

ISSN 2075-6836

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ЦЕНТРАЛЬНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(НИИЦ ЦНИИ ВКС МИНОБОРОНЫ РОССИИ)

С. С. Вениаминов

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР. ТЕХНОГЕННОЕ ЗАСОРЕНИЕ КОСМОСА И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ

МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

Москва
2023

Рецензенты:
доктор технических наук *Р. Р. Назиров*
кандидат технических наук *Н. А. Эйсмонт*

Вениаминов С. С. Космический мусор. Техногенное засорение космоса и его последствия. 3-е изд., испр. и доп. М.: ИКИ РАН, 2023. 204 с.

ISBN 978-5-00015-059-7
DOI: 10.21046/spacedebris-2023

Исследования в области техногенного засорения космоса — в настоящее время одно из наиболее актуальных и стремительно развивающихся научных направлений. Злободневность проблемы космического мусора обусловлена усиливающимся засорением околоземного пространства, снижением под его воздействием качества функционирования космических аппаратов и выходом их из строя, столкновениями и взрывами космических объектов. Приведён обзор проблемы. Описаны средства, используемые для наблюдения космического мусора, оценены их возможности. Освещено общее состояние засорённости околоземного космического пространства и его отдельных областей, проанализированы различные факторы и события, вызвавшие его засорение. Дается оценка продолжающегося мусорообразования, показаны его основные источники и механизмы, рассмотрены наиболее важные закономерности. На основе результатов выполненных исследований и тенденций засорения приводится прогноз развития этого процесса и его негативных последствий. Рассмотрены возможные пути снижения темпов засорения космоса. Дана оценка перспектив борьбы с этим опасным явлением. Содержание настоящего издания существенно обновлено.

Ключевые слова: космос, экология, космическая деятельность, космический мусор, техногенный, космический аппарат, искусственный спутник Земли, наблюдения, негативные последствия

Veniaminov S. S. Space Debris. Technogenic Contamination of Space and its Consequences. 3rd ed. M.: IKI, 2022. 204 p.

This problem is of current importance due to progressive continuation of technological contamination of the near Earth space, catastrophic collisions and explosions of space objects getting more frequent, and other dramatic events in space happening through the space debris. In this book, a review of the current state of the space contamination problem is given. The sensors used for detecting and tracking space debris are described and their capabilities are estimated. The levels of general technological contamination of the near Earth space and in its particular regions are given. The main events of the space activity history contributed to space contamination are enumerated and analyzed. The multilateral estimate of danger from the continuing space debris origination process to the mankind is made, its principle mechanisms and space debris sources are shown, and some appropriateness of the process is considered. On the base of evident tendencies of the contamination process and the results of last scientific investigations all over the world, the forecast of further development of the process and its consequences is presented. Some possible ways of space debris mitigation measures are considered. An estimate of prospects of fight against this dangerous phenomenon is given. Keywords: space, environment, space activity, space debris, technological, spacecraft, artificial satellite, observations, negative consequences.

Keywords: space, environment, space activity, space debris, technological, spacecraft, artificial satellite, observations, negative consequences

Оглавление

Условные сокращения.....	4
Предисловие к третьему изданию.....	7
Введение.....	9
Раздел 1. Мониторинг околоземного космического пространства.....	15
1.1. Классификация околоземных орбит.....	15
1.2. Системы контроля космического пространства.....	21
1.3. Возможности современных средств наблюдения космического мусора.....	32
1.4. Мониторинг мелкого космического мусора.....	57
1.5. Моделирование засорённости околоземного космического пространства.....	64
Раздел 2. Состояние засорённости околоземного космического пространства.....	74
2.1. Источники засорения космоса.....	74
2.2. Состав и классификация популяции орбитальных объектов.....	78
2.3. Распределение космического мусора разных типов по различным параметрам.....	88
2.4. Прогноз развития процесса засорения околоземного космического пространства в будущем.....	96
Раздел 3. Последствия засорённости околоземного космического пространства для человечества.....	102
3.1. Различные виды последствий техногенного засорения околоземного космического пространства.....	102
3.2. История взрывов и столкновений в космосе.....	128
3.3. Каскадный эффект (синдром Кесслера).....	150
3.4. Столкновения с мелким космическим мусором.....	155
3.5. Возможности и средства оценки повреждений космических аппаратов от ударов космического мусора.....	157
3.6. Мелкий космический мусор и его опасность.....	159
3.7. Формальное определение возможной меры опасности техногенного засорения околоземного космического пространства.....	164
3.8. Определение степени угрозы со стороны космического мусора для космических аппаратов и выбор мер защиты.....	166
Раздел 4. Пути уменьшения негативных последствий от засорённости околоземного космического пространства и снижения самой засорённости.....	171
Раздел 5. Оценка перспектив борьбы с космическим мусором.....	181
Заключение.....	185
Литература.....	187

АММ	— автоматический межорбитальный модуль
АМС	— автоматическая межпланетная станция
АФАР	— активная фазированная антенная решётка
ВВС	— Военно-воздушные силы
ВМФ	— Военно-морской флот
ВОКО	— высокоорбитальный космический объект
ВЭКО	— космический объект на высокоэллиптической орбите
ГЕО	— геостационарная орбита
ГЕОДСС	— Наземная электронно-оптическая станция зондирования (см. GEODSS)
ГЛОНАСС	— Глобальная навигационная спутниковая система
ГСО	— геосинхронная орбита
ДОТ	— двигатель осадки топлива
ЕКА	— Европейское космическое агентство (см. ESA)
ЕПОКО	— Европейская программа осведомлённости о космической обстановке
ИСЗ	— искусственный спутник Земли
КА	— космический аппарат
КК	— космический корабль
ККП	— контроль космического пространства
КМ	— космический мусор
КО	— космический объект
КС	— космическая система
КЦ	— космический центр
МКК	— межорбитальный космический корабль
МКС	— Международная космическая станция
МО	— Министерство обороны
НАСА	— Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (см. NASA)
НОКО	— низкоорбитальный космический объект
ОК	— орбитальный комплекс
ОКП	— околоземное космическое пространство
ОС	— орбитальная станция
ОЭК	— оптико-электронный комплекс
ПЗС	— прибор зарядовой связи
ПРН	— предупреждение о ракетном нападении
ПРО	— противоракетная оборона
РАН	— Российская академия наук
РКА	— Российское космическое агентство (предшественник Роскосмоса)
РЛОС	— радиолокационная станция
РН	— ракета-носитель
Роскосмос	— Государственная корпорация по космической деятельности
СККП	— Система контроля космического пространства
СН	— средство наблюдения космического объекта
СОЗ	— система обеспечения запуска
СПРН	— Система предупреждения о ракетном нападении
ТРД	— твердотопливный реактивный двигатель
ФАР	— фазированная антенная решётка
Хейстек	— Haystack Orbital Debris
Хусир	— см. HUSIR
ЦККП	— Центр контроля космического пространства
ЦУП	— Центр управления (космическими) полётами
ЭПР	— эффективная поверхность рассеяния
ABISS	— Antenne Bistatique pour la Surveillance Spatiale
AEDC	— Arnold Engineering Development Complex

ALCOR	— ARPA Lincoln C-Band Observables Radar
ALTAIR	— ARPA Long-Range Tracking and Instrumentation Radar
ANGELS	— Autonomous Nanosatellite Guardian for Evaluating Local Space
ASAT	— Anti-Satellite Weapon
ATV	— Automated Transfer Vehicle (см. AMM (рус.))
CASA	— Center for Astrophysics and Space Astronomy
CBERS-1	— China-Brazil Earth Resources Satellite
CDT	— Charged Coupled Device Debris Telescope
CERISE	— Characterisation de l'Environnement Radio-Electrique par un Instrument Spatial Embarque
CHAIN	— модель Европейского космического агентства долгосрочной эволюции техногенной засорённости околоземного космического пространства
CNES	— Centre National d'Études Spatiales
COBE	— Cosmic Background Explorer
COPUOS	— United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer
COSPAR	— Committee on Space Research (в ООН)
CSA	— Canadian Space Agency
CSO	— Circular Semisynchronous Orbit(s)
CSpOC	— Space Operations Center
DO	— Disposal Orbit(s)
DMSP	— Defense Meteorological Satellite Program
ERBS	— Earth Radiation Budget Satellite
ESR	— Electronically Scanning
ESA	— European Space Agency
ESASDT	— ESA's Space Debris Telescope
ESOC	— European Space Operations Center
EURECA	— European Retrievable Carrier
EVOLVE	— модель НАСА долгосрочной эволюции техногенной засорённости ОКП
EWR	— Early Warning Radar
FCC	— Federal Communications Commission
FGAN	— Research Establishment for Applied Science
Galileo	— Europe's Global Navigation Satellite System
GCOM-W1	— Global Change Observation Mission
GEO	— Geostationary Earth Orbit(s)
GEODSS	— Ground-based Electro-Optical Deep-Space Surveillance
GEOSAT	— GEOdetic SATellite
GFO	— Geosat Follow-on
GLONASS	— Global Navigation Satellite System, Russia
GOES-10	— Geostationary Operational Environmental Satellite
GPS	— Global Positioning System, US
GRAVES	— Grande Réseau Adapté à la Veille Spatiale
GSO	— Geosynchronous Orbit(s)
GTO	— Geostationary Transfer orbit(s)
HAX	— Haystack Auxiliary (Radar)
HEO	— Highly Elliptical Orbit(s)
HO	— High Orbit(s)
HST	— Hubble Space Telescope
HUSIR	— Haystack Ultra-wideband Satellite Imaging Radar
IAA	— International Academy of Astronautics
IADC	— Inter-Agency Space Debris Coordinating Committee
IAU	— International Astronomical Union
INSAT-1D	— Indian National Satellite
JAXA	— Japan Aerospace Exploration Agency
JSC	— Johnson Space Center
JSOC	— Joint Space Operations Center
JSpOC	— Joint Space Operations Center (of US Strategic Command)
JWST	— James Webb Space Telescope
KARI	— Korea Aerospace Research Institute,
LAD-C	— Large Area Debris Collector
LDEF	— Long Duration Exposure Facility

6	LEGEND	— LEO-to-GEO Environment Debris model
	LEO	— Low Earth Orbit(s)
	LMT	— Large Millimeter Telescope
	LRIR	— Long Range Imaging Radar
	LRM	— Liquid rocket motor
	LZT	— Large Zenith Telescope
	MASTER	— Space Debris Terrestrial Environment Reference Model, инженерная модель Европейского космического агентства техногенной засорённости околоземного космического пространства
	MCAT	— Meter Class Autonomous Telescope
	MEO	— Medium Earth Orbit(s)
	MMW	— Millimeter-Wave Radar
	MODEST	— Michigan Orbital Debris Survey Telescope
	MOSS	— Maui Optical Space Surveillance Complex
	MSFC	— George Marshall Space Flight Center
	MSX	— Midcourse Space Experiment
	NASA	— National Aeronautics and Space Administration, US
	NAVSTAR	— NAVigation Satellites providing Time and Range
	NNSA	— National Nuclear Security Administration
	NOAA	— National Oceanic and Atmospheric Administration, US
	ODERACS	— Orbital Debris Radar Calibration Spheres
	ODQN	— Orbital Debris Quarterly News
	ORDEM	— Orbital Debris Engineering Model (NASA)
	OSC	— Orbital Sciences Corporation
	PIMS	— Passive Imaging Metric Sensor
	PSLV	— Polar Satellite Launch Vehicle
	RISAT-1	— Radar Imaging Satellite
	RORSAT	— Radar Ocean Reconnaissance SATEllite
	SBSS	— Space Based Surveillance System, US
	SDPA	— Space Debris Prediction and Analysis
	SDS	— Space Debris Sensor
	SDT	— Space Debris Telescope
	SHO	— Super-High Orbit(s)
	SPADUS	— Space Dust Instrument
	SPOT	— Satellite Pour l'Observation de la Terre
	SPDA	— Space Debris Prediction and Analysis
	SSN	— Space Surveillance Network, US
	SSO	— Solar-Synchronous Orbit(s)
	STS	— Space Transportation System (Space Shuttle, US)
	STS'	— Space Telescope Science Institute
	SVS	— Space Visible Sensor (космический сенсор видимого диапазона)
	TAROT	— Telescopes a Action Rapide pour les Objets Transitoires
	TIP	— Tracking and Impact Prediction
	TIRA	— Tracking and Imaging Radar
	TLE	— Two-Line (Orbit) Element set (формат представления траекторных параметров, US)
	TRADEX	— Tracking and Discrimination Experiment
	UARS	— Upper Atmosphere Research Satellite
	UHF	— ultra high frequency
	VHF	— very high frequency
	WG	— Working Group
	ZimSMART	— Zimmerwald SSmall Aper-ture Robotic Telescope

Решение о переиздании монографии было принято в виду широкого спроса на её предыдущие выпуски [1, 2], обнаружения ряда опечаток и неточностей и желания их устранить, а также естественной необходимости дополнить сведениями о произошедших в последующий период существенных событиях в космосе и космической деятельности, появившимися новыми информационными материалами в данной области, результатами наблюдений и исследований и аналитическими выводами. Проблемы техногенного засорения космоса в настоящее время одно из наиболее актуальных и стремительно развивающихся научных направлений, что говорит о крайне серьёзном отношении к этому вопросу со стороны организаций и целых государств, причастных к освоению околоземного космоса, и, прямо скажем, о долгожданном прозрении многих.

За прошедшее после предыдущего издания десятилетие наряду с расширением сообщества государств, вовлечённых в космическую деятельность и эксплуатацию космоса, наблюдались существенные изменения в политике освоения космоса, в широте охвата космическими технологиями различных сфер деятельности человека, в отношении человека к экологии околоземного космического пространства (ОКП) и к безопасности деятельности в нём. В ОКП, его освоении и характере наблюдения за ним происходили интенсивные процессы (и созидательные, и разрушительные). Совершенствовались и создавались новые средства наблюдения, в том числе и космического базирования. Техногенное заполнение ОКП и его динамика претерпели заметные, в том числе опасные изменения. Сильно преобразовались состав, номенклатура, назначение и конструктивное исполнение действующих космических аппаратов (КА) и космических систем (КС). Количественно, качественно и локализационно изменились сами популяции космического мусора (КМ). Стремительно развивались космические технологии. Появились новые конструктивные решения выводимой в космос полезной нагрузки и средств её доставки. Большой прогресс достигнут в разработке новых материалов для конструкций КА. В итоге контент книги существенно расширен и обновлён. Учтены также многочисленные замечания и пожелания читателей.

