



Генеральная Ассамблея

Distr.  
GENERAL

A/AC.105/659/Add.1  
6 February 1997

RUSSIAN  
Original: ENGLISH

---

КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КОСМИЧЕСКОГО  
ПРОСТРАНСТВА В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ

**НАЦИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОБЛЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА  
БЕЗОПАСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВ С ЯДЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ  
ПРОБЛЕМЫ СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
С КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ**

**Записка Секретариата**

**Добавление**

1. В своей вербальной ноте от 19 июля 1996 года Генеральный секретарь предложил всем государствам-членам представить информацию относительно национальных исследований по проблеме космического мусора, безопасного использования спутников с ядерными источниками энергии и проблем столкновения ядерных источников энергии с космическим мусором.
2. В настоящем документе содержится информация, представленная в ответах государств-членов, полученных в период с 7 декабря 1996 года по 6 февраля 1997 года.

**СОДЕРЖАНИЕ**

	<u>Страница</u>
ОТВЕТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ОТ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ .....	2
Германия .....	2

## ОТВЕТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ОТ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ

### Германия<sup>\*</sup>

[Подлинный текст на английском языке]

Германия внимательно следит за ходом обсуждений в рамках плана работы Научно-технического подкомитета Комитета по использованию космического пространства в мирных целях (КОПУОС) по проблеме космического мусора. Германия уже вносила вклад в такую деятельность, в частности путем представления технических докладов, и высоко оценивает собранную к настоящему времени информацию. Результаты такого рода работы будут иметь большое значение для разработки последующих подходов в области исследования проблемы космического мусора и предотвращения засорения. Приводимый ниже доклад, в котором продолжено описание проводимых Германией мероприятий, изложенных в последний раз в документе A/AC.105/619/Add.1 от 1 февраля 1996 года, следует рассматривать в качестве еще одного вклада в этот процесс.

Космические научные исследования Германии ведутся либо на национальной основе, либо финансируются в рамках контрактов с Европейским центром космических исследований и технологий (ЭСТЕК) и Европейским центром космических операций (ЕСОК) Европейского космического агентства (ЕКА). Научные исследования проводятся прежде всего в а) Институте механики полета и космической техники Брауншвейгского технического университета (ИФР/ТУБС) и б) Центре прикладных научных исследований Вахтберг-Верховена (ФГАН). Основные результаты научных исследований, проведенных этими учреждениями в 1996 году, представлены ниже соответственно в разделах I и II; в разделе III содержится информация о других дополнительных мероприятиях в области научных исследований Института им. Эрнста Маха во Фрайбурге и Научно-исследовательского института Баттеле в Эшборне.

Прежде чем приступить к описанию научно-исследовательской деятельности Германии, следует упомянуть о том, что недавно Германское космическое агентство (ДАРА) подало заявку о приеме в качестве полноправного члена в состав Межагентского координационного комитета по космическому мусору (МККМ). На совещании руководящей группы МККМ в октябре 1996 года было предложено официально принять ДАРА в состав Комитета на следующем совещании МККМ полного состава, которое должно состояться в марте 1997 года в Дармштадте, Германия, одновременно с проведением второй Европейской конференции по космическому мусору в ЕСОК, одним из спонсоров которой является ДАРА.

#### **A. Моделирование космического мусора**

В ИФР/ТУБС (Институт механики полета и космической техники Брауншвейгского технического университета) продолжилась научно-исследовательская деятельность по проблеме космического мусора.

ИФР внес ряд усовершенствований в модель засоренности космического пространства MASTER (ЕКА)<sup>1</sup>. Теперь ее прикладная аналитическая система включает также современную метеорную модель<sup>2</sup>. Планируется представить обновленный вариант модели MASTER в рамках второй Европейской конференции по космическому мусору (Дармштадт, март 1997 года).

