовности, в котором необходимо функционирование всех служебных систем и обеспечение способ-

ности к маневрированию. Этот режим может поддерживаться в течение ряда периодов длительностью от нескольких часов до нескольких суток во время испытаний, учений или кризисных ситуаций. Общая длительность периодов режима повышенной готовности на протяжении существования космического аппарата может достигать одного года.

Боевой режим, в котором используются системы оружия, поражающие сотни или тысячи мишеней в течение нескольких сотен секунд.

При отсутствии конкретных проектов систем противоракетной обороны или антиспутникового оружия соответствующие требования по электропитанию систем обсуждать трудно.

Питание служебных систем в обычном режиме, скорее всего, потребует от десятков до сотен киловатт электрической мощности на протяжении примерно десяти лет, которая может быть получена либо от солнечных батарей, либо от ядерного реактора.

Работа в режиме повышенной готовности может быть связана с изменениями скорости элементов конструкции космических аппаратов (лазеров, зеркал и т.д.) с массой порядка тонны величиной до десятка метров в секунду, происходящими за доли секунды; такие операции потребуют затрат энергии до 100 кВт. Аналогичные требования могут возникнуть и в других операциях режима повышенной готовности.¹² Повышенные требования по электропитанию повышают значение ядерных реакторов, в особенности, если космический аппарат должен быть компактным и устойчивым по отношению к атакам противника.

В боевом режиме мощность, необходимая для поражения одной цели в секунду, будет составлять по порядку величины около 1000 МВт. Если полное число целей для одной боевой станции будет примерно равно 100, эффективность поражения будет равна одной трети, а коэффициент полезного действия электрических генераторов будет близок к 10%, то для обеспечения этих энергетических потребностей понадобится около 100 тонн химического горючего с высокой плотностью энергии, например, бериллия, сгорающего в атмосфере фтора.

В операциях боевого режима можно использовать и мультимегаваттные реакторы замкнутого цикла, но они, скорее всего, окажутся слишком тяжелыми, особенно при учете требования быстрого преобразования энергии. Однако, реакторы открытого цикла могут оказаться конкурентоспособными с химическими источниками энергии по плот-

ности запасаемой энергии (выходу энергии на единицу массы).¹³ Прочность материалов ограничивает запасы энергии в таких устройствах, как маховики или магниты, величиной, гораздо меньшей одного электронвольта на атом, что, очевидно, уступает возможностям лучших химических источников энергии или реакторов с открытым циклом.

Таким образом, для космических аппаратов системы СОИ с оружием направленной энергии на борту ядерные реакторы могут рассматриваться для боевого режима, могут оказаться полезными для обычного режима, и могут быть необходимыми для режима повышенной готовности. Бывший руководитель программы СОИ генерал Дж.Абрахамсон отмечал, что ядерные космические реакторы станут существенной составной частью второго этапа системы СОИ, и что без реакторов на орбите эта система "превратится в длинную, длинную веревочку, протянувшуюся до поверхности Земли".¹⁴

Эти соображения являются главным обоснованием проекта SP-100, хотя расчетная мощность этого реактора (100 электрических киловатт и 2,5 тепловых мегаватта) может оказаться слишком малой для многих задач СОИ; в последнее время организация программы СОИ заключила несколько контрактов на разработку мультимегаваттных реакторов.¹⁵

Исследования рабочей группы Американского физического общества и управления технических оценок Конгресса показали, что, скорее всего, космические реакторы будут необходимы для системы СОИ.^{16,17} Но последнее исследование Национального исследовательского совета пришло к выводу, что технические проблемы создания бортовых мультимегаваттных реакторов являются исключительно серьезными.¹⁸

Поскольку системы оружия направленной энергии в космосе, если они вообще окажутся возможными, будут иметь сравнительно небольшой радиус действия, боевые станции должны будут располагаться на сравнительно низких орбитах с высотой около 400 км и периодом обращения от полутора до двух часов. Для того, чтобы находиться на нужном расстоянии от любой базы межконтинентальных баллистических ракет, потребуется довольно большое число боевых станций, может быть, несколько сотен. Это означает, что в любой момент времени над каждой точкой земной поверхности будут находиться несколько действующих ядерных реакторов, с мощностью, во много раз большей, чем у современных реакторов на спутниках типа POPCAT.

ВАЖНОСТЬ ЗАПРЕЩЕНИЯ РЕАКТОРОВ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАД ВООРУЖЕНИЯМИ

Главной причиной нашего предложения по запрещению вывода ядерных реакторов на околоземную орбиту была возможность ограничения разработки и развертывания новых космических вооружений, в особенности дестабилизирующих систем стратегической противоракетной обороны или противоспутникового оружия. Поскольку обнаружить работающий реактор на околоземной орбите сравнительно просто (см. ниже), запрещение вывода реакторов в околоземное космическое пространство может стать одним из наиболее легко проверяемых способов поддержки и усиления договора по противоракетной обороне 1972 года.¹⁹

Президент Картер предложил запретить космические реакторы в 1978 году, после падения спутника "Космос-954", но это предложение не было принято СССР. Учитывая сильное стремление Советского правительства к предотвращению гонки космических вооружений, новое обсуждение такого запрета может оказаться своевременным.

В сентябре 1988 года официальный представитель Министерства иностранных дел СССР заявил делегации Федерации американских ученых, что:²⁰

"Если американское правительство предложит советскому рассмотреть взаимный отказ от использования ядерной энергии в космическом пространстве, такое предложение будет серьезно рассмотрено советской стороной."

Такое соглашение, предусматривающее отказ США от разработки реактора SP-100 для программы СОИ в обмен на прекращение использования реакторов на советских спутниках РОРСАТ и других новых реакторов, могло бы оказаться взаимовыгодным.²¹

Не исключено, что соглашение о запрете реакторов на околоземных орбитах могло бы стать частью более широкого пакета договоров по контролю над вооружениями. Например, в него могли бы быть включены ограничения на системы противоспутникового оружия, поскольку советские спутники типа РОРСАТ являются одним из основных оправданий для развития американской программы антиспутниковых систем.