Толчком к написанию этой книги послужило продолжающееся недостаточное или искажённое понимание в широких кругах общества той опасности для человечества, которую несёт прогрессирующее загрязнение околоземного космического пространства техногенным мусором, сопровождающее запуски и функционирование космических аппаратов и кораблей и уже происходящее самопроизвольно, без непосредственного участия человека — в результате спонтанных взрывов, столкновений, абляции и «возрастной» деградации космических объектов (КО).

Близкое к катастрофическому состояние техногенной засорённости ОКП, которое уже сейчас наносит ощутимый деловой и финансовый ущерб космической деятельности человека, экологии Земли и ОКП, является следствием, прежде всего, легкомысленного, недалёковидного (если не сказать преступно халатного) отношения большинства причастных к космической деятельности людей к этой проблеме, особенно на ранних стадиях освоения космоса. Это касается и рядовых людей, и конструкторов, и учёных, и руководителей государств.

Слава богу, в наше время уже не приходится доказывать наличие большой опасности для космической деятельности человека со стороны техногенного космического мусора. Руководство Роскосмоса официально заявило, что проблема КМ переходит из категории теоретических в категорию сугубо насущных, требующих решения [3]. Но это досталось дорогой ценой. Целый ряд катастроф в ОКП, особенно последних лет (в основном по вине КМ), оказался убедительным аргументом даже для скептиков, которых, к сожалению, оказалось довольно много в начальный период космической эры, в том числе и среди тех, от кого во многом зависело создание космических технологий, космической техники и освоение космического пространства. На них в большой мере лежит

вина за то состояние околоземного космоса, какое мы сейчас имеем, за ущербность важнейшей среды человеческой деятельности. Этот человеческий фактор в значительной степени помешал своевременному, целесообразному и конструктивному решению проблемы техногенного засорения космоса.

Как будет показано в книге, на протяжении всей космической эры, начиная с 1957 г., степень засорённости ОКП неуклонно и практически даже не просто монотонно, а экспоненциально возрастала и будет продолжать прогрессивно расти даже в том случае, если запуски искусственных спутников Земли (ИСЗ) прекратятся вовсе. Иными словами, процесс техногенного загрязнения околоземного космоса уже становится необратимым. Выступления специалистов, обеспокоенных сложившейся ситуацией, в первые десятилетия игнорировались. Многие из причастных к освоению космоса как из управленческих структур, так и разработчиков и создателей космической техники, то убеждали, что «ничего страшного, ещё можно потерпеть», а то и просто высмеивали проблему космического мусора как якобы надуманную, несерьёзную, даже мелочную. И вот сегодня мы имеем ситуацию, с которой не знаем, как справиться, а делать это нужно немедленно, точнее, нужно было начать ещё вчера. Во многом мы уже опоздали.

В этой монографии мы попытались разобраться в том, что происходило и происходит с космической средой вокруг Земли, чем это нам грозит и что с этим делать. Целью автора было на основе неоспоримых, зарегистрированных фактов, наблюдений и результатов исследований признанных специалистов и организаций в данной области показать реальный достигнутый по вине человека драматизм состояния ближайшей весьма ранимой космической среды, которая, вместе с тем, становится для нас всё более жизненно важной.

Книга рассчитана на широкий круг читателей. При написании монографии принят строгий научный подход к изложению и, в то же время, параллельно даются более популярные объяснения существенным фактам. Так что неспециалисты могут опускать сложные для понимания места, которые почти всегда сопровождаются вполне доступными пояснениями и выводами. Большое значение для полноты и предметности восприятия имеют многочисленные иллюстрации.

Материалы, включённые в настоящую монографию, были использованы при исследованиях по программе «Млечный путь».

С. Вениаминов

Запуск первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. Сколько восторгов и почти фантастических планов было связано тогда чуть ли не в любом уголке Земли с этим действительно великим событием в истории человечества. Но в то далёкое время никто не подозревал, да и в голову не могло прийти такого на фоне всеобщей эйфории, что в тени этого величайшего достижения науки и техники уже притаился коварный враг.

У медали всегда две стороны — аверс и реверс. Аверс человечество уже воспело и продолжает воспевать, а на реверс обратило серьёзное внимание лишь два десятилетия спустя после запуска Первого спутника. Настоящая публикация посвящена исключительно реверсу медали «За освоение космоса». Мы это делаем, сознавая, что обе стороны медали играют значительную роль в земной цивилизации, но с разным знаком.

С началом эры освоения космоса в экологии Земли и околоземного космоса произошло принципиально новое, причём драматическое событие: в этом пространстве деятельности человека появилась и стала стремительно наращиваться популяция техногенных космических объектов, в которой всё большую долю составляет так называемый космический мусор.

В течение миллионов и миллиардов лет постепенно складывалось и устанавливалось экологическое равновесие, стабилизация среды в околоземном космическом пространстве и системе ОКП–Земля. И вдруг с 1957 г. человек стал искусственно нарушать это равновесие, причём всё более интенсивно. И с какого-то времени это нарушение продолжилось уже независимо от человека, т.е. это пагубный процесс приобрёл некую самостоятельность.

Разумеется, такое вмешательство не могло остаться без последствий. Это вмешательство существенно повлияло, с одной стороны, положительно на дальнейшее развитие цивилизации в самых различных направлениях. Ради этого оно осуществлялось и осуществляется. Но учёных настораживает не только и не столько само это вмешательство, сколько его стремительность и его характер, особенно на начальных этапах — без оглядки на возможные негативные последствия (к сожалению, уже ставшие реальными и даже необратимыми). Человечество очень опоздало с осознанием этого факта и попытками исправить ситуацию. Часто и в прошлом научный прогресс (процесс, безусловно, необходимый для развития цивилизации) оборачивался трагедиями для человечества. Достаточно вспомнить развитие ядерной физики, химии, биологии. Пора бы это усвоить и сделать надлежащие выводы.

Строго говоря, опасность техногенного засорения касается не только околоземного пространства, но и дальнего космоса. Однако особый драматизм этот процесс в наше время по вполне понятным причинам приобретает именно в ОКП. «К счастью» для дальнего космоса, руки человека туда ещё не очень дотянулись.

Вообще-то и до 1957 г. ОКП не было пустым. Порядка $40\,000 \pm 20\,000$ т метеороидов входит в атмосферу Земли каждый год [4]. Но метеороиды, астероиды и другие космические тела, вращающиеся по орбитам вокруг Солнца, иногда попадают в ОКП, быстро и однократно его пронизывают и либо покидают его, либо сгорают в атмосфере. Лишь некоторые из них очень редко достигают поверхности Земли.

В отличие от них, техногенные КО (искусственные спутники Земли), будучи выведены на орбиты вокруг Земли, обычно надолго остаются в ОКП, а по завершении своей функциональной миссии становятся (а точнее, продолжают оставаться) постоянной угрозой столкновения с другими КО, в том числе с действующими КА и, что особенно опасно, с пилотируемыми кораблями.

10 Введение Под космическими аппаратами здесь и в дальнейшем будем обобщённо понимать пилотируемый или автоматический ИСЗ, предназначенный для выполнения определённой миссии. Длительность пребывания техногенного КМ в ОКП зависит, прежде всего, от высоты их орбит и может достигать десятков, сотен, тысяч и миллионов лет (например, в случае КО на геостационарной орбите) [5, 6].

Коварство техногенного КМ в отличие от наземного (который просто можно довольно быстро убрать и утилизировать) не только в постоянном его присутствии в ОКП на пути движения действующих КА, но и в его неспособности по самой его природе экологически чисто утилизироваться. Что касается поверхности Земли, то здесь человек давно взял правильный курс на экологически чистые не только продукты и товары, но и их упаковки (так называемый *recycling*).

Если в 1960-х гг. и позже в освоении космоса конкурировали только два государства, то, начиная с 1980 г., их количество стало резко возрастать. В 2003 г. Китай присоединился к России и США как единственным космическим державам, способным на запуски пилотируемых космических кораблей. Индия, стремясь присоединиться к элитной тройке, планировала запустить свой первый пилотируемый космический корабль (КК) в декабре 2021 г. Однако из-за пандемии запуск отложен по крайней мере на год. В 2009 г. Иран стал десятым государством, способным самостоятельно проводить запуски ИСЗ, а 50 стран запускали гражданские ИСЗ либо независимо, либо в кооперации с другими странами.

В последние годы Индия и Китай значительно увеличили финансирование космических программ, тогда как США, Европа и Россия несколько снизили его. Такие страны как Алжир, Бразилия, Чили, Египет, Индия, Тайвань, Малайзия, Нигерия, Южная Африка, Таиланд участвуют в космических программах, направленных на их экономическое развитие [7]. В 2009 и 2010 гг. свои первые спутники запустили Объединённые Арабские Эмираты, Швейцария, Турция. В настоящее время Россия, США, Европейский союз и Китай имеют свои космические навигационные системы. В стадии присоединения к ним находится Индия.

Возрастает использование ИСЗ двойного назначения — гражданского и военного. Такие многофункциональные КА в настоящее время есть, кроме России и США, у Канады, Китая, Франции, Германии, Японии, Израиля, Италии, Испании и др.

В 2021 г. было зарегистрировано более 40000 пользователей космическими услугами из 120 стран мира. Собственными КА в 2010 г. обладали более 60 стран [8], а в 2020 г. на орбитах находились спутники 50 стран мира при общем количестве действующих КА 2218 (а после завершения вывода КС Starlink их количество значительно превысит 12 000). И только 11 из этих стран имели возможность сами их запускать на орбиту с помощью собственных ракет-носителей (РН).

Наблюдается устойчивый рост сотрудничества в области освоения космоса. Стыковка пилотируемых модулей «Аполлон» и «Союз» (США — СССР), полёт станции «Мир» с участием иностранных космонавтов, космической лаборатории Skylab (NASA — ESA) (*англ.* National Aeronautics and Space Administration — European Space Agency). Самым ярким примером международной кооперации выступает полёт Международной космической станции (МКС) с участием 16 государств и с бюджетом более 100 млрд дол. Уже к 2007 г. было осуществлено 56 запусков к МКС, к концу 2009 г. — 88, к июлю 2012 г. — 125. На 30 лет функционирования МКС запланировано в перспективе израсходовать 129 млрд дол. [8–12].

Спустя более полувека, а точнее, 65 лет после запуска Первого спутника, космическая деятельность стала неотъемлемой составляющей мировой экономики, социального развития, систем безопасности, научных исследований. Процветает глобальная коммерческая космическая индустрия с годовым доходом более 200 млрд дол. Россия долгое время доминировала в выводе ИСЗ на орбиты, осуществляя большинство коммерческих запусков, тогда как США лидирует в производстве ИСЗ. В последние годы по ежегодным запускам Россию опередили Китай и США (в 2017 г. США, а с 2018 г. Китай и США).

При этом коммерческие запуски становятся дешевле, что всё больше открывает доступ к космическим средствам особенно развивающимся странам. К 2022 г. общее суммарное количество запусков во всём мире превышало 6000. Из них на Россию приходилось в сумме около 56 %.

США и Россия продолжают лидировать в размещении на орбитах КА военного назначения. К 2012 г. на орбитах действовало более 185 ИСЗ официально военного назначения, из которых приблизительно половина принадлежала США, а четверть — России. При этом за всю космическую эру США и СССР/Россия в совокупности запустили более 3000 военных спутников, тогда как все остальные страны — менее 100 [12].

Вместе с тем, многие официально коммерческие КА выполняют и некоторые военные функции. В последние годы такие государства как Канада, Китай, Франция, Германия, Япония, Израиль, Италия, Испания стали интенсивно создавать и эксплуатировать многофункциональные ИСЗ с широким диапазоном функций, в том числе и военных. Таким образом, при отсутствии специализированных военных КА многие функции обеспечения государственной безопасности распределяются по гражданским ИСЗ [8, 12].

К 2012 г. на орбитах вокруг Земли реально функционировало 994 КА. Большинство из них действовало в низкоорбитальной области и на геостационарной орбите (ГЕО) (47 % на низких орбитах, 42 % на геостационарной орбите, остальные на средних, высокоэллиптических и сверхвысоких орбитах). Для сравнения, в 2008 г. действующих ИСЗ было около 850, и соотношение было большее в пользу ГЕО [7, 12], а в 2020 г. — 2218. Не следует забывать, что Илон Маск (*англ.* Elon Reeve Musk) намерен вывести на орбиты 12 000 КА в составе КС Starlink.

Используются активные КА для решения задач связи, навигации, метеорологии, геодезии, геофизики, астрономии, астрофизики, обследования поверхности Земли, дистанционных наблюдений, получения и исследования материалов в космосе, калибровки наземной и космической аппаратуры, биологических экспериментов, обслуживания самых различных наземных и космических проектов (научных, социальных, экономических и многих других), национальной и коллективной безопасности. Сейчас человечеству уже без помощи такого арсенала космической техники не обойтись.

В последние десятилетия особенно интенсивно развивались космические системы всеобщего использования — это средства обеспечения услуг по навигации, метеорологическому прогнозу, поисково-розыскных акций, связи, интернету. Время орбитального функционирования действующих ИСЗ измеряется от недели до десятков лет. Они размещаются в основном в трёх орбитальных районах — на низких орбитах (преимущественно до 1500 км), на полусинхронных (полусуточных) и на геостационарной орбите.

Вместе с расширением освоения ОКП усиливается и его техногенное засорение и, разумеется, противодействие второму первому. На это не сразу обратили внимание, а когда обратили, было уже несколько поздно. К тому же здесь включился ещё один неприятный фактор — скептицизм значительной части общества, в том числе и представителей научных кругов, в отношении той угрозы, которую представляет КМ для успешного осуществления космической деятельности. Господствовало мнение, что, мол, космос необъятен, безграничен и выдержит всё. И за такое представление о космосе как о бездонной бочке, в которую можно безнаказанно сваливать мусор в любом количестве, человечество, в конце концов, поплатилось близким к катастрофическому современному состоянием техногенной засорённости ОКП.

И всё это происходило несмотря на то, что множество групп специалистов во всём мире было всерьёз озабочено этой проблемой. Её исследованием занимались и в космических агентствах различных государств, и практически во всех академиях наук, и во многих научных и конструкторских учреждениях, и в военных организациях. Но эти группы и сообщества были структурно разрознены, хотя и общались между собой.

Наконец, сама собой созрела идея объединения всех специалистов, занимающихся этой проблемой. И в 1993 г. официально оформился международный орган, единственной

12 задачей которого было всестороннее изучение проблемы техногенного засорения ОКП и выработка мер противодействия этому процессу. Это — Межагентский координационный комитет по проблеме техногенного засорения космического пространства (*англ.* Inter-Agency Space Debris Coordination Committee — IADC).