#### **1. Анализ риска столкновения с космическим мусором на высоте геостационарной орбиты вне экваториальной плоскости**

Возможности любой модели применительно к таким большим высотам, как область ГСО, являются ограниченными из-за отсутствия данных измерений в этой области в отношении объектов размером менее 1 м, позволяющих подтвердить правильность результатов моделирования. Тем не менее сравнительный анализ<sup>3</sup> целевых орбит на основе предположений в рамках одной и той же модели имеет практическую ценность и позволяет получить важные данные для планирования последующих запусков КА. В последние годы главные усилия в области моделирования обстановки в околоземном космическом пространстве были сконцентрированы на НОО и области ГСО в экваториальной плоскости.

---

<sup>\*</sup> Настоящий ответ воспроизводится без официального редактирования.

В прошлом орбиты с большим наклоном в области ГСО не имели практического значения. В настоящее же время такие наклонные геостационарные орбиты (НГСО) изучаются в рамках ряда концепций, касающихся систем взаимосвязанных спутников. В частности, организации, связанные с полетами гражданских воздушных судов в Европе, рассматривают их в контексте будущей Глобальной навигационной спутниковой системы. Спутники НГСО на орбитах с наклоном до  $75^\circ$  будут обеспечивать достаточный региональный охват на начальном этапе функционирования системы, которая в конечном счете станет глобальной.

Вся сферическая оболочка в радиусе  $r = 42\,164 \text{ км} \pm 1\,000 \text{ км}$  разделена на контрольные объемы с  $\Delta r = 25 \text{ км}$ , склонением  $2^\circ$  и прямым восхождением  $10^\circ$ . Для определения величины пространственной плотности в этих секторах использовалась справочная картотека объектов космического мусора MASTER 1995.0. На диаграмме 1 показаны результаты в отношении объектов с диаметром до 1 см и 1 мм, соответственно. Прослеживаемые объекты на ГСО еще можно распознать по максимуму с наклоном  $0^\circ$  в отношении объектов размером более 1 см. В то же время обе кривые показывают, что преобладают объекты на орбитах спутников серии "Молния". Менее крупные фрагменты являются в основном результатом распада объектов на этих характеризуемых большим эксцентриситетом орбитах. Поскольку их первоначальное наклонение составляет около  $63,4^\circ$ , в случае некоторых фрагментов вращение их линии апсид остается незначительным. Поэтому в Северном полушарии отмечаются, как правило, более высокие величины пространственной плотности, а локальный минимум - при склонении около  $-63^\circ$ .

В то же время характеристики столкновения с наблюдаемыми спутниками на ГСО и НГСО существенно варьируются. Вследствие наклона орбиты спектр скорости соударения повышается и достигает 4 и 5 км/с по сравнению с умеренными скоростями соударения 500 м/с и менее на ГСО (см. диаграмму 2). Частицы мусора миллиметрового размера обладают таким же потенциалом разрушения в случае столкновения с крупными предметами на НГСО, как и частицы сантиметрового размера в современной обстановке на ГСО. Различия в геометрии столкновения находят также отражение в направлении соударения: угол азимута (измеряемый на горизонтальной плоскости по отношению к направлению полета) сужается до  $30\text{-}50^\circ$  (см. диаграмму 3). Возвышение распространяется на  $\pm 20^\circ$  вокруг средней и максимальной величины  $0^\circ$ .

Обычно считается, что продолжительность существования объектов в области ГСО практически бесконечна. Несмотря на то, что вследствие гравитационного воздействия Луны и Солнца, солнечной радиации и асимметричного геопотенциала происходит возмущение орбиты, соответствующего векового изменения орбитальных параметров не происходит. В частности, на ГСО эксцентриситет растет медленно и без диссипации энергии. В то же время долгосрочное моделирование с использованием стробоскопного компьютерного кода LOPEX<sup>4</sup>, учитывающее все соответствующие возмущения, показывает, что при наклонении свыше  $45^\circ$  характеристики НГСО резко меняются. На диаграмме 4 показана продолжительность существования на орбите 3 000 объектов с выборочно отобранными первоначальными величинами наклона, эксцентриситета, прямого восхождения восходящего узла и аргумента перигея. Значительное число объектов с первоначальным наклоном  $45^\circ\text{-}80^\circ$  (и соответствующими симметричными величинами  $i > 90^\circ$ ) прекращают свое существование уже через 30-200 лет.