ВАЖНОСТЬ ЗАПРЕЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Имеется немало дополнительных аргументов в пользу запрещения ядерных реакторов

в космосе, не связанных с контролем над вооружениями.

Как показали события со спутниками "Космос-954 и 1402", вход реакторов в плотные слои атмосферы может приводить к радиоактивному загрязнению окружающей среды.

Случайное падение неповрежденного реактора на Землю из-за аварии при запуске или при входе в атмосферу может позволить получить большое количество высокообогащенного урана-235, достаточное для изготовления нескольких атомных бомб.

Расположение реакторов на "безопасных" орбитах усложняет проблему засорения космического пространства.

Функционирование ядерных реакторов на околоземных орбитах приводит к серьезным помехам для проведения астрономических наблюдений; действующие реакторы влияют на проведение наблюдений в диапазоне гамма-лучей уже в течение нескольких лет. Обсудим кратко каждый из этих аспектов.

Радиоактивное загрязнение. Поскольку неиспользованный уран-235 не очень сильно радиоактивен, загрязнение окружающей среды при аварии при запуске или при входе в атмосферу до включения реактора будет незначительным, если при разработке реактора приняты специальные меры по предотвращению критичности при аварии и включение реактора будет проводиться только при выводе на заданную орбиту.

После того, как реактор включен, накопление долгоживущих радиоактивных продуктов деления будет приблизительно пропорционально тепловой мощности реактора, умноженной на время его работы. Мощность первого поколения реакторов серии SP-100 должна составлять около 2,5 тепловых мегаватт (примерно в 25 раз больше мощности реактора на спутнике "Космос-1900") в течение семи лет (примерно в 20 раз больше типичного времени активного существования спутника РОРСАТ); поэтому суммарная активность долгоживущих продуктов деления при входе реактора SP-100 в атмосферу может быть в сотни раз выше, чем у спутника РОРСАТ.

Поскольку влияние радиоактивного загрязнения окружающей среды сильно зависит от того, как будут распределены продукты деления, от того, где они выпадут (в верхней атмосфере или в локальной области на поверхности Земли) и в какой форме (например, каков будет размер частиц), предсказать его будет довольно трудно. Тем не менее, очевидно, что оно будет весьма серьезным.²²

Нераспространение ядерного оружия. В

современной конструкции реактора SP-100 общее количество высокообогащенного урана-235 составит около 200 кг, что в сорок раз превышает установленный Комиссией ядерного регулирования США предел, выше которого необходимы специальные меры по обеспечению безопасности хранения и транспортировки делящихся материалов. Такого количества вполне достаточно для создания существенного арсенала атомных бомб.²³

Текущие мероприятия проекта SP-100, предусматривающего возврат целого реактора, предусматривают меры по предотвращению радиоактивного загрязнения, но не уделяют достаточного внимания проблеме сохранности делящихся материалов.

В связи с проблемами несанкционированного входа космических реакторов в атмосферу организация программы СОИ развернула исследовательскую программу SIREN (спасение и выброс космических перехватчиков) для анализа возможности возвращения реакторов с низких околоземных орбит или перевода их на более высокие безопасные орбиты. Поставленные проблемы весьма сложны, поскольку незащищенные реакторы исключительно радиоактивны, а авария реактора может сопровождаться его разрушением на несколько отдельных частей. Более того, спутниковый реактор, испытавший столкновение с другим космическим объектом или подвергшийся нападению с антиспутниковых систем, может войти в земную атмосферу еще до того, как можно будет начать операцию по его спасению.

Засорение космического пространства. Число объектов искусственного происхождения на околоземных орбитах возрастает очень быстро. Североамериканская оборонительная система NORAD в настоящее время следит примерно за 6000 объектов с поперечными размерами более 10 см; по данным недавнего обзора Массачусетского технологического института, число обращающихся вокруг Земли объектов с размерами более 1 см составляет примерно 48 тысяч.²⁴ Поскольку относительная скорость объектов на орбите может превышать 10 км/с (в десять раз больше скорости винтовочной пули), столкновение с "космическим мусором" представляет серьезную опасность для космических аппаратов вообще и для ядерных реакторов в частности. Согласно Н.Джонсону:²⁵

"Разрушение радиоактивного спутника в результате гиперскоростного удара не только не позволит обезвредить этот спутник в будущем, но и создаст непосредственную опасность для пилотируемых и автоматических космических аппаратов. В результате разрушения

советского ядерного реактора при высокоскоростном ударе может образоваться до миллиона частиц с размером от одного миллиметра и выше."

Очевидно, что при учете долговременных последствий расположение отработавших свой ресурс ядерных реакторов на "безопасных" орбитах неприемлемо, поскольку это значительно усложняет и без того серьезную проблему засорения космического пространства.

Помехи астрономическим наблюдениям. Серьезной помехой астрономическим наблюдениям расположенных на больших расстояниях слабых объектов является фоновое излучение естественного и искусственного происхождения, интенсивность которого увеличивается вблизи Земли (например, из-за гроз и радиосвязи). Ядерные реакторы на околоземной орбите вносят в фоновое излучение заметный вклад. Они являются очень мощными источниками теплового инфракрасного излучения, поскольку процесс преобразования тепловой энергии в электрическую сравнительно неэффективен и значительная часть выделяющегося в реакторе тепла должна быть излучена в космическое пространство.

Космические реакторы являются мощными источниками нейтронов и гамма-лучей; на них устанавливается только анизотропная защита, предохраняющая от излучения полезную нагрузку.