Введение

Нельзя сказать, что общество полностью игнорировало проблему техногенного засорения ОКП. Начиная с 1981 г. Генеральная Ассамблея ООН ежегодно принимает резолюции с призывом использовать космос только в мирных целях и подписать многостороннее соглашение о прекращении гонки вооружений в космосе. Резолюция получает почти единодушную поддержку, хотя в 2005 г. США и Израиль проголосовали впервые против. Тем не менее, многие космические державы не перестают наращивать своё космическое вооружение и разрабатывать соответствующие проекты, что вносит значительный вклад в продолжающееся засорение ОКП.

Наиболее авторитетной международной организацией, деятельность которой полностью посвящена изучению проблемы техногенного засорения космического пространства и выработке рекомендаций по его торможению и противодействию его негативным последствиям, выступает упомянутый выше комитет IADC. Это важнейший международный орган, охватывающий своей деятельностью полный круг проблем, связанных с КМ, включая получение координатных и некоординатных измерений КО, научное описание и исследование околоземной космической среды, моделирование, защиту КА, меры противодействия дальнейшему засорению ОКП и снижения его негативного влияния на космическую деятельность.

Идея создания такого органа возникла после взрыва РН Европейского космического агентства (ЕКА) Ariane V-16 в 1986 г. Официально его структура была оформлена только в апреле 1993 г. в Центре управления космическими полётами ЕКА (*англ.* European Space Operations Center — ESOC) в Дармштадте (*нем.* Darmstadt), Германия. Членами-основателями стали Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства США (НАСА), Российское космическое агентство (РКА, ныне Роскосмос), ЕКА и единая делегация от трёх японских космических агентств, позднее объединившихся в одно (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA). В таком составе IADC просуществовал три года. С 1996 по 2000 г. в комитет были приняты космические агентства ещё семи стран — Китая, Франции, Германии, Индии, Италии, Украины и Великобритании. К началу 2011 г. в качестве 12-го члена было принято космическое агентство Канады (*англ.* Canadian Space Agency — CSA). Последним, 13-м членом IADC в октябре 2014 г. стало корейское аэрокосмическое агентство (*англ.* Korea Aerospace Research Institute — KARI).

Структурно IADC состоит из руководящей группы (*англ.* Steering group) и четырёх рабочих групп: WG-1 (*англ.* Working Group) (измерения), WG-2 (среда и база данных), WG-3 (защита КА) и WG-4 (меры по смягчению влияния и снижению засорённости ОКП). Сфера деятельности комитета определена его уставом (Terms of Reference, <http://www.iadc-online.org>).

Комитет проводит ежегодные четырёхдневные сессии каждую весну, на которых присутствует более 100 специалистов в этой области. Руководящая группа, состоящая из глав всех 12 национальных делегаций, собирается также на один день и каждую осень во время Международного аэрокосмического конгресса. Пандемия с 2019 г. несколько скорректировала этот регламент.

С 2001 г. по просьбе Научно-технического подкомитета Комитета ООН по мирному использованию космического пространства (*англ.* United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer — UN COPUOS) IADC регулярно представляет ему обобщённые технические отчёты о состоянии космической среды и соответствующих проблемах, т.е. официально является консультативным органом ООН. На основе этих отчётов ООН выпускает свои рекомендации по использованию ОКП.

Комитет периодически организует и координирует проведение международных кампаний по наблюдению КМ: в области ГЕО — в 1999, 2002, 2003 гг., в области низких орбит — в 1996, 1999, 2000, 2003, 2004, 2006–2008 гг. и т.д.

Ежегодные сессии Комитета являются трибуной для интенсивного и взаимно полезного обмена информацией и мнениями между компетентными экспертами в данной области ведущих космических держав мира и не только. Издаётся много технических документов, открытых широкой общественности. НАСА выпускает ежеквартальный сборник материалов, освещающий широкий спектр важных текущих событий, злободневных проблем, последних научных и технических достижений в области космической деятельности государств и техногенного засорения космоса (*англ. Orbital Debris Quarterly News*), в котором печатаются участники сессий Комитета. Первый аналитический обзор этих отчётов за семь лет (2014–2020) на русском языке вышел в 2021 г. [13]. Существовал также международный научный журнал *Space Debris* с международной редколлекгией, который, к сожалению, недавно закрылся из-за отсутствия спонсора. К счастью, в настоящее время материалы по проблемам техногенного засорения космоса публикуются в весьма широком кругу печатных изданий.

США, располагая гигантскими финансовыми ресурсами, инвестирует большие средства в исследование техногенной засорённости ОКП, разработку и внедрение мер по обузданию этого процесса, в многостороннее освещение и популяризацию всей этой проблемы. Под эгидой американского Национального исследовательского совета (*англ. National Research Council*) — главного научного органа США, в который входят все три академии (наук, инженерная и медицинская) — в рамках одного из его подразделений: Совета по авионавтике и космической технике, в 1993 г. был создан Международный комитет по проблеме техногенного засорения космоса. Автор настоящей монографии — член этого органа. Результатом работы комитета стала первая полная монография по проблеме КМ, вышедшая в конце 1995 г. [5].

К двадцатилетию официального существования IADC его основными достижениями представляются следующие:

- значительная роль в образовании весьма многочисленного сплочённого всемирного сообщества исследователей проблем техногенного засорения ОКП;
- разработка основных международно-согласованных направлений снижения засорённости космоса и её последствий;
- создание международной сети обмена данными для случаев неконтролируемого входа в атмосферу крупных КО, создающих угрозу для людей на Земле и их собственности;
- организация периодических международных кампаний наблюдения несопровождаемых низко- и высокоорбитальных КО;
- разработка руководств для проектирования и конструирования эффективной защиты КА от КМ [14];
- создание научно-технической платформы для обоснованной выработки подразделенными ООН всеобщей политики освоения космического пространства в части охраны экологии ОКП и безопасности космической деятельности.

НАСА сформировало собственную программу по КМ, включившую требования по ограничению засорения ОКП, соответствующие рекомендации и стандарты [15], которая корректировалась и уточнялась в последующие годы. В 2008 г., как составляющее этой программы, вышло справочное пособие по ограничению техногенного засорения ОКП [16]. Последнее официальное обновление Правительственной программы США по противодействию негативного влияния КМ на космическую деятельность (её предыдущая редакция была в 2001 г.) состоялось в ноябре 2019 г. [17].

С 1988 г. каждый американский президент одним из пунктов национальной политики освоения космоса США объявлял ограничение роста КМ. Впервые в истории Президент Барак Обама 28 июня 2010 г. объявил Национальную космическую политику США, включив в неё требование проведения исследований, разработки технологий и методов удаления КМ. Документ вышел под заголовком «Сохранение космической среды и ответственное использование космоса» [18, 19].

Радикально отношение к проблеме начало меняться лишь в последнее время. Ещё в 1995 г. Национальный исследовательский Совет США утверждал [5], что опасность со

14 стороны КМ видится умеренной, и нет примеров серьёзного повреждения КА или разрушения их в результате столкновения с КМ. (Заметим, что эта организация — одна из наиболее обеспокоенных засорением ОКП.) Но уже через год, 24 июня 1996 г., произошло событие, буквально ошеломившее скептиков. Очень дорогой французский экспериментальный КА радиоэлектронной разведки Cerise (*фр.* Characterisation de l'Environnement Radio-Electrique par un Instrument Spatial Embarque) столкнулся с фрагментом ракеты-носителя Ariane, и в результате КА был разрушен.

За этим не заставили себя долго ждать и другие драматические события в космосе, о которых будет подробно рассказано далее в книге.

Знание состояния космической среды необходимо, прежде всего, для грамотной, профессиональной организации освоения околоземного космического пространства и его последующей ответственной, эффективной и в то же время бережной эксплуатации.

Понятно, что для этого необходимо иметь по возможности более адекватное представление о среде, в которой всё это происходит. Для получения этих знаний требуются соответствующие инструменты, с помощью которых ОКП должно постоянно и с достаточной подробностью контролироваться. В настоящем разделе поговорим о том, какие это должны быть инструменты, какие реально сейчас имеются, об их возможностях и чего нам не хватает.

Поскольку предмет мониторинга — действующие КА и космический мусор — охватывает широкий диапазон орбит и имеет самые разнообразные характеристики (орбитальные параметры, размер, масса, плотность, скорость движения, форма, химический состав материала, отражающая способность и т.д.), то для контроля всего этого разнообразия требуется широчайший ассортимент средств наблюдения и анализа.

Непосредственное наблюдение КО с помощью различных радиолокационных, оптических, оптико-электронных, радиотехнических, лазерных средств (как наземных, так и бортовых) — это первичный и самый надёжный способ получения информации о КМ. Для комплексной обработки и анализа огромной и разношёрстной массы полученных и продолжающих поступать измерений должен существовать богатый и выверенный арсенал математических методов и алгоритмов. И уж конечно не обойтись без множества простых и многоцелевых моделей для объединения фрагментарных наблюдений по возможности в единую и целостную картину, а также для составления краткосрочных и долгосрочных прогнозов состояния среды и оценки степени её опасности для космической деятельности. К качеству этих прогнозов предъявляются высокие требования и, прежде всего, к их точности и полноте.

Для начала рассмотрим орбитальную структуру техногенной засорённости ОКП, сформировавшуюся за 65-летний период его эксплуатации, на предмет того, что же конкретно должно контролироваться.

1.1. Классификация околоземных орбит

Вообще говоря, нет единого мнения относительно классификации орбит, хотя в последние годы наблюдается тенденция к его более устойчивому формированию. Начать хотя бы с того, что нет однозначного понимания границы, где заканчивается воздушное пространство и начинается космос. Большинство специалистов считает, что космос начинается с высоты 100 км над Землёй. Однако до сих пор отсутствуют общепринятые официальные определения и обоснования этой границы [20, 21].

В большинстве случаев (в том числе, в формате обсуждений в IADC) принято различать следующие орбитальные категории:

- низкие (*англ.* Low Earth Orbits — LEO),
- солнечно-синхронные (*англ.* Sun-Synchronous Orbits — SSO),

- средневысотные (*англ.* Medium Earth Orbits — MEO),
- круговые полусинхронные (*англ.* Circular Semisynchronous Orbits — CSO),
- высокоэллиптические (*англ.* Highly Elliptical Orbits — HEO),
- геостационарная (ГЕО) (*англ.* Geostationary Earth Orbit — GEO),
- геосинхронные (ГСО) (*англ.* Geosynchronous Orbits — GSO),
- высокие (*англ.* High Orbits — HO),
- сверхвысокие орбиты (*англ.* Super-High Orbits — SHO),
- орбиты захоронения (*англ.* Disposal Orbits — DO).

Эта классификация условно представлена блок-схемой на рис. 1.1.1. Наличие пунктирных линий обязано неоднозначности определения почти всех классов, а в первую очередь средневысотных и высоких орбит.

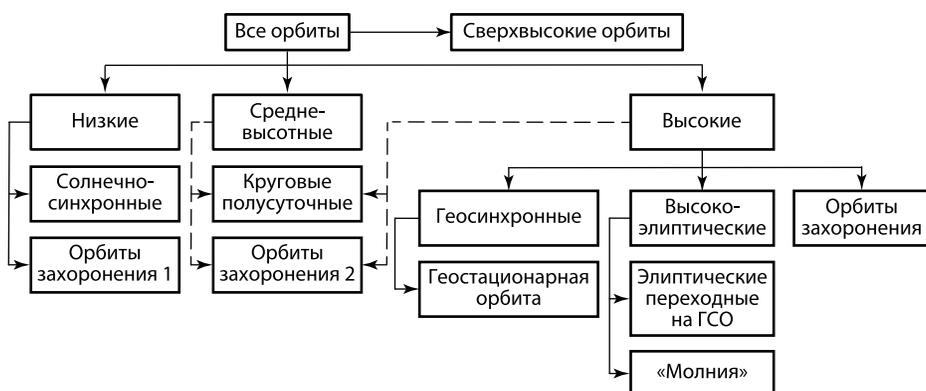


Рис. 1.1.1. Условная классификация околоземных орбит

Категория орбит LEO включает диапазон высот от 100 км (иногда немного ниже, так как некоторые ИСЗ остаются неразрушенными и на более низких высотах) до 2000 км (стандарт НАСА и IADC). У разных экспертов верхний предел этого диапазона колеблется от 1500 до 3000 км, редко до 5000 км, но бывает и 600 км. Короче, разброс мнений специалистов большой.

Солнечно-синхронная орбита (SSO) — низкая орбита с попятным движением, в котором плоскость орбиты прецессирует с той же скоростью, с какой Земля обращается вокруг Солнца. КА на такой орбите ежедневно наблюдает одну и ту же освещённость Земли.

Средневысотные орбиты (MEO) присутствуют не во всех классификациях экспертов, а там, где они включены, могут охватывать диапазоны высот от 5000 до 10 000 км [7], от 1500 или 2000 до 20 000 км или до ГЕО, иногда это некоторая область около 20 000 км [22]. Есть и другие варианты. Короче говоря, у разных экспертов нет единого мнения относительно границ этого класса орбит.

Круговые полусинхронные орбиты (CSO) исторически используются навигационными системами NAVSTAR (*англ.* NAVigation Satellites providing Time And Range), GPS (*англ.* Global Positioning System), GLONASS (*англ.* Global Navigation Satellite System, Russia), Galileo, Beidou (Compass) и характеризуются периодом обращения ИСЗ равным ~12 ч. Средняя высота такой орбиты — ~20 200 км. В некоторых классификациях эти орбиты включаются в состав средневысотных [23]. Эта орбитальная область всё более интенсивно эксплуатируется по мере заполнения её навигационными КС: к американской GPS (ранее NAVSTAR) и российской GLONASS добавились европейская Galileo и китайская Beidou — в 2020 г. уже глобальная.

Высокоэллиптические орбиты (HEO) имеют эксцентриситет более чем 0,5–0,6 (в разных классификациях). Этот класс орбит включает такие подклассы, как орбиты типа «Молния» и переходные эллиптические орбиты (Geostationary Transfer Orbits — GTO).

Орбиты типа «Молния» — высокоэллиптические орбиты с наклоном 63–65°, периодом около 12 ч и апогеем в северном полушарии. Эти орбиты всегда использовались для обеспечения связи и функций раннего предупреждения о ракетном нападении (ПРН).

Переходные эллиптические орбиты (GTO) с апогеем в геостационарном поясе и перигеем в области низких орбит используются для перевода ИСЗ с низкой орбиты на геосинхронную, в частности, геостационарную. Ракеты-носители, применяемые для осуществления такого перехода, остаются на этих орбитах после того, как полезный груз отделится и выйдет на ГЕО или другую геосинхронную орбиту. Время существования таких КО составляет от месяца до более чем 100 лет [24].