**Диаграмма 1. Соотношение пространственной плотности и склонения на НГСО**

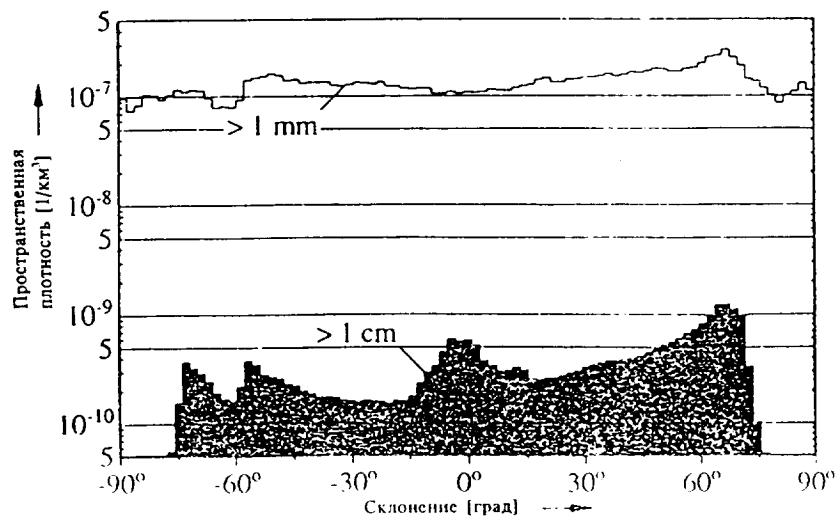


Диаграмма 2. Скорость соударения на НГСО и ГСО

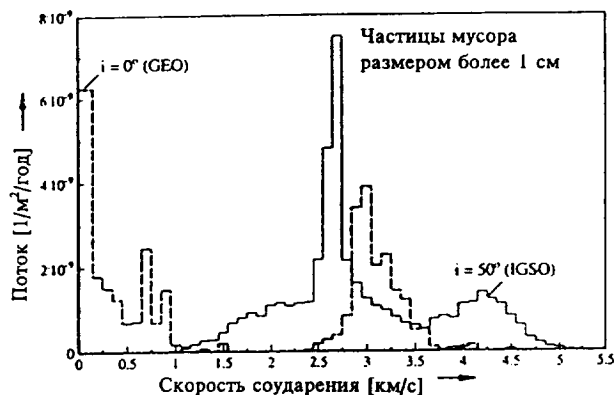


Диаграмма 3. Угловое распределение потока в горизонтальной плоскости

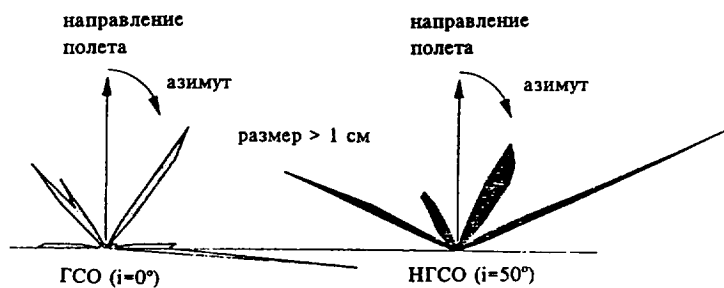
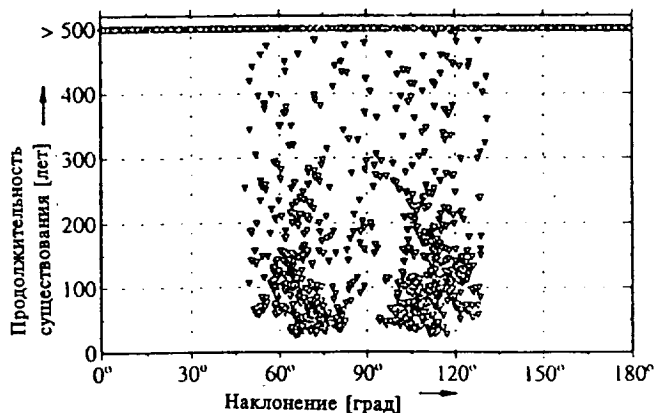