Ученые НАСА недавно обнаружили, что прибор на спутнике SMM (миссия солнечного максимума), выведенном на орбиту в 1980 году, регистрировал гамма-излучение реакторов ПОРСАТ, и, кроме того, обнаружил позитроны, образующиеся при взаимодействии гамма-лучей высоких энергий с внешней оболочкой реактора.²⁶ Часть образующихся позитронов захватывалась в магнитном поле Земли, образуя искусственные радиационные пояса. Когда другой спутник проходит через этот позитронный пояс, позитроны аннигилируют с электронами его корпуса и образуют гамма-кванты с высокой проникающей способностью. Эксперимент по регистрации всплесков космического гамма-излучения на японском спутнике "Ginga" не мог работать в течение примерно 20% времени из-за влияния позитронов от космических ядерных реакторов. Влияние этих позитронов будет представлять серьезную проблему для большой американской астрономической обсерватории GRO, запуск которой намечен на 1990 год, и для других космических аппаратов.

Правовая основа использования космических реакторов. Несмотря на загрязнение окружающей среды и на случившиеся инци-

денты, правового механизма для регулирования использования ядерной энергии в космическом пространстве в настоящее время практически не существует. Комитет ООН по мирному использованию космического пространства предлагал основные направления регулирования, но до сих пор решения принимаются на уровне национальных правительств. В Соединенных Штатах отсутствует процедура выдачи лицензий на космические ядерные реакторы, за исключением секретного обзора, подготавливаемого межведомственной группой по ядерной безопасности; эта группа публикует в открытой печати только окончательный отчет по оценке безопасности. В такой ситуации простейшим способом решения правовых проблем было бы полное запрещение ядерных реакторов на орбите.

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ

Ядерные реакторы могут сыграть важную роль в решении проблем освоения космического пространства. Одна из сравнительно близких задач представляется особенно актуальной: обеспечение электроэнергией обитаемой лунной базы. Масса реактора должна быть значительно меньше, чем масса накопителей энергии, необходимых для поддержания базы в течение длинной лунной ночи, продолжительность которой составляет около 14 суток на всей поверхности Луны, за исключением небольших приполярных областей.²⁷ Реактор для лунной базы для защиты от излучения должен быть засыпан лунным грунтом; охлаждение реактора будет обеспечиваться циркуляцией охладителя между рабочей зоной и радиаторами, расположенными на поверхности Луны. Вместо использования готового проекта космического реактора типа SP-100, по видимому, будет более целесообразно разрабатывать новый проект, специально приспособленный к лунным условиям.

Среди прочих применений ядерных реакторов в мирных целях следует отметить их использование на космических аппаратах, предназначенных для исследования удаленных областей Солнечной системы, где интенсивность излучения Солнца очень мала.

Важно подчеркнуть, что запрет ядерных реакторов на околоземных орбитах не должен повлиять на возможность их применения в этих важных проектах. Может быть, в договоре должно быть предусмотрено разрешение испытаний реакторов для изучения дальнего космоса на околоземных орбитах.

В помещенной в данном выпуске статье Розена и Шнайера на рис.1 приведен подго-

товленный НАСА перечень различных применений ядерных реакторов в мирном использовании космического пространства. Большинство указанных проектов относится к исследованиям Луны, Марса и дальних планет Солнечной системы. Тем не менее, в него входят и предложения по использованию ядерных энергетических установок на комплексе орбитальной станции, платформе для производства материалов, радиолокатора для контроля за воздушным сообщением над океанами и двигательной установки для космического буксира. Обсудим вкратце каждое из возможных направлений применения гражданских ядерных реакторов на околоземных орбитах.

Космическая станция. В настоящее время ядерные энергетические установки не включены в состав американской космической станции; ее электропитание должно обеспечиваться солнечными установками (комбинацией фотовольтаических солнечных батарей и динамическими установками, преобразующими тепло жидкого рабочего тела, нагреваемого фокусирующими излучение Солнца зеркальными коллекторами).

В этой ситуации любое весовое преимущество ядерных источников энергии будет потеряно из-за необходимости массивной защиты вокруг ядерного реактора для предотвращения дополнительного облучения экипажа, в особенности при работе вне обитаемых отсеков и при стыковке с транспортным космическим кораблем. Масса защиты от нейтронов (например, из гидрида лития) сравнительно невелика, но изотропная защита от гамма-излучения реактора SP-100 для создания безопасной зоны деятельности космонавтов будет эквивалентна слою свинца или вольфрама толщиной около 20 см, масса которого будет составлять около 45 тонн, что примерно в десять раз больше общей массы реактора, теплового радиатора и служебных систем.

Платформа для производства материалов. Потребности в крупномасштабном производстве материалов в условиях невесомости до сих пор остаются неопределенными. В любом случае необходимые требования по тепловой и электрической энергии для производства материалов могут быть удовлетворены фотовольтаическими солнечными элементами, коллекторами излучения Солнца и динамическими энергоустановками. В этом случае также будут применимы аргументы против использования ядерной энергии, справедливые для космической станции, по крайней мере, для первого поколения платформ, обслуживаемых космонавтами.

Радиолокатор для контроля воздушного сообщения. Поскольку эффективность ради-

олокаторов быстро уменьшается с расстоянием, они должны размещаться не на геостационарных орбитах, а на орбитах малой высоты. Поэтому на орбиту должно быть выведено достаточно много спутников с реакторами, для того, чтобы в каждый момент времени над основными воздушными маршрутами находилась одна или две станции. Гораздо более простое решение может заключаться в установке на всех самолетах надежных передатчиков, которые посылают ответный сигнал, который позволит определить параметры движения самолета.