Высокие орбиты (НО) — пожалуй, самый неопределённый класс орбит, так как в основу его установления могут быть положены самые различные принципы, например, отсутствие влияния атмосферы на движение ИСЗ, наличие заметных лунных и солнечных возмущений, удалённость от наземных средств наблюдения и т.п. Даже в пределах одного принципа существует значительная неопределённость. Например, верхняя граница атмосферы — довольно условное понятие (100–500, 600, 700, 800 км...?). При исследовании влияния Луны и Солнца на движение КО к высоким относят орбиты, для математического описания которых этим влиянием практически пренебречь нельзя. Это орбиты высотой более 10 000–20 000 км (здесь нижняя граница является неопределённой). Более того, влияние Луны и Солнца и даже сам характер этого влияния на движение ИСЗ существенно зависит от пространственной ориентации плоскости его орбиты относительно этих небесных тел.

С точки зрения невозможности обеспечения устойчивого контроля движения ИСЗ по измерениям наземной сети радиолокационных станций (РЛС) к высоким орбитам относят орбиты с периодом более трёх часов и, в частности, высокоэллиптические с перигеем в южном полушарии [25, 26]. Кстати, аналогичный подход к определению высоких орбит принят в Линкольневской лаборатории Массачусетского технологического института (*англ.* Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology) [27], где КО считается высоким, если период его обращения превышает 225 мин, что соответствует высоте 5000 км. Есть и другие точки зрения [7, 22, 28].

Сверхвысокие орбиты (SHO) — орбиты с высотой апогея, значительно превышающей высоту геосинхронных орбит и высоту всех орбит захоронения. Примерами таких орбит могут служить орбиты лунного зонда КА «Клементина» (*англ.* Clementine), КА «Астрон» (200 000 км) и некоторые другие.

Геостационарная орбита (ГЕО) (*англ.* Geostationary Orbit — GEO) — орбита с периодом около 24 ч и наклоном и эксцентриситетом, близкими к нулю. Находясь на такой орбите, ИСЗ занимает относительно постоянное положение над экватором на высоте ~35 786 км (расчётный радиус орбиты 42 164 км). Небольшие отклонения эксцентриситета и наклона от нуля приводят к регулярным перемещениям КО около фиксированной точки. Геостационарная орбита и по сегодняшний день остаётся стратегически важной орбитой для владельцев и операторов искусственных спутников Земли. Общее число геостационарных спутников с учётом уже нефункционирующих превышает 1000 аппаратов. Количество работающих спутников на геостационарной орбите тоже неуклонно растёт. За последние 10 лет их число выросло приблизительно с 400 до 570.

Геосинхронные орбиты (Geosynchronous Earth Orbits — GSO) — близкие к круговым орбиты с периодом приблизительно 24 ч и любым наклоном. При наблюдении с Земли такие ИСЗ в течение суток описывают некую фигуру — так называемую восьмёрку. Чем больше эксцентриситет орбиты, тем значительнее размах восьмёрки. Точка симметрии фигуры находится в экваториальной плоскости. Орбита GEO — частный случай GSO-орбиты.

Только с 1963 по 2000 г. на геосинхронные орбиты было произведено более 500 запусков и размещено там свыше 830 КА и РН. В первом десятилетии нашего века запуск КА на геосинхронные орбиты составил примерно 40 % всех космических стартов [24, 29].

Космический мусор в области GSO включает, по крайней мере, две важные популяции — одна состоит из КО, подчиняющихся стандартным законам разрушения, другая представляет КО с аномально высоким отношением площади поперечного сечения к массе (от 1 до 30 м²/кг; для примера, у листа бумаги это отношение равно 13 м²/кг) [30]. Последняя популяция КМ на геосинхронных орбитах была обнаружена с помощью телескопа EKA SDT (*англ.* Space Debris Telescope). Комитет IADC занялся тщательным изучением этого класса КМ. Были определены основные характеристики популяции — наклонение от 0 до 30°, изменение эксцентриситета от 0 до 0,6.

Иногда рассматривают как самостоятельный класс (точнее, классы) орбиты захоронения (DO). КА по завершении своего функционального существования превращаются в КМ, представляющий угрозу для действующих КА и, в том числе, выведенных им на замену. Поэтому целесообразно переводить их на маловостребованные орбиты захоронения. Особенно это критично для КА, функционирующих на столь переполненной орбите, как ГЕО [31].

Рассматриваются и используются орбиты захоронения и для ИСЗ, действующих на верхних орбитах из класса низких [32], и для класса полусинхронных орбит. Для каждого из этих трёх классов орбиты захоронения свои. Для ИСЗ с полусинхронными орбитами, например, космической системы GPS, орбиты захоронения расположены на 220–810 км выше или на 95–250 км ниже их первоначальных, рабочих орбит [5]. В начале 2000-х гг. КА GPS стали переводиться в конце функционирования на орбиты захоронения с нижней границей 500 км выше номинальной [22]. Однако исследования показали, что вследствие явления лунно-солнечного резонанса у таких орбит наблюдается рост эксцентриситета, что в конце концов приводит к опасным их пересечениям с рабочими орбитами навигационных КС [23], что в последнее время начали учитывать.

На геостационарной орбите КА, принадлежащие ряду стран и организаций, начиная с 1977 г. регулярно переводятся на орбиты захоронения, расположенные на 50–1000 км выше ГЕО. Однако некоторые КА были переведены на орбиты ниже ГЕО. Комитет IADC считает наиболее целесообразным перевод отработавших геостационарных КА на 300 км выше ГЕО. В 2004 г. в США Федеральная комиссия по связям выставила требования к операторам ИСЗ переводить геостационарные ИСЗ по завершении их функционирования на орбиты захоронения в 200–300 км выше ГЕО, и в 2005 г. эти правила были введены в действие.

На свои орбиты захоронения переводятся отработавшие КА и с орбит других классов. Так, в 2001 г. 19-летний американский Landsat-4 был выведен из эксплуатации и с 705-километровой рабочей орбиты переведён на орбиту ниже 600 км. В 2005 г. два списанных КА НАСА ERBS (*англ.* Earth Radiation Budget Satellite) и UARS (*англ.* Upper Atmosphere Research Satellite), пролетавшие до этого 21 год и 14 лет, соответственно, и продолжавшие работать на орбитах ниже 600 км, с помощью соответствующих манёвров были «опущены» ещё ниже, где время их существования сократилось до 25 лет. Американский военно-морской ИСЗ GFO (*англ.* Geosat Follow-on) (из серии «Геосат», *англ.* GEOSAT — GEOdetic SATellite), запущенный в 1998 г. для океанографических исследований на орбиту с высотой 800 км, в ноябре 2008 г. был переведён на орбиту 455×785 км, с которой войдёт в атмосферу раньше, чем через 25 лет. В июле 2009 г. французский 19-летний ИСЗ SPOT-2 (*фр.* Satellite Pour l'Observation de la Terre) с рабочей орбиты высотой 825 км с помощью 11 манёвров был переведён на орбиту захоронения 575×795 км, где и просуществует пассивно не более 25 лет. То же самое сделали с его предшественником SPOT-1 в ноябре 2003 г. [33]. Локализации орбит захоронения постоянно уточняются, а технологии перевода на них ИСЗ совершенствуются, обоснование чего не является простым вопросом.

Перемещение отработавшего КА в область «захоронения» уменьшает риск столкновения на рабочих орбитах, но увеличивает этот риск на новых орбитах (захоронения), что не позволяет считать такой подход к смягчению влияния техногенной засорённости ОКП радикальным. Причиной роста засорённости ОКП могут быть не только столкновения, но и взрывы КО из-за «энергетических» остатков на его борту (горючего, аккумуляторов и т.д.), не говоря уже о преднамеренных взрывах, которых, к счастью, становится всё меньше благодаря постепенному торжеству благоразумия.

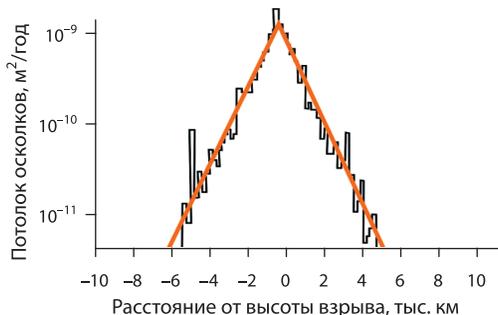


Рис. 1.1.2. Расчётный поток из 500 осколков размером более 10 см от взрыва КО на высоте ГЕО

И в том и в другом случаях следствием могут стать многочисленные осколки, способные пересечь и рабочие орбиты. Этому способствует и тенденция роста эксцентриситета, в частности, у средневысоких орбит. Поэтому приходится при переводе таких ИСЗ на орбиты захоронения минимизировать начальный эксцентриситет и выбирать конфигурацию орбиты захоронения, минимизирующую его рост.

Вместе с тем, практикуемое сейчас пассивирование энергетических остатков на борту уменьшает вероятность взрывов на орбитах захоронения. Это особенно актуально для высоких орбит, где взрыв или столкновение могут породить множество осколков, орбиты которых способны эволюционировать далеко за пределы орбиты взрыва. При этом время их существования на высоких орбитах достаточно велико. На ГЕО оно может достигать миллионов лет. А это уже перспективная угроза рабочим орбитам.

На рис. 1.1.2 [34] показано количественное влияние взрыва на ГЕО на образование дополнительных потоков крупных осколков (размером более 10 см) на близких высотах. Аналогичную зависимость (ежегодное приращение плотности потока осколков в зависимости от разности высот) можно распространить и на случай взрыва на орбите захоронения вблизи ГЕО.

Из рисунка видно, что, чем дальше орбита захоронения от начальной, тем меньше фрагментов разрушения, если оно произойдёт на орбите захоронения, достигнет начальной орбиты.

Перевод КА на орбиту захоронения естественно связан с определёнными затратами. Во-первых, КА и РН должны иметь соответствующие системы управления двигателем и ориентацией. Во-вторых, для совершения соответствующего манёвра необходимо при планировании миссии и проектировании КА предусмотреть дополнительный запас топлива, а это приходится делать либо за счёт уменьшения массы выводимой на орбиту полезной нагрузки, либо за счёт уменьшения расхода топлива на операции по основной рабочей программе (например, для корректировки орбиты). При расчёте этого дополнительного объёма топлива обнаруживается следующая важная закономерность: чем выше рабочая орбита и, соответственно, орбита захоронения, тем меньше требуется топлива для осуществления манёвра с целью изменения высоты орбиты КА на одну и ту же величину.

Между прочим, эта закономерность объясняет и тот факт, что при взрыве на разных высотах разлёт осколков взрыва происходит по-разному. На больших высотах образовавшиеся осколки «захватывают» более широкий диапазон новых орбит, чем на низких, при одной и той же мощности взрыва и при тех же начальных скоростях отделения фрагментов.

На рис. 1.1.3, также подтверждающем эту закономерность, для трёх типичных классов орбит показано необходимое изменение скорости КА, требуемое для перевода его на орбиту захоронения, отстоящую от рабочей на указанную на оси абсцисс величину [5].

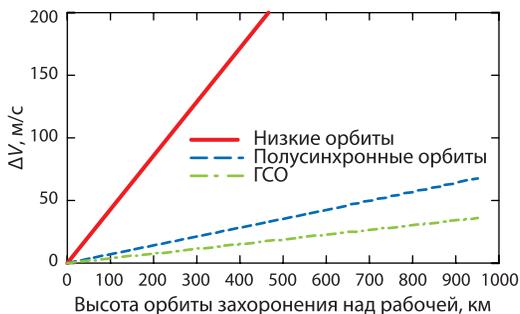


Рис. 1.1.3. Приращение скорости, необходимое для вывода ИСЗ на орбиту захоронения (для трёх классов орбит)

В своё время были и другие предложения по решению проблемы захоронения ИСЗ в конце их активной жизни. Например, отбуксировать их в так называемые стабильные точки на ГЕО, расположенные на 75° в.д. и 105° з.д.

Коме того, рассматривалась возможность переводить геостационарные КО на геосинхронную орбиту в плоскости Лапласа с наклоном $7,3^\circ$, где действие главных возмущений компенсирует друг друга. В результате КО, движущиеся по этой орбите, имеют тренд оставаться на ней, а их относительные скорости составляют всего несколько метров в секунду, т.е. практически не опасны в случае столкновений. Это очень важный фактор.

При размещении ИСЗ в плоскости Лапласа не требуется регулярных коррекций орбиты для компенсации «южно-северных» колебаний, на что обычно уходит 95 % топлива, отведённого на коррекцию орбиты.

Однако у этих вариантов снижения опасности со стороны КМ на ГЕО оказалось достаточно много недостатков. Наиболее удовлетворительным с многих точек зрения остаётся перевод КО на орбиту захоронения в той же экваториальной плоскости вверх или вниз. Показано, что минимальное расстояние орбиты захоронения, обладающей достаточной эффективностью, равно 300 км вверх [31, 35]. Для подъёма орбиты КА над ГЕО на 300 км требуется расход топлива 1,69 кг на 1000 кг массы КА, что эквивалентно расходу топлива на обычную корректировку орбиты в течение трёх месяцев.

Тем не менее, разногласия по поводу целесообразности перевода геостационарных КО на орбиту захоронения среди экспертов остаются. Несмотря на кажущуюся привлекательность такого манёвра в конце жизни КА, он не даёт радикального решения проблемы «очистки» ГЕО (суммарная масса и кинетическая энергия в ОКП не уменьшаются). Такой приём всего лишь несколько расширяет область риска столкновений, тем самым временно снижая «плотность» риска, а его практическая ценность не так уж высока в виду и без того малой вероятности и невысокой опасности столкновений на ГЕО в настоящее время [5]. Здесь, тем не менее, оценка «не так уж высока» имеет количественную меру: более 40 взрывов и серьёзных (позволивших их обнаружить по анализу позиционных измерений) столкновений на ГЕО [36]. Похожие доводы можно привести и для других орбитальных областей захоронения.

Наиболее интенсивно используемые в настоящее время орбитальные области — это самые низкие орбиты (от 100 до 800 км), орбиты с высотами от 900 до 1000 км, от 1400 до 1500 км; средневысотные в окрестности 20000 км; высокоэллиптические орбиты и, наконец, геостационарная орбита. Гистограммы распределения КО по высотам приводятся на рис. 2.3.3 и 3.2.4 (см. с.).

Мониторинг ОКП бывает затруднён не только ввиду многочисленности КО, малых размеров и/или большой удалённости большинства из них, плохой отражательной способности и/или фазы освещённости, но и из-за многочисленных манёвров и орбитальных

коррекций многих действующих КА. В последних случаях часто приходится прибегать к их поиску. Методы поиска КА после манёвра или орбитальной коррекции (в том числе оптимальные и субоптимальные) предложены и описаны, например, в монографиях [25, 26].