Диаграмма 4. Продолжительность сохранения на НГСО 3 000 произвольно отобранных объектов ( $i_0 = 0^\circ \dots 180^\circ$ ,  $e_0 = 10^{-5} \dots 10^{-1}$ )



С точки зрения ослабления воздействия частиц мусора использование НГСО имеет свои недостатки и преимущества. Такие орбиты представляют потенциальный риск для находящихся в области ГСО объектов, в частности вследствие того, что они обладают более высокой относительной скоростью. Положительным моментом является то, что скопления мусора в результате фрагментации на НГСО и ГСО довольно быстро заполняют большое пространство. Параметры орбиты многих из таких фрагментов имеют больший разброс, чем в случае распада на НОО вследствие меньшей скорости исходного объекта. Для того чтобы получить более четкое представление о краткосрочном увеличении потока как функции места и параметров распада, будет проведено дополнительное моделирование эволюции скоплений мусора в этом режиме высот.

Оптимальным способом удаления спутников по завершении срока их эксплуатации является использование естественных возмущений. В то время как в случае геостационарных спутников оставшееся топливо, как правило, использовалось для схода с ГСО и достижения максимально высокой орбиты захоронения, спутники НГСО должны использовать топливо для изменения параметров своей орбиты таким образом, чтобы они находились на номинальной орбите минимальное остающееся время, а также, по возможности, для скорейшего возвращения в атмосферу Земли. Потенциальными параметрами, требующими внимания, являются как наклонение, так и эксцентриситет. В то же время вследствие незначительного воздействия ограниченной  $\Delta V$  на наклонение оптимальным методом во многих случаях будет рассчитанное увеличение эксцентриситета. Вероятность того, что только что созданная конкретная система взаимосвязанных спутников также может приводить к снижению значения  $e$  эксцентриситета, свидетельствует о необходимости оптимизации процессов в каждом конкретном случае. Для этого необходимы системы точного расчета орбит и надежные методы численной оптимизации, которыми располагает Институт и которые будут использоваться для разработки стратегий сведения к минимуму риска, связанного с операциями на НГСО.

## 2. Долгосрочная эволюция среды космического мусора

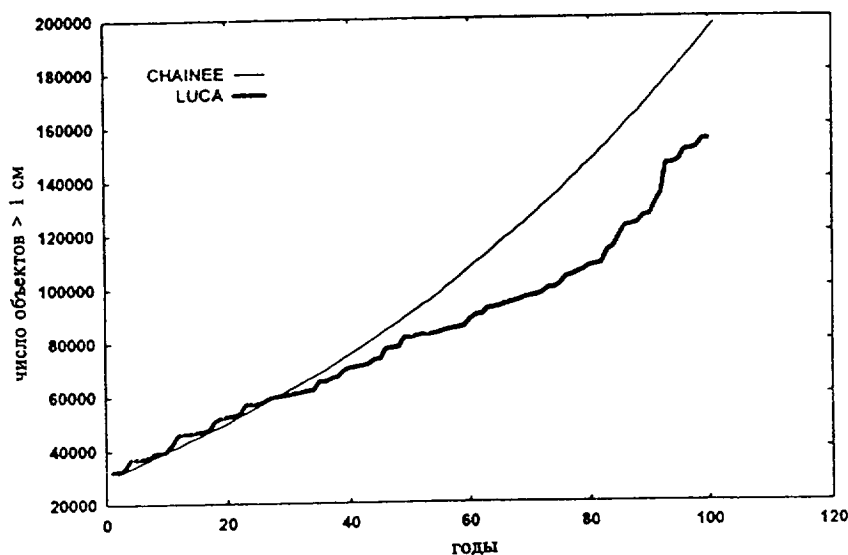
В большинстве случаев долгосрочное моделирование среды орбитального мусора и мер по ослаблению воздействия частиц мусора при интерактивных столкновениях осуществлялось на основе использования упрощенных подходов. Такие подходы, в рамках которых для описания засоренности используется определенное число параметров массы и высоты, позволяют проводить весьма оперативный, но в большинстве случаев достаточный анализ будущих сценариев и мер по ослаблению воздействия частиц мусора с точки зрения глобальных тенденций.