Космический буксир. Ускорение ионизированного рабочего тела реактивного двигателя под действием электрических или магнитных полей до скоростей, больших, чем те, которые можно получить в результате химических реакций, позволит сократить необходимую массу рабочего тела. Из-за ограниченной мощности реактора такие космические буксиры смогут двигаться только с малым ускорением, но общая концепция выглядит привлекательной. Однако, и в этом случае солнечные батареи являются серьезной альтернативой ядерным реакторам. Возможен и другой вариант, в котором применяется тепловой механизм разгона рабочего тела в вольфрамовом фокусе солнечного коллектора, нагреваемого до температуры около 3000 К. Соответствующая тепловая скорость рабочего тела (водорода) составит около 7 км/с. При этом удельный импульс достигнет весьма солидной величины в 700 секунд, заметно большей, чем у лучших химических топлив.²⁸

Мы можем утверждать, что для всех ближайших космических проектов гражданского назначения на околоземных орбитах может быть найдена альтернатива ядерным источникам электроэнергии. Более того, согласно недавно проведенным в Советском Союзе оценкам, имеющие серьезные основания считать, что солнечная энергия является наиболее безопасным и надежным источником электропитания даже для больших проектов по исследованию Марса.²⁹ Только при выходе за орбиту Марса солнечное излучение становится недостаточно ярким для того, чтобы обеспечить надежное электропитание космических аппаратов.

Из-за неопределенности предсказаний дальнейшего развития техники было бы целесообразно проводить регулярные обзоры состояния дел в данной области и, если возникнет необходимость, обсуждать изменения в договоренностях об ограничении космических реакторов каждые десять или пятнадцать лет.

Мы попробовали также определить, существуют ли необходимые для национальной

безопасности проекты разведывательных спутников, на которых должны быть установлены ядерные реакторы.

В многочисленных обсуждениях с военными, находящимися на действительной службе или в отставке, а также с известными специалистами нам не удалось обнаружить таких проектов. Более того, многие из них считают, что предлагаемое нами запрещение вывода ядерных реакторов на околоземные орбиты не затронет национальной безопасности обеих сторон.

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО СОГЛАШЕНИЯ

В нескольких работах, помещенных в этом выпуске журнала, приведено детальное обсуждение технических деталей возможности верификации соглашения по запрещению вывода ядерных реакторов на околоземные орбиты. На основании этого анализа мы пришли к выводу, что проверка такого соглашения вполне осуществима. Космическое пространство открыто для наблюдений и спрятать мощный реактор практически невозможно.

Наиболее надежно регистрируемым сигналом от работающего реактора является его тепловое излучение, в основном сосредоточенное в инфракрасной области спектра (некоторая часть излучения может попадать и в видимую область). Так, например, при расчетной температуре радиаторов реактора SP-100 площадью 100 квадратных метров они должны будут светиться темно-красным цветом.

Несмотря на то, что атмосфера непрозрачна в большей части инфракрасного диапазона длин волн, в нем имеются так называемые "окна прозрачности", в которых можно проводить наблюдения либо с поверхности Земли, либо при помощи инфракрасного телескопа, установленного на самолете. Даже при помощи оборудования оптической станции ВВС США на острове Мауи, в котором используются не самые последние технические достижения, работающий ядерный реактор можно обнаружить на расстояниях, значительно больших расстояния до геостационарной орбиты (40 000 км).³⁰

Хотя наблюдения в инфракрасном диапазоне сами по себе вполне достаточны для обнаружения реакторов, наблюдения ядерных излучений позволяют подтвердить, является ли обнаруженный тепловой источник действующим реактором. Как отмечалось выше, довольно простые технические средства на спутнике SMM позволили обнаружить излучение спутников РОРСАТ, и, согласно нашим расчетам, более чувствитель-

ные детекторы, подобные телескопу COMPTEL на обсерватории гамма-лучей GRO позволяют надежно обнаружить даже защищенный реактор.³¹

При необходимости в дополнение к небольшому числу чувствительных детекторов гамма-излучения на астрономических спутниках можно будет установить несколько небольших специализированных детекторов на других спутниках с различными орбитами; эти приборы будут использоваться только для проверки соглашения о запрещении ядерных реакторов на околоземных орбитах.

Нейтроны от ядерного реактора могут быть обнаружены на расстояниях в несколько тысяч километров при использовании специально разработанных детекторов.³²

Обнаружение реакторов, выведенных на орбиту, но еще не включившихся, является более сложной проблемой по сравнению с обнаружением работающих или недавно выключенных реакторов. В этом случае наиболее эффективным способом проверки выполнения договора будет инспекция космических аппаратов перед их запуском. Однако, весьма маловероятно, что та или другая сторона пойдет на расходы в миллиарды рублей или долларов и запуск реактора и обслуживаемого им оборудования до проведения детальных испытаний мощных реакторов в космическом пространстве. И, как мы отмечали ранее, эти испытания могут быть обнаружены.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕАКТОРОВ В КОСМОСЕ

Возможны несколько вариантов ограничений на космические реакторы, которые могут рассматриваться на переговорах между заинтересованными правительствами. Мы обсудим вкратце четыре альтернативных варианта ограничений на использование ядерных реакторов. Сводка предложений приведена в табл.1.

Прежде чем перейти к описанию этих четырех режимов, мы приведем основные аргументы против вывода реакторов на околоземные орбиты, на которых основаны альтернативные варианты.

Реакторы имеют потенциальную значимость для электропитания некоторых видов космических вооружений в режиме повышенной готовности, включающих несколько разновидностей противоракетных вооружений.

При эксплуатации примерно 15% реакторов, выведенных на орбиту в прошлые годы, возникали неисправности или аварии. При входе космических реакторов в атмо-

сферу может произойти загрязнение окружающей среды; кроме того, при неполном разрушении реактора возникает возможность незаконного доступа к большому количеству урана-235, достаточного для изготовления нескольких атомных бомб.

"Безопасные" орбиты хранения ядерных реакторов на самом деле не являются безопасными. Вокруг Земли уже обращаются тысячи объектов искусственного происхождения ("космический мусор"), угрожающих безопасности космонавтов и спутников, за создание которых наши потомки вряд ли будут нам благодарны.

Вариант I:

ЗАПРЕТ ВСЕХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В КОСМОСЕ НА ОПРЕДЕЛЕННЫЙ ПЕРИОД ВРЕМЕНИ

Преимуществами этого режима являются полнота и простота. Он предотвращает возможность внезапного выхода из договора, представляющего заметную военную угрозу, запрещая исключения для реакторов для лунных и планетных проектов и испытания прототипов этих реакторов на околоземных орбитах. Для дополнительной защиты этого режима договора можно предусмотреть запрещение испытаний в космосе основных элементов систем космических реакторов, например, радиаторов для сброса избыточного тепла.