Приведённая классификация не претендует на полноту и универсальность, да идеальной классификации и не существует. Некоторые классы пересекаются между собой: низкие орбиты и солнечно-синхронные, геосинхронные орбиты и геостационарная). Все перечисленные классы орбит могут и не покрывать всего многообразия околоземных орбит, например, в зависимости от того, что в каждом конкретном случае понимается под классом средневысоких орбит или какие орбиты относить к высоким, сверхвысоким.

1.2. Системы контроля космического пространства

Исторически так сложилось, что прежде всего контролю должны подлежать крупные космические объекты. По обнаруженным КО должен вестись динамический каталог, в котором содержатся сведения о назначении КО, их принадлежности, состоянии, параметрах орбит, различных некоординатных характеристиках и пр. Эта информация должна регулярно уточняться по результатам наблюдений КО. Для выполнения этих функций требуются создание и эксплуатация весьма дорогой сети средств наблюдения — системы контроля космического пространства.

В мире в настоящее время существуют только две системы средств наблюдения, способные систематически и достаточно эффективно решать эту задачу. Это Системы контроля космического пространства (СККП) России и США. Они создавались вовсе не для мониторинга засорённости ОКП. Главная задача каждой СККП — обнаружение ИСЗ, представляющих опасность для своей страны с военной точки зрения, и неспроста принадлежат они министерствам обороны своих государств. Для выполнения этой главной задачи необходимо обнаруживать и контролировать движение не только действующих КА, но и всех остальных крупных КО, на фоне которых и осуществляется обнаружение опасных с военной точки зрения объектов. Это последнее условие, а также то, что системы «делались на совесть» и их реальные характеристики перекрывают заданные начальными техническими требованиями, они могут решать и решают более широкие задачи. В этом смысле космическому мусору «повезло». Тем более, что в каталогах КО обеих систем на космический мусор приходится порядка 95 % их содержимого и только 5 % тех КА, ради контроля которых создавались эти системы. И в этом нет никакого нарушения целесообразности.

Российская СККП

В начале 60-х гг. прошлого века политическое и военное руководство Советского Союза пришло к выводу о необходимости организации в военных и народно-хозяйственных целях непрерывного наблюдения за КО искусственного происхождения в ОКП. В 1962 г. вышло Постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР «О создании отечественной службы контроля космического пространства». В основу этого постановления были положены предложения и результаты исследований группы специалистов 45 СНИИ (специальный научно-исследовательский институт) Министерства обороны (МО), позднее переименованного в 45 ЦНИИ (центральный научно-исследовательский институт) МО. В соответствии с этим постановлением в 45 СНИИ МО было образовано специальное управление, предназначенное для разработки необходимых проектных документов, ведения службы контроля космического пространства (ККП) и обучения специалистов по ККП. У истоков создания Российской СККП стояли такие крупные учёные, как доктор технических наук М. Д. Кислик, П. Е. Эльясберг и член-корреспондент АН СССР Н. П. Бусленко.

В 1963–1966 гг. под руководством 45 СНИИ МО был разработан и создан Центр контроля космического пространства (ЦККП) (Ногинск Московской области).



Рис. 1.2.1. Оптико-электронный комплекс «Окно»

К началу 1970-х гг. в ОКП находилось уже более 3000 крупных КО. Но ЦККП был способен каталогизировать из них лишь немногим более 500 КО.

Ввиду активного освоения ОКП было принято решение о максимальном привлечении к наблюдениям за КО практически всех информационных средств, способных обнаруживать и сопровождать КО, — в первую очередь штатных средств Системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и Системы противоракетной обороны (ПРО). Вместе с тем, разрабатывались и специализированные средства наблюдения КО — оптико-электронный комплекс (ОЭК) «Окно» (рис. 1.2.1), размещённый затем в Таджикистане, и радиооптический комплекс распознавания «Крона» с местом посадки на Северном Кавказе.

Но процесс разработки и ввода таких мощных средств довольно трудоёмкий и долгосрочный. Поэтому, по инициативе 45 ЦНИИ МО, на базе астрономических и астрофизических обсерваторий АН СССР и союзных республик и астрономических средств некоторых вузов с 1976 г. начала создаваться Наземная сеть оптических средств наблюдения (НСОС). Долгое время (до ввода в эксплуатацию оптико-электронного комплекса «Окно») НСОС была единственным источником измерений высоких КО, в том числе геостационарных.

К началу 1990-х гг. ЦККП сопровождал уже более 5500 КО, в том числе высокоэллиптические и геостационарные КО на высотах до 40 000 км.

В 1992 г. по инициативе 45 ЦНИИ МО между российскими и американскими специалистами была достигнута договорённость об обмене каталогами КО национальных СККП. В том же году состоялся первый обмен. А через год был создан российско-американский научный семинар по ККП, который продолжал успешно функционировал в течение 23 лет (!). Далее его работа была «заморожена» в виду резко ухудшившихся политических отношений между США и Россией. В такой конкретной форме началось сотрудничество между российской и американской системами ККП, в процессе которого был выполнен ряд успешных работ по совместному контролю входа в атмосферу и падения на Землю крупных КО, а также проведён космический эксперимент ODERACS (*англ.* Orbital Debris Radar Calibration Spheres). Об этом будет рассказано ниже.

В 1999 г. был сдан в эксплуатацию комплекс «Крона» и в опытную эксплуатацию — первая очередь комплекса «Окно», расположенного на высоте 2200 м и контролирующего

КО на высотах 2000 до 40 000 км. Комплекс «Окно» стал основным источником измерительной информации по геостационарным и высокоэллиптическим КО, при этом НСОС продолжала поставлять важную дополнительную информацию и привлекаться для проведения экспериментальных работ в космосе и наблюдению за аварийными КА [37, 43]. В 2003 г. был сдан в опытную эксплуатацию радиотехнический комплекс «Момент», который стал поставлять, прежде всего, некоординатную информацию о радиоизлучающих КА.

До распада СССР российская СККП располагала средствами наблюдения, расположенными как в России, так и на территориях союзных республик. В настоящее время система использует средства наблюдения космического объекта (СН) в основном на отечественной территории (преимущественно средства СПРН и ПРО), а также некоторые РЛС и электронно-оптические средства на территориях стран СНГ на правах аренды.

Российская СККП, будучи информационной системой Вооружённых Сил РФ двойного назначения, выполняет и военные, и гражданские функции, в том числе связанные с международным информационным взаимодействием, и находится в режиме постоянного боевого дежурства [38–42]. Она, например, передаёт в Центр управления космическими полётами (ЦУП) оповещения об опасных сближениях Международной космической станции с другими космическими объектами. Ежедневно проводятся расчёты по выявлению опасных сближений с защищаемыми КА. В среднем в год фиксируется около 4500 таких опасных ситуаций. В 2020 г. зафиксировано 220 опасных сближений с МКС и более 4000 с отечественными КА.

Основные функции СККП (они в основном совпадают с функциями СККП США):

- сбор и обработка позиционных и некоординатных измерений от средств наблюдения;
- идентификация измерений с орбитами каталогизированных КО;
- обнаружение новых КО и определение их начальных орбит;
- уточнение орбит каталогизированных КО;
- планирование наблюдений, расчёт и выдача целеуказаний СН;
- прогнозирование движения КО;
- предсказание сближений КО и их возможных столкновений;
- определение некоординатных характеристик КО;
- определение массогабаритных, конструктивных, отражательных и излучательных характеристик КО, параметров собственного движения относительно центра масс;
- классификация КО по типу (КА, РН, элемент запуска или функционирования КА, фрагмент разрушения и т. п.);
- распознавание КА (определение его государственной принадлежности, целевого назначения, степени опасности, функционального состояния и т. д.);
- расчёт продолжительности существования КО, определение времени и возможного района падения;
- оценка космической обстановки;
- ведение Главного каталога СККП.

Для реализации этих функций в ЦККП поступает большой объём измерительной информации от широкой сети СН [39–45].

Специализированные средства СККП:

- радиооптический комплекс «Крона» на Северном Кавказе, включающий РЛС дециметрового диапазона, РЛС сантиметрового диапазона, лазерный оптический локатор;
- оптико-электронный комплекс «Окно» в Таджикистане, включающий четыре оптико-электронные станции обнаружения ВОКО (высокоорбитальный космический объект) и две оптико-электронные станции сбора информации [37];
- радиотехнический комплекс контроля излучающих КА «Момент» под Москвой, на смену которого приходит более совершенный комплекс.

В последние годы после некоторого периода застоя начали создаваться новые средства.

- РЛС «Днепр» (Мурманск, Иркутск (РФ), Гюльшад (Казахстан));
- РЛС «Дунай-ЗУ» (Подмосковье);
- РЛС «Дарьял» (Печора (РФ), Мингечаур (Азербайджан));
- РЛС «Волга» (Беларусь);
- РЛС «Воронеж» (Ленинградская область, Армавир, Усолье-Сибирское (РФ));
- многофункциональная РЛС ПРО «Дон-2Н»;
- квантово-оптические системы Космических войск.

Этот парк средств в последние годы также начал уверенно пополняться.

Привлекаемые средства:

- наземные оптические средства наблюдения космического пространства, принадлежащие различным гражданским организациям (Российской академии наук (РАН), высшим учебным заведениям и др.); ежедневно они поставляют в ЦККП тысячи единиц измерений по геостационарным КО, что позволяет освободившийся ресурс специализированных оптических средств использовать для наблюдения КО на высокоэллиптических орбитах (сложных с точки зрения точного прогнозирования движения).

Недостаточный парк СН, их отсутствие в районах на многих долготах и широтах обуславливает значительную ограниченность обзора ОКП. Данные измерений со средств наблюдения передаются практически в реальном времени в ЦККП, где на основе стандартной и специальной обработки соответствующих координатной и некоординатной составляющих измерительной информации ведётся динамический каталог КО [8, 38–41, 45, 46].

Чтобы покончить с зависимостью от других стран, в России для СПРН строятся и постепенно вводятся в эксплуатацию ещё шесть РЛС с фазированной решёткой нового поколения высокой заводской готовности типа «Воронеж» с размещением их вдоль западной, юго-восточной и южной границ. Первые две уже размещены в Лехтуси (фин. Lehtusi) и Армавире. Причём армавирская РЛС имеет такое же покрытие пространства, как и РЛС СПРН в Габале (Азербайджан), что позволит обнаруживать запуски ракет со Среднего Востока [8, 40, 41, 43, 47–50]. 23 мая 2012 г. в Усолье-Сибирском Иркутской обл. заступила на опытно-боевое дежурство РЛС высокой заводской готовности «Воронеж-М», принадлежащая СПРН и в то же время (как и другие РЛС этого ряда) взаимодействующая с СККП [51].

СККП США

Как и российская СККП, она наряду со специализированными СН использует также средства других систем и организаций, которые привлекаются «по возможности» и «по мере необходимости» (рис. 1.2.2). СККП использует приблизительно 30 радаров и оптических средств, размещённых на 16 посадочных площадках [8, 52].

Как и в российской СККП, средства наблюдения, используемые в интересах ККП США, делятся на три главные категории: *специализированные* (англ. dedicated) — это СН, основной задачей которых является контроль космического пространства; *сотрудничающие* (англ. collateral) — СН Космического командования Военно-воздушных сил (ВВС) США, главной задачей которых является не контроль космического пространства, а, например, раннее предупреждение о ракетном нападении; *привлекаемые* (англ. contributing) — это СН, принадлежащие другим государственным ведомствам и частным организациям, поставляющие данные наблюдений для СККП по контрактам.

Специализированные: узкодиапазонные радары частотного UHF-диапазона (англ. ultra high frequency) модернизированной системы NAVSPASUR (с перспективой перехода на радары S-диапазона) и «Эглин» (англ. Eglin Air Force Base, Флорида); с 2003 г. радар L-диапазона Cobra Dane (о. Шемайя, англ. Shemya, Аляска) [53]; электронно-оптические средства AMOS/MOTIF (англ. ARPA Maui Optical Station) (о. Мауи), Socorro (Нью-Мексико),

MOSS (*англ.* Maui Optical Space Surveillance Complex) (Морон-де-ла-Фронтера, *исп.* Morón de la Frontera, Испания), Диего Гарсиа (*англ.* Diego García). Последние входят в состав электронно-оптического комплекса зондирования глубокого космоса ГЕОДСС (наземная электронно-оптическая станция зондирования, *англ.* Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance — GEODSS).

Основными средствами обнаружения и наблюдения КО американской СККП являются следующие [27].

Сотрудничающие: радары UHF-диапазона: EWR (*англ.* Early Warning Radar) Клир (*англ.* Clear, Аляска), Биль (Калифорния), PARCS (*англ.* Perimeter Acquisition Radar Characterization System, Туле *англ.* Thule, Гренландия), Отис, Файлингдейлс (*англ.* Fylingdales) (Великобритания).

Привлекаемые: ALTAIR (*англ.* ARPA Long-Range Tracking And Instrumentation Radar) (UHF- и VHF-диапазоны (*англ.* very high frequency)), TRADEX (*англ.* Tracking and Discrimination Experiment) (L- и S-диапазоны), ALCOR (*англ.* ARPA Lincoln C-Band Observables Radar) (С-диапазон), MMW (*англ.* Millimeter-Wave Radar) (Ka- и W-диапазоны), Каена-Пойнт (С-диапазон) — все пять на островах в Тихом океане; «Миллстоун» (*англ.* Millstone) (L-диапазон), «Хейстек» (*англ.* Haystack Orbital Debris) (X-диапазон) — после модернизации «Хусир» (HUSIR — *англ.* Haystack Ultra-wideband Satellite Imaging Radar) в двух диапазонах — X и W (см. подразд. 1.3), HAX (*англ.* Haystack Auxiliary (Radar)) (Ku-диапазон), радар Globus II в Вардо, Норвегия (X-диапазон).

Есть также средства пассивного обнаружения бортовых радиосигналов, т.е. средства радиотехнического контроля (*англ.* Pulse Repetition Frequency — PRF) [54].

Важной составляющей американской СККП, которая вносит значительный вклад в контроль космоса, выступает наземный электронно-оптический комплекс зондирования глубокого космоса ГЕОДСС. В своё время он заменил устаревшие камеры Бейкер-Нанн. В настоящее время действуют три штатных поста этого комплекса: в Сокорро, Нью-Мексико, на о. Мауи (*зав.* Maui), Гавайи, и на о. Диего-Гарсиа, Британская территория в Индийском океане (рис. 1.2.3). Существовала ещё станция в Южной Корее, но она была закрыта в 1993 г. по целому ряду причин (смог от ближайшего города, неблагоприятные климатические условия и большие расходы на содержание). Есть ещё передислоцируемый телескоп на американской авиабазе Морон в Испании — по сути, дочерняя станция комплекса ГЕОДСС.