В то же время некоторые последствия и взаимодействия, которые могут иметь важное значение, в прошлом не поддавались исследованию вследствие ограниченной разрешающей способности модели. В ИФР/ТУБС разработан новый полудетерминистский механизм моделирования (LUCA - долгосрочная программа анализа столкновений), который позволяет более тщательно анализировать будущие сценарии. В этой программе более не используются дискретные параметры массы и высоты засоренных участков для описания среды космического мусора и ее эволюции со временем; вместо этого используются выборочные объекты (примерно 10 процентов общего количества частиц). Распространение этих объектов осуществляется индивидуально, а расчетная вероятность столкновений пересчитывается через дискретные промежутки времени. Такой метод позволяет учитывать изменения параметров засоренности в будущем, в то время как прежний метод определяет вероятность будущего столкновения исключительно на основе изменения числа объектов, а не изменения их орбитального распределения.

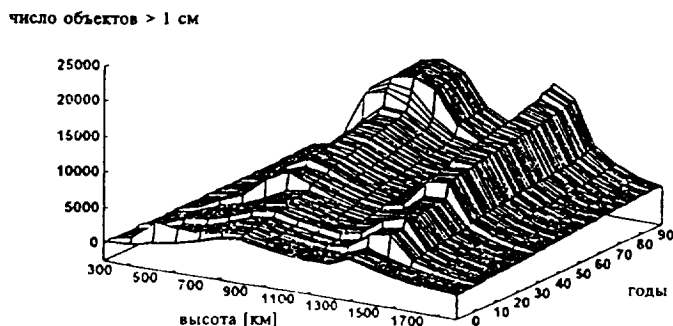
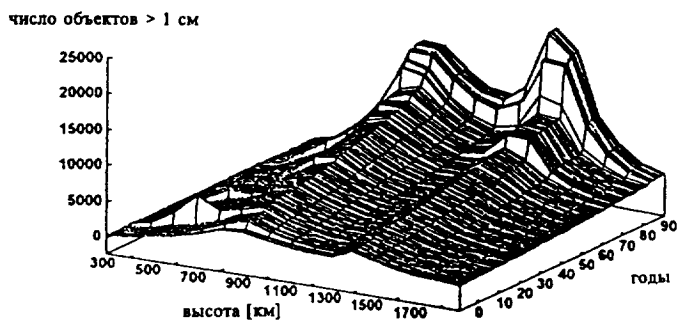
Согласно первой оценке, результаты новой программы анализа с высоким разрешением и длительной машинной обработкой (LUCA) сопоставимы с результатами существующей модели с низким разрешением, но быстрыми аналитическими возможностями (CHAINEE). Для сопоставления были изучены объекты  $> 1$  см на высотах НОО  $< 2\ 000$  км. Результаты этого сопоставления свидетельствуют о том, что модель CHAINEE обеспечивает адекватные результаты в пределах диапазона ее применимости, однако в отношении ряда сценариев разрешающая способность этой модели не отражает всех последствий. Как явствует из диаграммы 5, в случае относительно простого сценария, т.е. предполагающего монотонное увеличение засорения космического пространства на 1,7 процента в следующие 100 лет, расчетные показатели усредненного по высоте количества объектов  $> 1$  см как функции времени аналогичны для обеих моделей.