После определенного периода времени (например, пятнадцати лет) при необходимости можно будет провести дополнительные переговоры по изменению соглашения. Это позволит принять во внимание изменение политической или технической ситуации.

Потенциальная проблема этого варианта может быть связана с его излишней полнотой. Слишком жесткие меры, может быть, и достигнут своих целей, но при этом они могут запретить больше, чем это необходимо.

Вариант II:

ЗАПРЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ И РАЗРЕШЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ ЛУНЫ И ПЛАНЕТ

Эта версия договора об ограничениях на космические реакторы была включена в предложение ФАУ и КСУ (см. приложение).³³ Тем не менее, этот режим позволяет использовать прикрытие лунных и планетных проектов для подготовки технической основы последующего выхода из договора и разра-

Таблица 1

Альтернативные варианты правового регулирования космических ядерных реакторов

| | I | II | III | IV |
|--|---|---|--|--|
| | Запрет всех космических реакторов на 15 лет | Запрет всех реакторов вблизи Земли и разрешение испытаний в дальнем космосе | Запрет всех реакторов вблизи Земли ^а и разрешение мирного использования в дальнем космосе | Запрет реакторов только на низкой орбите |
| Запрет ПОРСАТ | да | да | да | да |
| Ограничение СОИ | да | да | да | ? |
| Предотвращение угрозы внезапного технического прорыва | да | нет | нет | нет |
| Предотвращение падения реакторов на Землю | да | да ^б | да ^б | да ^б |
| Уменьшение засоренности космоса | да | в основном | нет | нет |
| Разрешение реакторов для Луны и дальнего космоса | в | да | да | да |
| Защита гамма-астрономии | да | в основном | нет | нет |
| Правовая четкость | да | ? | нет | да |
| ^а Под низкой орбитой понимается орбита с высотой менее 800 километров. ^б За исключением столкновений. ^в В этом периоде таких проектов с ядерными реакторами не планируется. | | | | |

ботки космических вооружений на основе ядерной энергетики. Оба варианта (I и II) запрещают использование реакторов на околоземных орбитах в мирных целях, но до сих пор неясно, существуют ли вообще потребности в реакторах для проектов такого рода. Повторные переговоры через 10-15 лет позволят исключить эту неопределенность, тем более, что в течение ближайшего периода гражданских проектов с мощными ядерными реакторами на околоземной орбите не предвидится.

Вариант III:

ЗАПРЕТ РЕАКТОРОВ НА ОРБИТАХ НИЖЕ 800 КМ И РАЗРЕШЕНИЕ МИРНЫХ РЕАКТОРОВ НА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ

Несмотря на то, что этот режим позволяет исключить возникновение некоторых

проблем с защитой окружающей среды, он основан на понятии "безопасных" орбит, которые, как показало предыдущее обсуждение, не являются полностью безопасными, и, кроме того, разрешает запуск реакторов, способных сильно повлиять на проведение астрономических наблюдений в диапазоне гамма-излучения. Кроме того, этот режим не позволяет снять все вопросы, связанные с контролем космических вооружений.³⁴

Вариант IV:

ЗАПРЕТ РЕАКТОРОВ НА НИЗКИХ ОРБИТАХ

Этот режим в первую очередь позволяет решить проблемы окружающей среды. Он проще предыдущего варианта III, поскольку он не требует определения допустимой деятельности на высоких орбитах, но он не может предотвратить военного использования

более высоких орбит, включая использование в целях противоракетной обороны. Варианты I и II наиболее полно учитывают проблемы контроля вооружений в ограничениях использования космических ядерных реакторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие были шокированы, узнав о том, что над ними постоянно летают более тридцати ядерных реакторов, большинство из которых уже выключено, но до сих пор сильно радиоактивно. Эти реакторы были переведены на более высокие орбиты хранения и присоединились к большому количеству кусочков "космического мусора", обращающихся вокруг Земли со скоростью в 25 тысяч километров в час. Столкновение с любым достаточно крупным таким объектом может повести образующиеся обломки ядерного реактора на более низкие орбиты, вплоть до орбит входа в атмосферу, задолго до того, как истечет расчетное время существования реактора на орбите хранения.

Соглашение, останавливающее вывод ядерных реакторов на околоземные орбиты, не только устранил эту угрозу, но и принесет значительную пользу процессу контроля над вооружениями. Оно приведет к остановке советской программы РОРСАТ, используемой Соединенными Штатами для оправдания собственной программы развития антиспутникового оружия. Кроме того, оно существенно ограничит работы по программе СОИ.

СОИ представляет собой серьезную проблему для контроля над вооружениями. Соглашения по запрещению ряда компонентов системы СОИ очень трудно проверить. Но у боевых орбитальных станций программы СОИ имеется "ахиллесова пята" это реакторы, которые могут оказаться необходимыми для их энергоснабжения.

Запрещение вывода реакторов на околоземные орбиты может поэтому стать заметным вкладом в предотвращение гонки космических вооружений.

Космос — это важная область деятельности человека, и процесс его загрязнения и милитаризации только начался. Необходимость правового регулирования ядерной энергетики давно осознана благодаря существующей опасности ее неконтролируемого развития. Мы полагаем, что время подготовки и заключения соглашения о запрещении ядерных реакторов в космосе уже пришло.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы провели полезные обсуждения

рассматриваемых в данной статье вопросов с многими людьми, в частности, с Л. Алленом, С. Дреллом, Р. Гарвином, Ф. Лэмбом, Т. Морганом, У. Панофски, Дж. Пайком, Т. Постолом, Р. Розеном, Т. Тэйлором, А. Васильевым и Р. Вудрафом. Предварительное изучение возможности обнаружения реакторов по их инфракрасному излучению было проведено Л. Энсман. Мы благодарны также Р. Финстону, Ю. Петрову и Ф. Шляхтеру за ознакомление с результатами их исследований по загрязнению окружающей среды радиоактивными выбросами из космических ядерных энергетических установок.