Рис. 1.2.2. Размещение СН, используемых СККП США

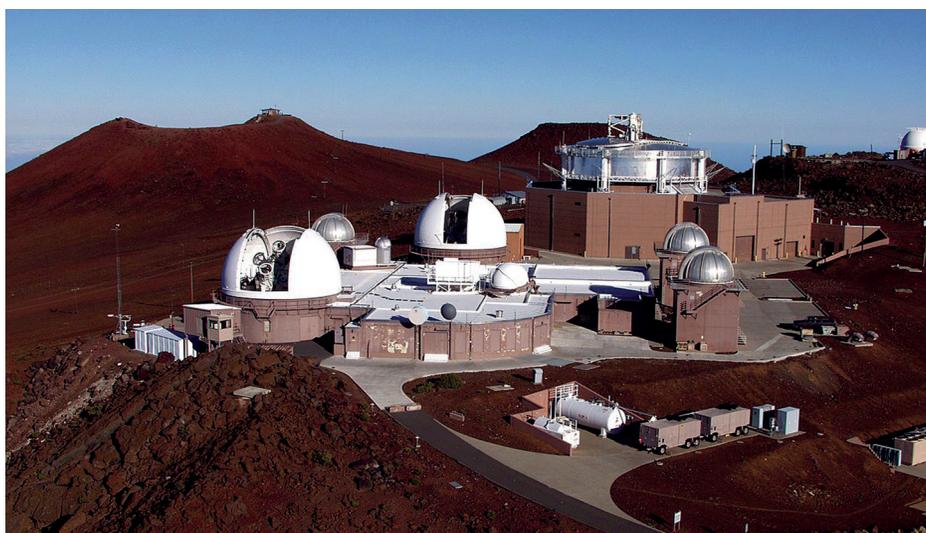


Рис. 1.2.3. Пост ГЕОДСС на о. Диего-Гарсиа и на вершине кратера Халеакала (*зав. Haleakalā*) на Гавайях

Комплекс ГЕОДСС контролирует высоты от 4500 км до геосинхронных орбит и выше. Каждый пост располагает тремя телескопами с апертурой 1,02 м и полем зрения 2° , оснащёнными ПЗС-камерами (прибор зарядовой связи), и наблюдает за ночь более 3000 КО [55, 56].

СККП США уверенно обнаруживает и сопровождает низкоорбитальный космический объект (НОКО) размером более 10 см. Центр контроля СККП США получает свыше 500 000 измерений ежедневно. В 2010 г. объём официального каталога СККП США составлял более 21 000 КО [8]. В 2021 г. в нём хранились формуляры более чем о 23 000 КО [57] а в 2022 г. — более 25 500. То есть прогресс наращивания объёма каталога КО налицо.

Раньше этот каталог, правда, в ограниченном объёме и с заниженной точностью элементов орбит, был в свободном доступе в интернете. С 2004 г. США ограничили этот доступ в интересах национальной безопасности [58, 8, 59].

Есть сведения, что в СККП США ведётся более мощный каталог, содержащий более мелкие КО и насчитывающий более 100 000 КО. Однако он доступен лишь для внутреннего пользования.

Основные функции СККП США определены как следующие:

- предсказание места и времени входа КО в плотные слои атмосферы;
- предотвращение ложной тревоги в случаях, когда входящий в атмосферу КО может восприниматься радаром как ракетное нападение;
- определение текущего положения КО и параметров его орбиты и предсказание их будущих значений;
- обнаружение новых техногенных объектов в космосе;
- ведение динамического каталога техногенных КО;
- определение государственной принадлежности КО, входящего в атмосферу;
- информирование НАСА о КО, представляющих угрозу для полёта межорбитального космического корабля (МКК) шаттл (до их списания), действующих ИСЗ и МКС.

Как видно, задачи российской СККП и СККП США во многом схожи, однако есть и некоторые различия, в том числе и в приоритетах задач.

До 2003 г. функции американской ККП были как в ведении ВВС США, так и их военно-морских сил. Средства контроля космоса тоже делились между этими ведомствами. Раньше СККП США имела два ЦККП — основной в округе Шайенн (*англ.* Cheyenne County) штата Колорадо и запасной (принадлежавший Военно-морскому флоту (ВМФ) США) в Дальгрене (*англ.* Dahlgren) штата Вирджиния [60]. Функции ККП и, прежде всего, в части получения и обработки измерительной информации тоже были разделены. Основной ЦККП отвечал за координатную (позиционную) информацию и слежение за КО, а запасной — за некоординатные данные, идентификацию и распознавание ИСЗ. Тем не менее, оба центра в конце концов владели и той, и другой информацией.

ВМФ имел в своём распоряжении очень мощный радиолокационный барьер NAVSPASUR (*англ.* Navy Space Surveillance System), существовавший с 1960-х гг. Он состоял из трёх передающих (излучающих) и шести приёмных РЛС, размещённых по дуге большого круга через всю южную часть территории США. Это был полный мультистатистический радиолокационный интерферометр непрерывного излучения в частотном диапазоне VHF. Каждый приёмник мог принимать отражённый от КО сигнал, посланный любым передатчиком комплекса. Но система состарилась, и была принята программа её модернизации. Она включала переход на S-диапазон (~3,5 ГГц), повышение чувствительности (обнаружение КО диаметром 5 см на высоте 1000 км), точность остаётся прежней, ёмкость каталога КО — до 100 000 КО.

В 2003 г. выполнение этой программы вместе с функциями ККП, персоналом и фондами было передано полностью от ВМФ к ВВС США [61]. Есть сведения, что такой каталог (объёмом около 100 000 КО) уже ведётся модернизированной СККП США, и в нём содержится информация и о более мелких КО, в частности, 5-сантиметровых. Он является более информативным, так как содержит дополнительные категории данных для обслуживания дополнительных функций.

В то же время ЦККП, базировавшийся в горе Шайен (*англ.* Cheyenne Mountain), в августе 2007 г. переведён в район авиабазы Ванденберг в Калифорнии и переименован в Объединённый центр космических операций (*англ.* Joint Space Operations Center — JSOC), каковым остаётся и до сих пор.

В июне 2009 г. ВВС США выделили 90 млн дол. на три контракта с компаниями Lockheed Martin Corporation (LMC), Raytheon Technologies Corporation и Northrop Grumman Corporation (NOC) по разработке концепции S-диапазонного радиолокационного «забора»

(«космического барьера» BBC США), который по замыслу должен был существенно улучшить возможности СККП США как в отношении глобальности покрытия низкоорбитальной и средневысотной областей ОКП, так и способности обнаруживать КО размером в несколько сантиметров. Эта система будет размещена в трёх географически разнесённых местах, в каждом из которых будет находиться приёмно-передающая пара РЛС. Начало функционирования первой пары пришлось на 2015 г. [8, 62–65]. Недавно Гари Уилсон (*англ.* Gary Wilson) заявил, что модернизированный «космический барьер» способен обнаруживать КО размером 2 см на высотах пилотируемых полётов и 5 см на высоте 1000 км [66, 67].

Определённый вклад в информационный поток СККП США вносил экспериментальный космический сенсор видимого диапазона (*англ.* Space Visible Sensor — SVS), выведенный в 1996 г. на борту ИСЗ MSX (*англ.* Midcourse Space Experiment), который завершил свою миссию в июне 2008 г. (рис. 1.2.4.) [8, 55,68].



Рис. 1.2.4. КА MSX (прототип SBSS)

Этот эксперимент плавно перерос в разрабатываемую СККП космического базирования (*англ.* Space Based Surveillance System — SBSS) с целью расширения возможностей обнаружения, слежения и идентификации элементов КМ на ГСО [7, 8].

Но это не главная цель SBSS. Поскольку её хозяин — Министерство обороны США, она официально позиционируется как «космическая система с оптическими сенсорами на борту её КА, предназначенная для слежения и идентификации КА военного назначения в глубоком космосе с целью обеспечения оборонительных и наступательных противокосмических операций» [8].

Запуск первого КА SBSS неоднократно переносился. Последний раз он намечался на 8 июля 2010 г., но также был перенесён на неопределённый срок из-за проблем с RH Minotaur IV. На эту программу выделено 824 млн дол. Соответствующую систему КА предполагается оснастить оптическими телескопами. SBSS будет способна контролировать каждый спутник на ГЕО по крайней мере 1 раз в 24 ч.

Вообще-то в США разрабатываются две СККП космического базирования. Об одной мы только что рассказали. Вторая — «микро-СККП», состоящая из наноспутников, носит название ANGELS (*англ.* Autonomous Nanosatellite Guardian for Evaluating Local Space, Автономная охранная система для мониторинга локального космоса). Несмотря на то, что система официально предназначена для охраны и диагностики неисправностей КА США, её КА смогут приближаться и к геостационарным КА других государств и проводить их инспекцию с помощью бортового телескопа. Они также будут оборудованы датчиками, определяющими, следит ли за ними радар. Эти системы помогут США существенно расширить объём каталога КО и повысить его точность [69]. Первый спутник этой системы был запущен в 2014 г.

Кроме того, постепенно реализуется Геостационарная программа осведомлённости о космической обстановке как часть оборонной СККП, в которой действуют пары КА, обеспечивающие слежение за действующими КА и их распознавание, осуществляя операции поиска и сближения с ними. Первая пара была запущена в 2014 г., вторая — в 2016 г. Запуск третьей планировался на 2020 г. [70].

Несмотря на принадлежность СККП США военному ведомству, все её несекретные данные доступны широким научным кругам, вовлечённым в исследование и решение проблем КМ, и, в первую очередь, НАСА, ЕКА и IADC. Внешние (из других ведомств) операторы КА и прочие заинтересованные в информации каталога организации, в том числе научные учреждения, могут использовать данные каталога КО СККП США на коммерческой основе по контрактам через программу «Коммерческие и зарубежные потребители». Пилотный проект получения такой информации через веб-сайт был запущен в 2004 г. Уже зарегистрировано более 25 000 пользователей этой программы [8, 71, 72].

В обеих СККП (российской и американской) РЛС используются для наблюдения за КО, расположенными преимущественно на низких высотах, а оптические и электронно-оптические — для контроля больших высот. Вместе с тем, СККП США располагает и радарными глубоким зондирования космоса для контроля ГЕО.

С помощью радиотехнических средств получают в основном некоординатную информацию и только по действующим, более того, излучающим ИСЗ и преимущественно по целеуказаниям. Режим контроля космоса можно назвать режимом «по заявкам в допустимые интервалы времени». Иными словами, мониторинг ОКП не ведётся системами непрерывно и не во всех своих областях. КО могут обнаруживаться, теряться и находиться снова. Каталоги КО обеих СККП содержат информацию об объектах размером более 10–20 см, хотя каталог КО США в последние годы заметно расширяется в сторону меньших размеров КО (>5 см) и становится всё более закрытым.

Потенциальные СККП других стран

В 1989 г. Франция предложила создать международную наземную СККП [8, 73], однако до сих пор заметного продвижения в этом направлении нет. Кроме Франции, многие страны работают над планами создания собственных СККП. BBC Франции 22 декабря 2005 г. ввели в эксплуатацию РЛС GRAVES (*фр.* Grande Réseau Adapté à la Veille Spatiale), которая должна стать основой будущей европейской СККП [74, 75] (рис. 1.2.5, 1.2.6).

В Германии в 2009 г. в Удеме (*нем.* Uedem) открылся Германский центр оценки космической обстановки с главной задачей координировать усилия по защите немецких ИСЗ от орбитальных столкновений [76]. В 2009 г. центр (с использованием данных американской СККП) зафиксировал для пяти своих спутников 800 сближений с элементами КМ, 32 из которых оказались менее, чем на 1 км. В одном случае потребовался манёвр уклонения от столкновения.



Рис. 1.2.5. Передающие антенны РЛС GRAVES

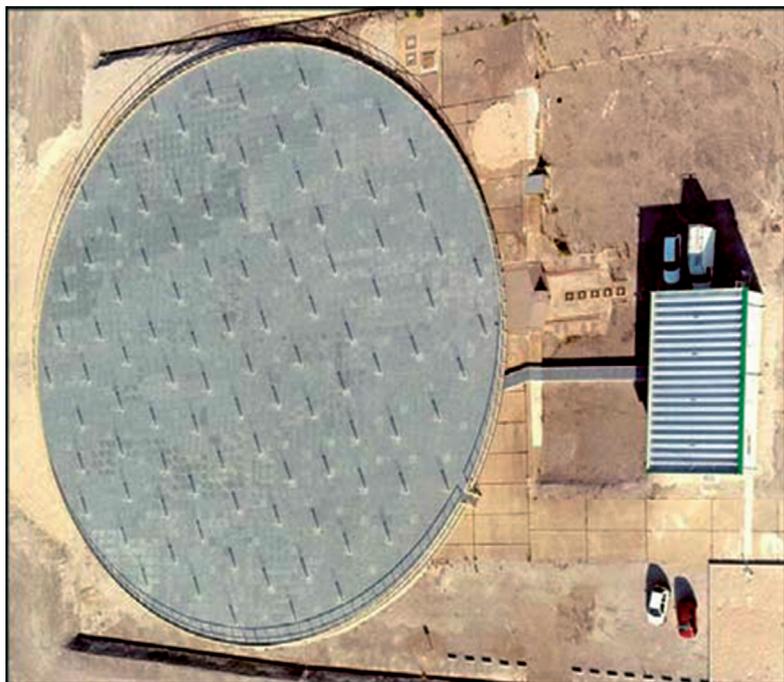


Рис. 1.2.6. Приёмная антенна РЛС GRAVES (вид сверху)

Собственную СККП разрабатывает и Великобритания [77].

ЕКА весной 2005 г. объявило о завершении работ по созданию первой очереди собственной СККП, информационной основой которой является РЛС французских ВВС GRAVES, и о планах ввода её в эксплуатацию к концу года [78]. Предполагалось, что к 2010 г. Европейская СККП будет контролировать 87 % каталога КО США, а к 2015 г. — 95 % [79]. Однако до сих пор система не заработала, хотя на её создание уже к 2020 г. израсходовано более 100 млн евро [80, 81].

Тем не менее, ЕКА определило ККП как один из трёх своих главных приоритетов [8, 82, 83]. Правда, этот европейский орган сейчас уже имеет другое название — Европейская программа осведомлённости о космической обстановке (ЕПОКО) — European Space Situational Awareness Programme (ESSAP), и построена система по несколько иному принципу (в подражание США). Собственно, потенциальная европейская СККП станет в своё время подсистемой ЕПОКО. (Для сравнения, в российской и прежней американской СККП оценка космической обстановки является лишь одной из их функций.) Главная цель ЕПОКО, кроме централизованного управления средствами наблюдения, получение и обновление сведений:

- о сопровождаемых КО;
- космической среде (мало- и среднеразмерных несопровождаемых КО, излучениях, космической погоде и т.п.);
- космических угрозах (возможных и реальных столкновениях, взрывах, входах в плотную атмосферу крупных КО; помехах работе действующих КА; электризации, старении и деградации поверхности КО; механических воздействиях со стороны КМ и т.д.).