Тем не менее эта новая программа позволяет более тщательно анализировать эволюцию засоренности со временем. В отношении сценария, аналогичного описанному выше, зависимость от высоты может теперь выводиться так, как это показано на диаграмме 6, отражающей результаты двух осуществленных в Монте-Карло прогонов программы LUCA (кривая на диаграмме 5 показывает тенденцию, выведенную путем усреднения значительного числа таких прогонов программы). Как видно из этого примера, рост засоренности, вызванный столкновениями, может произвольно варьироваться, что объясняется относительно низким ожидаемым числом столкновений в течение следующих десятилетий. Можно также заметить, что в областях определенных высот будет иметь место рост засоренности, намного превышающий общий рост в соответствии с диаграммой 5.

**Диаграмма 5. Сравнение программ CHAINEE и LUCA на основе предположения, что засоренность околоземного космического пространства на высотах менее 2 000 км будет монотонно увеличиваться на 1,7 процента в следующие 100 лет (приведены усредненные кривые)**



**Диаграмма 6. Число объектов > 1 см на каждые 100 км высоты как функция времени (модель, основанная на прогонах программы LUCA в Монте-Карло при тех же условиях, что и на диаграмме 5)**



В настоящее время ведется обеспечивающий высокое разрешение анализ будущих сценариев, включая меры противодействия. Полученные результаты помогут, возможно, лучше понять динамику последующего засорения и эффективности мер по ослаблению воздействия частиц космического мусора.

## **В. Радиолокационные наблюдения за фрагментами космического мусора и метеорными телами**

Исследования по вопросам космического мусора, проведенные Научно-исследовательским институтом физики высоких частот (ФВЧ) Центра прикладных научных исследований (ФГАН) направлены в первую очередь на изучение и разработку радиолокационных методов и методов анализа для обнаружения, классификации и идентификации искусственных космических объектов, а также естественных метеорных тел. Радиолокационные данные по отдельным объектам космического мусора собираются с помощью работающей в режиме слежения РЛС слежения и получения изображений. На основе этих данных выясняются физические характеристики, такие, как размер, форма, габариты, траектория, масса, орбита и срок существования на орбите. Степень засоренности космического пространства определяется с помощью радиолокационных наблюдений его определенных районов в режиме работы с фиксацией луча. Оценки интенсивности метеорных потоков в период метеорных бурь производятся на основе радиолокационных замеров, при которых антенна направляется перпендикулярно ожидаемому метеорному потоку (режим работы с фиксацией луча с компенсацией вращения Земли). Измерения потоков космического мусора и приближающихся к Земле метеорных потоков имеют важнейшее значение для выверки моделей засоренности околоземного космического пространства. В 1996 году деятельность в основном финансировалась ЕКА/ЕСОК.

РЛС слежения и получения изображений (ТИРА) ФГАН-ФВЧ используется главным образом для изучения методов и способов классификации и идентификации КА и самолетов. Кроме того, до определенной степени ТИРА используется для получения радиолокационных данных о фрагментах космического мусора и метеорных телах<sup>5,6,7</sup>. В основном с этой целью были разработаны три режима работы: режим слежения для измерения отдельных объектов, находящихся на низких околоземных орбитах (НОО), геостационарных орбитах (ГСО) и геостационарных переходных орбитах (ГПО); во-вторых, режим работы с фиксацией луча для сбора данных об "осколочной" обстановке в определенных районах космического пространства; и, в-третьих, режим работы с фиксацией луча с компенсацией вращения Земли для получения информации о метеорных телах в периоды, когда к Земле приближаются крупные метеорные потоки.

Система ТИРА состоит из узкополосной РЛС слежения и РЛС для получения изображений с высокой разрешающей способностью. Функционирование обеих РЛС обеспечивается параболической антенной диаметром 34 м. Были разработаны методы и алгоритмы для анализа характеристик сигналов узкополосной РЛС, для обработки с помощью ЭВМ радиолокационных изображений, полученных на основе данных РЛС с высокой разрешающей способностью, и для определения физических характеристик космических объектов, например, размера, формы, габаритов, траектории, массы, орбиты и срока существования на орбите. Эти методы и способы требуют дальнейшей доработки и совершенствования, с тем чтобы их можно было применять в отношении частиц космического мусора средних размеров (размер 1-50 см) и метеорных тел.