ПРИЛОЖЕНИЕ: ПРЕДЛОЖЕНИЕ ФАУ И КСУ (МАЙ 1988 ГОДА)

Предложение о запрещении использования ядерной энергии на околоземных орбитах, которое мы выдвигаем по поручению наших организаций (после двух совместных рабочих совещаний) явилось следствием наших усилий по предотвращению радиоактивного загрязнения поверхности Земли и расширения гонки вооружений в космическое пространство. В частности, предлагаемое соглашение должно предотвратить использование ядерных реакторов на околоземных орбитах для любых целей, для оборонительных и для наступательных, включая применение ядерных реакторов на разведывательных спутниках.

Использование ядерной энергии в космосе находится на ранней стадии развития, но уже на этой стадии произошли непредвиденные события, вызвавшие обеспокоенность мировой общественности.

Соглашение о запрещении вывода ядерных реакторов на орбиту должно стать серьезным препятствием для развития гонки вооружений в космосе, поскольку ядерные реакторы являются компактными источниками энергии, необходимыми для решения многих военных проблем. В то же время, для космических проектов мирного назначения на околоземных орбитах солнечные энергетические установки и топливные элементы останутся более удобными и безопасными источниками энергии на протяжении обозримого периода времени. Соглашение может разрешать применение энергетических радиоизотопных установок с мощностью ниже согласованного безопасного предела.

Запрещение ядерных реакторов на околоземных орбитах не будет препятствовать применению ядерной энергии для научных проектов исследования удаленных областей Солнечной системы и проведению ограниченного количества испытаний прототипов

этих установок на околоземных орбитах при определенных мерах предосторожности.

Проверка соглашений по ограничению использования ядерной энергии на околоземных орбитах будет сравнительно простой, поскольку действующий (или недавно выключенный) ядерный реактор будет мощным источником инфракрасного излучения, гамма-лучей и нейтронов.

Поэтому мы призываем к заключению международного соглашения по запрещению использования ядерной энергии на околоземной орбите; обе наши организации планируют продолжить работу над анализом технических аспектов этого соглашения в рамках совместного проекта по верификации соглашений по контролю над вооружениями.

Роальд Сагдеев, председатель Комитета советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы.

Фрэнк фон Хиппель, председатель исследовательского сектора Федерации американских ученых.

13 мая 1988 года

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Информация об авторах статьи:
Джозел Р. Примак, физический факультет Калифорнийского университета в Санта-Круз, Санта-Круз, СА 95064
Нэнси Э. Абрамс, адвокат, журналист, 101 Ланс Корт, Санта-Круз, СА 95065
Стивен Афтергуд, федерация Американских ученых, 307 Массачусетс Авеню, Вашингтон, DC 20009
Дэвид У. Хафемейстер, центр международной безопасности и контроля над вооружениями, Стэнфордский университет и физический факультет, Политехнический университет штата Калифорния, Сан Луис Обиспо, СА 93407
Дэниэл О. Хирш, федерация Американских ученых, 307 Массачусетс Авеню, Вашингтон, DC 20009
Роберт Мозли, центр Стэнфордского линейного ускорителя, Стэнфорд, СА 94309
О.Ф. Прилуцкий, С.Н. Родионов и Р.З. Сагдеев, Институт космических исследований Академии Наук СССР, 117810, Москва, Профсоюзная, 84/32
2. В Соединенных Штатах Америки применялись также радиоизотопные тепловые генераторы, в которых генерация электроэнергии обеспечивалась теплом, выделяемым при радиоактивном распаде плутония-238. Эти устройства были установлены на 22 космических аппара-

тах, выведенных на орбиту между 1961 годом и концом семидесятых годов. На некоторых из этих установок произошли серьезные неполадки, в частности, при неудачном запуске установки SNAP 9A произошло глобальное загрязнение атмосферы плутонием. Несколько радиоизотопных генераторов использовались также в Советском Союзе. В данном обзоре эти установки больше не обсуждаются, поскольку имеющиеся программы предусматривают их использование только на космических аппаратах, запускаемых к дальним планетам. Более подробное обсуждение этого вопроса, включая историю создания космических ядерных энергетических установок в США и СССР, приведено в статье С.Афтергуда "Основы космической ядерной энергетики".

3. Министерство обороны США, Советская военная мощь (Вашингтон, Издательство правительства США, 1987), стр.53. Для противодействия космической радиолокационной разведке ВМС США применяют разные методы, включающие маскирующие маршруты перемещений, ложные цели, создающие фиктивные радиолокационные изображения, и глушение; см., например, статью Пола Стэйрса "Контроль за антиспутниковыми вооружениями в общей перспективе безопасности" в сборнике "Поиск стабильности в космосе: антиспутниковое оружие и развитие правового режима в космосе", под редакцией Дж.Най и Дж.Шира (Юниверсити Пресс оф Америка, 1987), стр.117.
4. См., например, заметки У.Броуда в Нью-Йорк Таймс от 14 мая 1988 года (стр.2) и К.Сойер в Вашингтон Пост от 14 мая 1988 года (стр.А3).
5. Правда, 29 сентября 1988 года; см. также отчет Госкомитета по использованию атомной энергии СССР, представленный в Международное агентство по атомной энергии (этот отчет содержится в телеграмме американской миссии в Вене в Госдепартамент США от 27 сентября 1988 года).
6. Б.Бартрам и Р.Энглехарт, Предстартовая оценка риска для спутника "Космос-1900, отчет NUS-5148, подготовленный для управления специальных программ Министерства энергетики США 17 октября 1988 года по контракту DE-AC01-87NE32134.
7. См. статью С. Афтергуда в этом выпуске.
8. У.Броад, "Русские сообщают о новом типе реактора на борту спутника", Нью-Йорк Таймс, 15 января 1989 года, стр.1;