Средства наблюдения, с которыми начнёт работать ЕПОКО, — это существующие европейские средства:

- бистатический обзорный радар GRAVES (Франция), рабочая частота в VHF-диапазоне — для обнаружения КО на низких орбитах;

- L-диапазонный радар TIRA (*англ.* Tracking and Imaging Radar) (Германия) — для слежения за КО на низких орбитах;
- оптические системы STARBROOK (Кипр), ZimSMART (*нем.* Zimmerwald Small Aperture Robotic Telescope) (Берн, *нем.* Bern), TAROT (*фр.* Telescopes a Action Rapide pour les Objets Transitoires) (Франция и Чили) — для обзоров ГЕО;
- оптические системы ESASDT (*англ.* ESA's Space Debris Telescope) (Тенерифе, *исп.* Tenerife), STARBROOK (Кипр), ZimSMART (Берн), TAROT (Франция и Чили) — для слежения за КО на ГЕО;
- обзорный бистатический радиотелескоп Northern Cross (излучатель на Сардинии, приёмник в Болонье (*итал.* Bologna));
- существующие источники информации и бортовые инструменты КА Proba-2 и Swarm — для измерения параметров термосферы и ионосферы;
- бортовые датчики на КА MetOp (*англ.* Meteorological Operational satellite), Jason-2, SAC-D (*исп.* Satelite de Aplicaciones Cientificas-D), Galileo IOV (*англ.* in-orbit validation) и ультрафиолетовые солнечные датчики на КА Proba-2 — для мониторинга излучений;
- наземные СН (как радары, так и телескопы, такие как LMT — *англ.* Large Millimeter Telescope), работающие в парковых режимах, и бортовые детекторы — для мониторинга несопровождаемых малоразмерных КО.

Все эти сотрудничающие и привлекаемые на начальном этапе СН впоследствии будут дополнены специализированными СН в следующем предполагаемом составе:

- бистатическая РЛС UHF-диапазона (рабочая частота 435 МГц) с полем обзора 180° по азимуту и 20° по углу места (от 20 до 40°), способная на дальности 1000 км наблюдать сферу диаметром 10 см, возможное место дислокации — Испания, задача — обзор области низких орбит [84];
- РЛС S-диапазона (рабочая частота 3,2±2 ГГц) с возможностью наблюдения 10-сантиметровые сферы на дальности 1500 км, поле зрения 0,6°, зона ответственности — от горизонта до горизонта, возможное место размещения — Куру, задача — слежение за НОКО по целеуказаниям;
- две оптические системы с апертурой 0,4 м, полем зрения 6×6°, с размещением на Тенерифе и на Маркизовых о-вах (*фр.* Îles Marquises), задача — обзоры области полусинхронных орбит;
- четыре оптические системы с апертурой 0,5 м по одной в Тенерифе, на Кипре, в Перте (*англ.* Perth, Австралия) и на Маркизовых островах, задача — слежение за КО в области полусинхронных орбит и ГЕО по целеуказаниям;
- космический телескоп на солнечно-синхронной платформе с апертурой 0,3 м, полем зрения 10×10°, задача — обзоры ГЕО и наблюдение по целеуказаниям;
- бортовые детекторы на солнечно-синхронной платформе для регистрации и измерения излучений и мониторинга несопровождаемого КМ;
- измерительные кампании в парковых режимах наземных специализированных СН с целью мониторинга некаталогизированного КМ;
- геостационарный релейный ИСЗ для мониторинга космической погоды.

Из новых разрабатываемых СН следует отметить создаваемую в Германии по программе ABISS (*фр.* Antenne Bistatique pour la Surveillance Spatiale) быстродействующую РЛС дециметрового диапазона GESTRA (*англ.* German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar), которая в 2020 г. должна была быть развёрнута в Удеме (Германия). Дальность её действия — 3000 км [85].

Размещение СН в основном в Европе ограничивает возможности будущей ЕПОКО. Поэтому в планах ЕКА до 2020 г. и более поздних предусмотрен вынос собственных и привлекаемых СН за пределы Европы. Таким образом, парк средств наблюдения ЕКА постепенно наращивается, а старые средства совершенствуются.

Уже в настоящее время, до ввода в строй ЕПОКО ЕКА обладает большими возможностями по наблюдению КМ (см. ниже).

После вступления в IADC в 1995 г. Китай стал проявлять настойчивый интерес к созданию собственной СККП. В 2005 г. Китайская академия наук основала исследовательский

центр для мониторинга космического пространства. Для поддержки китайских космических программ была создана система слежения, телеметрии и управления, которую можно считать прообразом СККП. Она включает шесть наземных РЛС на территории Китая, по одной в Намибии и Пакистане и четыре корабля, осуществляющих слежение за ИСЗ [86].

В конце 2007 г. официальные лица Китая объявили о начале работы над большим проектом ККП. В систему средств ККП будут включены две линии обсерваторий: одна вдоль меридиана 120° в.д., другая вдоль 30-й параллели. Готовность — в 2010 г. [87–89]. К 2010 г. Китай уже располагал 20 станциями наблюдения за спутниками, работа которых координируется из Центра управления запуском на космодроме Сичан (*англ.* Xichang Satellite Launch Centre — XSLC) [90].

В соответствии с очередной программой модернизации будут обновлены алгоритмы определения орбит и повышены возможности слежения за ИСЗ, представляющими потенциальные цели применения противоспутникового оружия (*англ.* anti-satellite weapon — ASAT) [8, 88].

Канада уже в течение нескольких лет разрабатывала оптическую систему космического базирования Sarrphire для наблюдения за КО на высоких орбитах (от 6000 до 40 000 км) и вывела её на орбиту в феврале 2013 г. Это первый канадский военный КА. Данные его наблюдений поступают в каталог СККП США. Канадское космическое агентство планировало в 2011 г. запуск низкоорбитального ИСЗ с функциями контроля космического пространства, бортовая аппаратура которого будет способна осуществлять мониторинг высот от 15 000 до 40 000 км [91–93]. Однако впоследствии некоторые космические программы Канады начали сворачиваться.

1.3. Возможности современных средств наблюдения космического мусора

Самый банальный, но и самый надёжный (относительно гарантированный) способ получения информации о КМ — непосредственное наблюдение его с помощью разнообразных средств. К сожалению, с помощью существующих средств наблюдения обнаруживается и каталогизируется лишь небольшая доля общей популяции КО, в том числе КМ.

Как уже говорилось в предыдущем разделе, средства наблюдения — обе используемые СККП, способны обнаруживать и контролировать в штатных режимах в основном КО размером более 10–20 см. Проводятся исследования в направлении снижения этого порога. Кстати, это позволяет использовать штатные средства контроля в нештатных (экспериментальных) режимах. Например, при проведении космического эксперимента ODERACS-1 в 1994 г. РЛС «Дон-2Н», работая в нештатном режиме, раньше американских средств контроля обнаружила сферу с наименьшим диаметром ~5 см на высоте ~352 км (при наклонной дальности до цели 500–800 км) [44, 94].

Радиолокационные средства наблюдения (наземного базирования)

РЛС, ввиду присущих им особенностей, предпочтительнее использовать для контроля низких орбит. Их *достоинства* по сравнению с оптическими средствами:

- возможность наблюдения КО вне зависимости от времени суток, погодных условий, естественной освещённости цели;
- высокая производительность и, в частности, высокая обнаружительная способность, определяемая рабочей частотой радара, излучаемой мощностью, параметрами антенны и т. п.;
- возможность одновременного контроля большого количества целей (до нескольких сотен);
- допускаются самые высокие скорости пересечения целью зоны действия радара;
- более простое, чем в оптических средствах, программно-алгоритмическое обслуживание процесса измерения параметров цели.

- весьма крупные габариты и сравнительно лёгкая обнаруживаемость;
- практически невозможны, во всяком случае, крайне не эффективны передислоцируемые варианты;
- высокая стоимость создания и обслуживания РЛС;
- чрезмерно большое потребление электроэнергии во время работы;
- экологическая небезопасность;
- возможная неоднозначность измерений, в частности, при определении размеров наблюдаемого КО;
- зависимость чувствительности от четвёртой степени расстояния до наблюдаемой цели.

Из действующих отечественных РЛС для наблюдения КМ, пожалуй, более всего подходит многофункциональная РЛС кругового обзора «Дон-2Н» (рис. 1.3.1) [39–41, 44]. Это единственная станция в мире из принимавших участие в космическом эксперименте ODERACS (см. ниже справку), которая, как уже упоминалось ранее, первой обнаружила самую маленькую стальную сферу (диаметром 2 дюйма) и передала измерения в Джонсоновский космический центр (*англ.* Lyndon B. Johnson Space Center) НАСА [44, 94, 96], что стало сюрпризом для сотрудников НАСА. После проведения этого эксперимента специалисты из НАСА порекомендовали привлечь станцию «Дон-2Н» к наблюдению КМ.



Рис. 1.3.1. РЛС Дон-2Н

«Дон-2Н» — это моноимпульсная радиолокационная станция сантиметрового диапазона с крупномодульными активными фазированными антенными решётками (АФАР), электронным управлением характеристиками и положением в пространстве передающей и приёмной диаграмм направленности, цифровой обработкой радиолокационных сигналов. В 1989 г. станция была принята на вооружение, а в 1996 г. — поставлена на боевое дежурство.

Радиолокационная станция «Дон-2Н» обеспечивает одновременный обзор всей верхней полусферы в зоне ответственности комплекса. Она отличается высокой помехозащищённостью, адаптивностью к условиям обстановки, высокой информативностью, модульностью построения и высокой степенью автоматизации. В настоящее время «Дон-2Н» может использоваться в системах ПРН и ККП, в том числе, для наблюдения КМ,

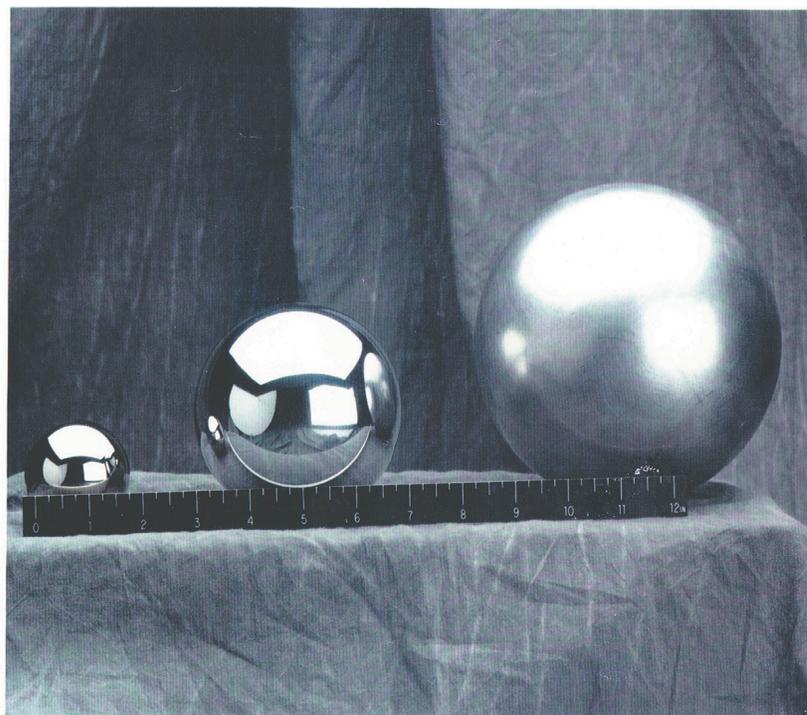
34 причём допускает дальнейшее программно-аппаратурное совершенствование с целью обнаружения более мелких КО и наблюдения за ними и на большей дальности, что было убедительно и красноречиво доказано при её участии в знаменитом российско-американском космическом эксперименте ODERACS.

После обнаружения целей станция их сопровождает, автоматически отстраивается от помех и селекционирует ложные цели. Станция такого типа развёрнута и на полигоне Сары-Шаган (Казахстан) в усечённом варианте.

В мирной обстановке РЛС «Дон-2Н» работает в режиме малой излучаемой мощности [40, 41, 44].

Справка

Космический эксперимент ODERACS (Orbital Debris Radar Calibration Spheres — калибровка радаров с помощью калибровочных сфер (рис. 1.3.2) и диполей с целью более точного измерения движения КО), целью которого были проверка обнаружительных возможностей и калибровка РЛС и некоторых оптических средств, проводился NASA в два этапа, соответственно, в 1994 и 1995 гг. (ODERACS-1 и ODERACS-2). С борта МКК Discovery (3-й шаттл) STS-60 (англ. Space Transportation System) (с пятью американскими астронавтами и советским космонавтом Сергеем Крикалёвым) сбрасывались металлические сферы трёх размеров (по две каждого размера) — 6, 4 и 2 дюйма в диаметре (соответственно, ~15, 10 и 5 см) и массой, соответственно, 5; 1,788 и 0,532 кг, а также диполи.



Lyndon B. Johnson Space Center
Houston, Texas 77058

S 9 2 - 2 7 4 7 4

NASA
National Aeronautics and
Space Administration

Рис. 1.3.2. Калибровочные сферы

В работе по сферам принимали участие и некоторые российские РЛС UHF-, S- и C-диапазонов. Они обнаружили и сопровождали 15- и 10-сантиметровые сферы с первого их прохождения через зоны действия станций, за исключением РЛС UHF-диапазона, которая устойчиво сопровождала 10-сантиметровые сферы только после снижения порога чувствительности и установки специального программ-

ного шумоподавляющего фильтра). Пятисантиметровые сферы обнаруживались и сопровождалась только РЛС S- и C-диапазонов. Особый интерес представляют результаты работы многофункциональной РЛС ПРО кругового обзора C-диапазона «Дон-2Н». Её частотный диапазон и потенциальные характеристики практически идеально соответствовали целям эксперимента — реально оценить возможности РЛС по обнаружению малоразмерных КО и измерению эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). В работе по 5-сантиметровым сферам использовалась нештатная (экспериментальная) программа обнаружения с некогерентным накоплением эхо-сигнала. При каждом прохождении сферы сопровождалась вплоть до самого выхода из зоны действия. По результатам работы обе стороны (американская и российская) пришли к следующему выводу: РЛС «Дон-2Н», работая в указанном режиме, надёжно обнаруживает КО размером до 5 см в секторе 100–200 град² на дальности 500–800 км и устойчиво сопровождает их до границы 900–1500 км. РЛС может быть рекомендована в качестве адекватного сенсора для исследования и мониторинга засорённости низких орбит ОКП малоразмерным техногенным КМ (до 5 см). Для слежения за более мелким КМ или увеличения предельной дальности гарантированного обнаружения может быть использовано более продолжительное некогерентное накопление большего числа эхо-сигналов — до 100 и более, тогда как в эксперименте ODERACS-1 накапливалось не более 10 эхо-сигналов. Для дальнейшего повышения эффективности обнаружения требуется разработка более совершенных поисковых режимов, теоретическая основа для которых изложена в работах [25, 26, 96–99]. В процессе проведения эксперимента ODERACS-1 Россия и США обменивались измерительной информацией, точность которой оказалась по результатам сравнения примерно одинаковой [94, 100].