### **1. Радиолокационные наблюдения**

В 1996 году научно-исследовательские работы по вопросам космического мусора проводились ФГАН-ФВЧ в рамках исследования ЕКА (контракт ЕКА/ЕСОК, 2/95 3/98). Цель этого исследования состоит в том, чтобы повысить имеющиеся у существующей системы ФГАН ТИРА возможности обнаружения. Одна из основных целей заключается в обнаружении фрагментов космического мусора средних размеров (размер 1-50 см) на НОО и слежении за ним. Эта информация будет использоваться для выверки и совершенствования имеющихся в настоящее время моделей среды. В рамках исследования ЕКА были проведены все необходимые работы по расширению возможностей аппаратуры для улучшения характеристик обнаружения у РЛС слежения ТИРА. Измерения небольших радиолокационных калибровочных спутников показали, что с помощью РЛС, работающей в диапазоне L, в настоящее время можно наблюдать объекты космического мусора размером 1,7 см на удалении 800 км.

В 1995 году были начаты работы по дальнейшему повышению возможностей по обнаружению объектов размером 1-50 см в рамках экспериментов с использованием бистатической РЛС. Тот факт, что крупнейший в мире управляемый радиотелескоп (диаметр апертуры 100 м) в Бад-Мюнстерайфеле-Эффелсберге, эксплуатируемый Институтом радиоастрономии им. Макса Планка (МПИР), Бонн, расположен в непосредственной близости от мощной системы ТИРА ФГАН-ФВЧ, является уникальным для Европы фактором; это создает многообещающие возможности для совместных наблюдений малых объектов на больших высотах. С учетом этих соображений в рамках вышеупомянутого исследования ЕКА и при помощи ДАРА ФГАН-ФВЧ предложил администрации МПИР провести совместный 24-часовой эксперимент при работе в режиме с фиксацией луча для сбора радиолокационных данных о космическом мусоре в целях выверки модели ЕКА MASTER. 25 ноября 1996 года этот эксперимент "SOBEAM-1/96" был успешно проведен и были собраны радиолокационные данные в объеме 150 ГБайт. Анализ данных сопутствующих калибровочных экспериментов показал, что 100-метровый телескоп, по всей вероятности, способен обнаруживать объекты размером менее 1 см на высоте 800 км.

Крупный метеорный поток Леонидов в ноябре 1999 года, в связи с которым НАСА предсказывает увеличение фонового потока в 10 000-30 000 раз, может создать опасность для функционирующих спутников. 17 ноября 1996 года ФГАН-ФВЧ опробовал стратегию наблюдений для системы ТИРА. Первые анализы показали обнаружение ионизированных следов метеорных тел пониженной и повышенной плотности. Собранные данные будут использованы для более совершенной подготовки экспериментов и для оказания помощи в разработке алгоритмов оценки приближающихся потоков метеорных тел.

## **2. Прогнозы в отношении возвращения в атмосферу космических объектов повышенного риска**

Цель этого проекта состоит в том, чтобы при возвращении в атмосферу космических объектов повышенного риска обеспечить Федеральное министерство внутренних дел надежными прогнозами в отношении окон вхождения объектов в атмосферу (временная и наземная проекция траекторий), оценками пространственного положения объектов и оценками риска. В рамках соглашений о сотрудничестве ФГАН-ФВЧ предоставил ЕКА/ЕСОК данные, полученные с помощью РЛС слежения за космическими объектами повышенного риска, в целях подтверждения европейских прогнозов относительно возвращения объектов в атмосферу.

### **С. Другие научно-исследовательские проекты**

В течение прошлого года продолжалась большая часть исследований в области моделирования столкновений на гиперзвуковых скоростях. Эти исследования финансировались как ЕКА, так и на коммерческой основе.