- Н.Н.Пономарев-Степной, "Ядерная энергия в космосе", и Г.М.Грязнов и др., "Термоионные реакторы для космической ядерной энергетики", доклады, представленные на шестой симпозиум по космическим ядерным энергетическим установкам, Альбукерке, Нью-Мексико, 9 - 12 января 1989 года.
9. См., например, Joseph A. Angelo, David Buden, "Space Nuclear Power", Malabar, Florida, Orbit Book Co., 1985.
 10. Комитет по перспективным ядерным установкам Совета по энергетическому машиностроению комиссии по машиностроению и техническим системам Национального исследовательского совета, Перспективные ядерные системы для портативных источников энергии в космосе (Вашингтон, Издательство Национальной Академии, 1983), стр.37.
 11. Выступление Дж.Вогана, действующего помощника секретаря Министерства энергетики США по ядерной энергетике, на слушаниях подкомиссии по исследованиям в области энергетики и производству энергии Комитета по науке и технике Палаты представителей Конгресса США "Ядерная энергетика, преобразование и накопление энергии в космосе в девяностых годах и позже", октябрь 1985 года, стр.68.
 12. См. статью О.Ф.Прилуцкого и С.Н.Родионова "Военное значение космической ядерной энергетики и опасность загрязнения окружающей среды" в этом же номере журнала.
 13. Отчет Американского физического общества "Научные и технические проблемы создания оружия направленной энергии", *Reviews of Modern Physics*, 59, номер 3, часть II, глава 8 (июль 1987 года). См. также указанную ниже статью О.Ф.Прилуцкого и С.Н.Родионова. В реакторах замкнутого цикла происходит рециркуляция охладителя; в реакторах открытого цикла охладитель после производства электроэнергии выбрасывается. Примером реакторов открытого цикла могут служить ракетные ядерные двигатели. Очевидной потенциальной проблемой использования ядерных реакторов или химических установок открытого цикла является возможность загрязнения окружающей среды.
 14. В. Spice, "SDI Looks to Nuclear Power", *Albuquerque Journal*, 12 January 1988, p. A1.
 15. См. статью С. Афтергуда в этом выпуске.
 16. См. ссылку 13.
 17. SDI: Technology, Survivability and Software, Washington, DC, US Government Printing Office, May 1988, OTA-ISC-353, p. 155.
 18. Комитет по перспективным ядерным установкам совета по энергетическому машиностроению комиссии по машиностроению и техническим системам Национального исследовательского совета, Перспективные источники энергии для космических проектов, (Вашингтон, Издательство Национальной Академии, 1989). Краткая сводка этого доклада приведена в статье У.Броада "В противоракетном щите появились новые прорехи", *Нью-Йорк Таймс*, 19 января 1989 года.
 19. См. заметку Дж.Пайка "Цели договора по ПРО", Публичный отчет Федерации американских ученых, 40, номер 7 (сентябрь 1987 года).
 20. В делегацию ФАУ входили Нэнси Абрамс, Дэниэл Хирш, Джон Пайк и Джозел Примак, сопровождаемые Е.Ф.Лощенковой из КСУ; 8 сентября 1988 года эту делегацию принимал Б.Г.Майорский из Министерства иностранных дел СССР. Более подробное описание встречи приведено в выступлении Дэниэла Хирша перед Комитетом по энергии и природным ресурсам Сената США 13 сентября 1988 года.
 21. Заявление ТАСС от 17 октября 1988 года, цитированное в заметке "В Советском Союзе обращено внимание на увеличение применения ядерной энергии в космосе", *Aerospace Daily*, 18 октября 1988 года, стр.82. См. также ссылку 7.
 22. В ходе совместного проекта ФАУ и КСУ по космической ядерной энергетике было проведено два исследования экологических последствий входа космического ядерного реактора в атмосферу. Оценки, проведенные Ю.В.Петровым и А.И.Шляхтером из Ленинградского института ядерной физики и С.Н.Родионовым из Института космических исследований (Возможные экологические последствия входа космического ядерного реактора в атмосферу, ноябрь 1988 года, можно получить в Комитете советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы в Москве) были основаны на предположениях "наихудшего варианта": загрязнение нижних слоев атмосферы радиоактивными продуктами реактора класса SP-100 над крупным сельскохозяйственным районом при потреблении зараженных пищевых продуктов. Вывод этого исследования таков: "при неблагоприятных условиях долговременные радиологические по-

- следствия могут быть сравнимы с соответствующими последствиями аварии в Чернобыле". Второе исследование было проведено Р.Финстоном, руководителем отделения медицинской физики и радиационной безопасности Стэнфордского университета; оно было основано на предположении глобального рассеяния радиоактивных продуктов при разрушении активной зоны реактора в верхних слоях атмосферы. Расчеты проводились в соответствии с данными анализа радиоактивных осадков от испытаний ядерного оружия в атмосфере, проведенного Научным комитетом ООН по эффектам влияния ядерных излучений (UNSCEAR, см. Ионизирующие излучения: источники и биологические эффекты, UNSCEAR, отчет Генеральной ассамблеи ООН 1982 года, приложение E, Нью-Йорк, ООН, 1982). Финстон оценил, что при этих предпосылках величина экологических последствий аварии космического реактора будет на три-четыре порядка меньше, чем в худшем варианте. Следует учесть, однако, что факторы риска из отчета UNSCEAR могут быть занижены примерно на порядок величины (Д.Хоффман, Э.Рэдфорд, Обзор канцерогенных эффектов малых доз ионизирующего излучения, Филадельфия, фонд общественного здравоохранения Три Майл Айленд, 1985), и что реакторы, более крупные, чем SP-100 (например, мультимегаваттные реакторы), работающие в течение сравнимых или более длительных промежутков времени, накопят большее количество радиоактивных продуктов. Очевидно, что если при входе в атмосферу и столкновении с земной поверхностью реактор не разрушится, то широкомасштабного загрязнения окружающей среды не произойдет. Как советские исследователи, так и Финстон отмечают, что рассеяние плутония-238 из радиоизотопного термогенератора DIPS (динамический изотопный источник энергии), разрабатываемого для нужд программы СОИ (см. статью С. Афтергуда в этом номере журнала), в атмосфере приведет к исключительно серьезным последствиям (этот вопрос обсуждается также в статье О.Ф. Прилуцкого и С.Н. Родионова).
23. Документ NASA/SDIO/DoE "План программы безопасности наземных технических систем SP-100" от 3 ноября 1986 года. Цитировано в докладе Комитета по перспективной космической технике Космическая технология и будущие проблемы (Вашингтон, 1987), стр. 87-89.
24. М.Уолдроп, "Возврат ночи", Science, 241, стр.1288 (9 сентября 1988 года). См. также Н.Джонсон, Д.МакНайт "Искусственный космический мусор" (Малабар, Флорида, Орбит Бук Компани, 1987).
25. Nicholas L. Johnson, "Nuclear Power Supplies in Orbit", Space Policy, vol. 2, 1986, p. 223.
26. А.Ритц, менеджер программы обсерватории гамма-лучей, Всплески гамма-излучения, памятная записка НАСА от 29 августа 1988 года. Дополнительная информация получена из обсуждения этой проблемы с Э.Чаппом и Дж.Керфессом на конференции по астрономическим наблюдениям высокого разрешения в диапазоне гамма-лучей, состоявшейся в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе 4 октября 1988 года, и из замечаний Р.Уайта при обсуждении результатов наблюдений того же эффекта на гамма-телескопе с высотного аэростата. Подробное обсуждение влияния космических ядерных реакторов на астрономические наблюдения в гамма-диапазоне приводится в следующих работах: Т.О'Нил и др., "Наблюдения ядерных реакторов на спутниках при помощи аэростатного гамма-телескопа", Science, 244, стр.451 (1989), Э.Риглер и др., "Всплески искусственного происхождения, наблюдавшиеся на гамма-спектрометре спутника SMM", Science, 244, стр.441 (1989), Дж.Шеа и др., "Геомагнитное происхождение всплесков частиц от спутников с ядерными энергетическими установками", Science, 244, стр.444 (1989). Дополнительные аспекты обсуждаются в статье Дж.Примака, Ф.Пинто и О.Ф.Прилуцкого "Обнаружение космических реакторов по их нейтронному и гамма-излучению" в этом номере журнала и в работе О.Ф.Прилуцкого и М.Н.Фоменковой "Влияние космических ядерных реакторов на астрофизику высоких энергий" (Комитет советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы). Этому вопросу было посвящено большое количество сообщений, например, М.Баринага, "Реакторы на орбите создают проблемы для астрономов", Nature, 336, 17 ноября 1988 года, стр.192.; У.Брод, "Излучение советского ядерного реактора создает помехи американскому научному спутнику", Нью-Йорк Таймс, 17 ноября 1988 года; М. Уолдроп, "Космические реакторы угрожают гамма-астрономии", Science, 242, 25 ноября 1988 года, стр.1119; С.Доутон-Эванс,

- "Советские ядерные установки могут нарушить исследования по гамма-астрономии", Монитор Лос-Аламоса, 1 февраля 1989 года, стр.1-6.
27. А.Фридландер, К.Коул, "Требования к энергоснабжению в проектах лунной базы", Симпозиум по лунным базам и космической деятельности в двадцать первом столетии, апрель 1988 года, документ LBS-88-211. Отчет фирмы Игл Инжиниринг, Инкорпорейтед, Концептуальное проектирование солнечной энергетической установки для лунной базы, подготовленный для НАСА 14 августа 1988 года.
 28. Удельный импульс - это отношение тяги, измеренной в килограммах силы, к расходу рабочего тела, измеренному в килограммах массы в секунду; эта величина приблизительно равна v/g , где v - скорость выбрасываемого рабочего тела, а g - ускорение свободного падения на поверхности Земли.
 29. Эти исследования отмечались также в докладе Р.Сагдеева, представленном на слушаниях по космической ядерной энергетике в Комитете по энергии и природным ресурсам Сената США от 13 сентября 1988 года.
 30. См. статью Д.Хафемейстера "Слежение за космическими ядерными энергетическими установками в инфракрасном диапазоне" в этом номере журнала.
 31. См. статью Дж. Примака, П. Пинто и О.Ф. Прилуцкого в этом выпуске.
 32. См. неопубликованный отчет Р.Мозли "Обнаружение космических ядерных реакторов по нейтронному излучению", подготовленный для Федерации американских ученых 28 ноября 1988 года.
 33. Предложение ФАУ и КСУ от 13 мая 1988 года относилось к запрещению использования ядерных источников энергии на низкой орбите, включающих как реакторы, так и радиоизотопные генераторы (за исключением тех, количество радиоактивного вещества в которых не превосходит согласованного безопасного предела).
 34. Комитет ООН по мирному использованию космического пространства предпочитает этот вариант, поскольку он ограничивает свои задачи "мирным" использованием космоса и передает рассмотрение вопросов контроля над вооружениями Комитету по разоружению. Этот комитет не ставит под вопрос необходимость применения ядерных реакторов на орбите в мирных целях и обращает основное внимание на повышение безопасности. Ведущую роль в этом движении играет Канада; ее позиция заключается в том, что необходимо усиление мер безопасности, и что требуются дополнительные технические решения, связанные с возвращением выключенных реакторов на Землю. Характерное для этого варианта требование определения верхней границы низких орбит и разрешенных видов деятельности спутников с ядерными энергетическими установками вызывает серьезные правовые проблемы. До сих пор в Комитете ООН по мирному использованию космического пространства консенсуса по требуемым определениям достигнуто не было.