Институтом им. Эрнста Маха (ЭМИ) с помощью легких газовых пушек был проведен ряд испытаний материала и конструкции защитного экрана европейского модуля "Колумб" для Международной космической станции (МКС). Кроме того, продолжаются исследования последствий столкновения на гиперзвуковых скоростях для герметизированных КА в целях получения более точных статистически выверенных результатов. Результаты экспериментов подтвердили более опасные последствия для герметизации КА. На основе исследований был сделан вывод о необходимости укрепления экранной защиты модулей космической станции от столкновений с фрагментами космического мусора и метеорными телами.

Кроме того, ЭМИ проводил эксперименты в целях изучения последствий столкновения с фрагментами мусора для системы теплозащиты (СТЗ) спускаемых аппаратов. Объектом исследований служили неабляционные материалы (керамика, армированная волокном), абляционные материалы, гибкое (ГТЗП) и многослойное (МТЗП) теплозащитное покрытие, а также панели из пластика, армированного углеродным волокном (ПАУВ), и слоистые панели с наполнителем. Панели ПАУВ и слоистые панели с наполнителем обладают лучшей конечной баллистической эффективностью, чем панели из алюминия. Оболочки из МТЗП перед мишенями из алюминия доказали свою высокую эффективность в результате фрагментации при множественных столкновениях. Ударостойкость материалов "углерод-углерод" сопоставима с алюминием; в то же время для таких материалов характерна определенная хрупкость (эффект скалывания).



Цели разработки методов создания кумулятивных зарядов для запуска гиперзвуковых снарядов в Научно-исследовательском институте им. Баттелле были достигнуты и были получены воспроизводимые результаты для нормальных и косых ударов на скоростях более 11 км/с снарядами массой около 1 грамма.

Была завершена оценка экспериментов по изучению столкновений на гиперзвуковых скоростях, проведенных в конце 1995 года на базе TDW (Gesellschaft für verteidigungstechnische Wirksysteme mbH) при помощи так называемого метода полостного заряда. Вывод исследования столкновений со сверхбыстрыми струями со скоростью передней части порядка 25 км/с состоит в том, что достоверно определить массу движущегося объекта и вывести уравнение, характеризующее состояние передней части струи, не представляется возможным, и таким образом, полученные характеристики столкновения будут, несомненно, существенно отличаться от других методов моделирования столкновений с фрагментами мусора. Для развития применения этого метода потребуются дальнейшие исследования.

#### Примечания

1. Final Report of ESOC-Contract 10453/93/D/CS, ESA/ESOC(MAS), 1994.
2. H. Klinkrad and H. Sdunnus, "Concepts and applications of the MASTER Space Debris Environment Model", 31st Cospar Scientific Assembly, Birmingham, UK, 14-21 July 1996.
3. R. Westerkamp, J. Bendisch, S. Theil and P. Wegener, "Analysis of the space debris collision risk at geosynchronous altitude outside the equatorial plane", paper No. B 07-0032, 31st Cospar Scientific Assembly, Birmingham, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 14-21 July 1996.
4. J. Bendisch, "Die langfristige Entwicklung von Erdumlaufbahnen im Hinblick auf die Objektdichte im erdnahen Weltraum", ISBN 3-8265-0247-7, Shaker (1994).
5. K. Magura and D. Mehrholz, "Measurement and analysis techniques for satellite observations used at FGAN-FHP", Technical Report No. 8-93, FGAN-FHP, Wachtberg-Werthhoven, December 1993.
6. L. Leushacke, D. Mehrholz, D. Perkuhn and H.G. Peters, "Radar detection of mid-size space debris", final report No. 6-94, ESA/ESOC Contract No. 10182/92/D/IM, FGAN-FHP, Wachtberg-Werthhoven, November 1994.
7. L. Leushacke and D. Mehrholz, "Determination of physical characteristics of space debris", final report No. 6-95, DARA Contract No. 50 ST 9003, FGAN-FHP, Wachtberg-Werthhoven, July 1995.