Эксперимент ODERACS не был оригинален. Ещё в 1993 г. в СССР был проведён аналогичный эксперимент «Пион» по исследованию вариаций плотности верхней атмосферы, а два предварительных эксперимента были проведены в июне и августе 1989 г. [101, 102]. Дело в том, что определение и прогнозирование вариаций плотности атмосферы — самое слабое место в прогнозировании движения НОКО. Без их корректного учёта точность предсказания положения НОКО на сколько-нибудь длительный срок и даже не очень длительный резко падает. Поэтому баллистики цепляются за любую возможность уточнения параметров верхней атмосферы.

Итак, две пассивные калибровочные сферы «Пион-5» и «Пион-6» были выведены на низкую орбиту с помощью КА «Ресурс-Ф». Время их орбитального существования составляло 22 и 23 дня. В течение этого периода российская СККП проводила регулярные наблюдения сфер. На основании полученных измерений рассчитывались их точные координаты и значения баллистического коэффициента. Эксперимент помог определить более точно текущие вариации плотности атмосферы и, как следствие, существенно повысить точность прогнозирования движения НОКО во время эксперимента. Интервал прогнозирования составлял от 1 до 6 сут. Для расчётов плотности атмосферы использовалась её динамическая модель (ГОСТ-25645.115-84).

Апостериорный анализ всех данных эксперимента подтвердил целесообразность проведения оперативного определения вариаций плотности атмосферы и использования результатов для улучшения точности прогнозирования орбит. Полный набор оценок вариации плотности атмосферы, полученный в различных геогеографических условиях, имеет независимую научную ценность и может быть использован для построения более точной модели плотности атмосферы [46, 101–103].

Из радаров США, регулярно привлекаемых Комитетом IADC к кампаниям наблюдений КМ, наиболее эффективны следующие.

Аресибо (англ. National Astronomy and Ionosphere Center, NAIC). Радиоастрономическая обсерватория в Пуэрто-Рико, расположенная на широте 18° с.ш., является Национальным центром астрономии и ионосферы США (рис. 1.3.3). Крупнейший в мире радиотелескоп с 1963 г. (дата ввода) эксплуатируется Корнельским университетом ((англ. Cornell University) США. Для расположения рефлектора использовалась природная

воронка, образованная в результате вымывания горных пород. Диаметр рефлектора 305 м, глубина зеркала 51 м, поверхность сферическая, собирающая площадь 73 000 м². Рабочая поверхность рефлектора состоит из почти 40 000 перфорированных пластин, сделанных из алюминия. Рабочий диапазон радиочастот 50 МГц – 10 ГГц (длина волны от 3 см до 1 м). Фокусное расстояние 132,5 м. Рефлектор остаётся неподвижным, а наведение радиотелескопа в нужную точку небосвода осуществляется 26 моторами, перемещающими подвижный купол с облучателем антенны. Для проведения радиолокационных исследований в обсерватории используется передатчик мощностью 500 кВт. Радиотелескоп изначально предназначался и использовался для астрономических наблюдений в глубоком космосе, и с его помощью было сделано много выдающихся открытий. Однако он эффективно использовался и для наблюдения КМ. В кампаниях по наблюдению КМ использовалась рабочая длина волны радиоизлучения 10 см (частота 3 ГГц).



Рис. 1.3.3. Радиотелескоп обсерватории Аресибо до катастрофы (www.fototerra.ru_files)

К сожалению, случилась катастрофа, фактически уничтожившая радиотелескоп. Инспекция, изучившая состояние Аресибо после обрыва в августе и ноябре 2020 г. двух тросов, удерживающих оборудование телескопа над отражателем, признала невозможной дальнейшую эксплуатацию этого уникального инструмента [104, 105]. На его восстановление до рабочего состояния потребовалось бы порядка 1 млрд дол.

«Голдстоун» (*англ.* Goldstone Deep Space Communications Complex — GDSCC) — бистатический радиолокационный комплекс дальней космической связи НАСА в Южной Калифорнии (32,24° с. ш.). Это уникальный комплементарный инструмент к системе радаров «Хейстек» и НАХ, расположенной в Массачусетсе. Комплекс оснащён одним из крупнейших в мире радиотелескопов, работающим в бистатическом режиме с 35-метровой передающей и 70-метровой принимающей антеннами, разнесёнными на 497 м. Передающая антенна ориентирована в направлении 1,5° от зенита, а приёмная — 1,441° от зенита. Для наблюдения КМ используется радиочастотный диапазон с рабочей длиной волны 3,5 см (частота 10 ГГц). Средняя излучаемая мощность 460 кВт. Ширина луча по уровню 3 дБ составляет 0,021°.



Рис. 1.3.4. Бистатическая РЛС «Голдстоун». Передающая и приёмная антенны

К сожалению, система не может работать в моноимпульсном режиме, что позволило бы определять, как обнаруженная частица КМ проходит относительно биссектрисы луча. Это приводит к неопределённости в измерении ЭПР КО (измеренная ЭПР оказывается меньше истинной) и неточности определения таких орбитальных элементов, как наклонение и эксцентриситет. Тем не менее, система позволяет получать ценную информацию о размере, радиальной скорости и высоте КО. При обработке измерений от 1 до 5 % их бракуются как полученные с помощью боковых лепестков. В измерительной кампании 1998 г. за 146 ч работы система обнаружила 3070 КО, т.е. новый КО обнаруживался в среднем каждые 3 мин.

Предельный размер обнаруживаемых КО — 2 мм на дальности 1000 км. Измерения радара использовались также для калибровки моделей засорённости, в частности, модели ORDEM (*англ.* Orbital Debris Engineering Model). На рис. 1.3.4 показан комплекс «Голдстоун» с инфраструктурой, размещённый в пустыне Мохав (*исп.* Mojave) (верхний снимок), и передающая и приёмная антенны раздельно (два нижних снимка) [106–110]. Постоянно проводимые усовершенствования аппаратуры комплекса «Голдстоун» монотонно повышают чувствительность радиотелескопа.

Поскольку ресурсы радара «Голдстоун» и других используемых для мониторинга мелкого КМ радаров потребляются не только НАСА, а самих таких средств крайне недостаточно, покрытие ОКП их наблюдениями является неполным. С целью частичного заполнения этих пробелов в памяти операционных систем СН запоминаются не проконтролированные в предыдущих кампаниях области в терминах прямого восхождения восходящего узла и наклонения. Эти области прогнозируются на следующие периоды наблюдений [477].

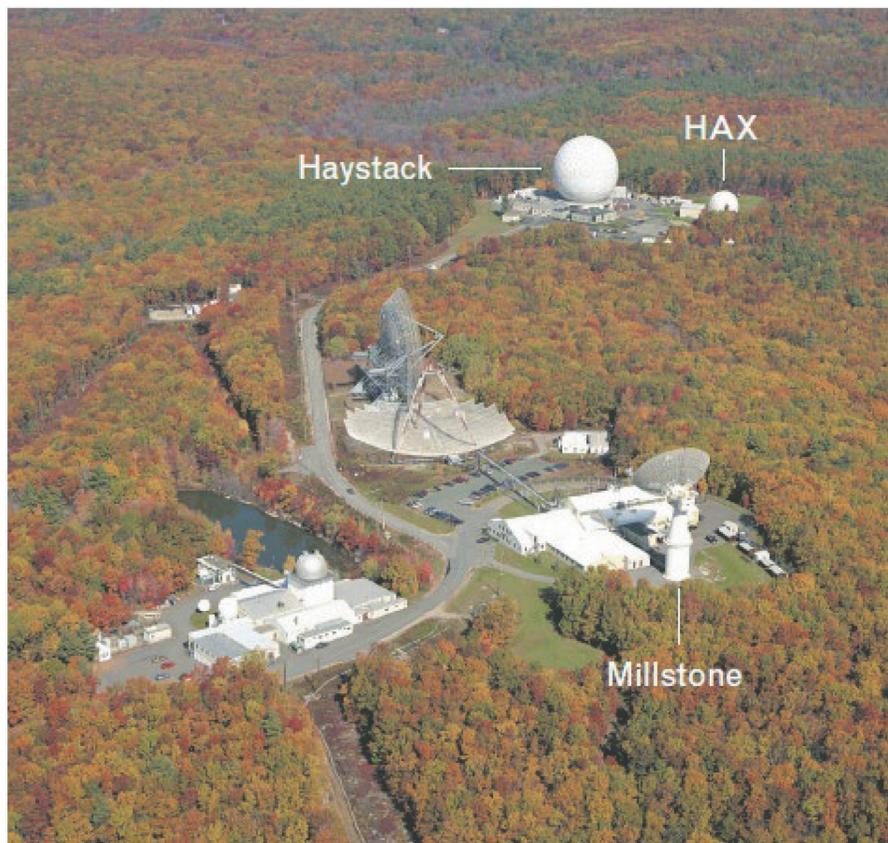


Рис. 1.3.5. Линкольновский комплекс ККП [27]



Рис. 1.3.6. Радары Haystack и NEX

В Вестфорде (*англ.* Westford, MA), штат Массачусетс, находится Линкольновский комплекс ККП, состоящий из трёх радиолокационных станций, управляемый Линкольновской лабораторией Массачусетского технологического института. Это «Миллстоун», «Хейстек» и NEX (рис. 1.3.5 и 1.3.6). Кроме этих трёх радаров, в Вестфорде есть ещё передвижной UHF-диапазона и большой стационарный ионосферный радар (тоже UHF-диапазона) с осью, направленной в зенит.

«**Миллстоун-Хилл**» (*англ.* Millstone Hill) (рис. 1.3.7). Это узкодиапазонная РЛС (радиотелескоп) с тарелочной антенной диаметром 46 м, имеет статус привлекаемой к СККП США (по 80 ч в неделю), вносящей значительный информационный вклад, и используется в основном для обнаружения и наблюдения ВОКО, хотя способна следить и за НОКО. Она выдаёт очень точную координатную информацию по ИСЗ, а также радиолокационные сигнатуры. Рабочий диапазон частот — L. Рабочая частота 1,295 ГГц (длина волны 23,3 см). Точность измерений азимута и угла места (1σ) 0,01°, дальности 5 м, скорости 0,005 м/с.

В 1963 г. впервые в истории радар обнаружил КА на ГЕО, используя некогерентное накопление 40 000 импульсов в течение 45 мин. В дальнейшем Линкольновская лаборатория усовершенствовала его конструкцию, позволяющую теперь путём когерентного накопления более 1000 импульсов регулярно обнаруживать КО площадью 1 м² на геосинхронных орбитах.

«**Хейстек**» — пожалуй, самая именитая РЛС в части мониторинга мелкого и среднеразмерного КМ. Точное название — радиолокатор построения изображений дальнего действия (*англ.* Long Range Imaging Radar — LRIR, «Хейстек»). Дислоцирован в Тингсборо (*англ.* Tyngsboro, MA), штат Массачусетс. Его оператором является Линкольновская

40 лаборатория Массачусетского Технологического института, которая выполняет работы в интересах минобороны США. На рис. 1.3.6 (см. с.) показан весь Линкольновский измерительный комплекс, включающий радары «Хейстек», НАХ, «Миллстоун» и ионосферный [27].



Рис. 1.3.7. Радар «Миллстоун»

Радар «Хейстек» большой мощности, диаметр тарелочной антенны 36 м, рабочая частота в X-диапазоне — несущая 10 ГГц (длина волны 3 см), моноимпульсный режим, ширина импульса 1,023 мс, пиковая мощность 400 кВт, частота повторения импульсов 40 Гц, при частоте зондирования 1 МГц при определении радиальной скорости по Доплеру разрешающая способность 7,5 км/с, при передаче — правая круговая поляризация,

при приёме — правая и левая круговая. Ширина луча $0,05^\circ$. Может обнаруживать КО диаметром 1 см на расстоянии 1000 км. Более поздними исследованиями и экспериментами Линкольновской лаборатории была показана возможность повышения чувствительности радара с целью обнаружения частиц размером 0,5 см на расстоянии 1000 км и 0,25 см на высоте полёта шаттла [111, 112].

Из-за очень малого объёма зондируемого пространства для получения сколько-нибудь представительного распределения КМ, даже в ограниченной области орбит, приходится собирать данные измерений в течение многих часов наблюдения. В интересах наблюдений КМ «Хейстек» работает в «парковом» режиме, т.е. луч фиксируется в определённом направлении. Чаще всего вертикально (угол места 90°), но используются и другие углы места — 75° , 20° , 10° . В кампании наблюдения фрагментов разрушения китайского спутника «Фенгюн-1С» (букв. ветер и облако, *англ.* FengYun) использовались фиксированные углы места от 22 до 50° [112, 113, 239, 483].

Возможности «Хейстека» демонстрирует рис. 1.3.8, на котором представлены данные наблюдений при прохождении через парковый луч облака осколков ИСЗ «Космос-2251» [114]. Это результаты работы «Хейстека» в 82-й день 2009 г. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — доплеровская радиальная скорость обнаруженных осколков. Серые полосы слева и справа — периоды, когда «Хейстек» не проводил измерений. Зелёные точки представляют КО, по мнению экспертов не относящихся к облаку осколков от столкновения ИСЗ «Космос-2251» с КА «Иридиум-33» (*англ.* Iridium). Чёрные точки — это измерения КО, входящих в облако осколков. Красные точки изображают моделированное облако осколков после столкновения.



Рис. 1.3.8. Измерения «Хейстека» и моделированное облако осколков. Иллюстрация последствий столкновения КА «Иридиум-33» и «Космос-2251»

К 2021 г. радар «Хейстек» был существенно модернизирован и даже переименован в HUSIR (*англ.* Haystack Ultra-wideband Satellite Imaging Radar, хейстековский сверхширокодиапазонный радар построения радиоизображений ИСЗ). Главный результат модернизации — существенное повышение разрешающей способности радара, позволяющее ему осуществлять построение изображений КО на геостационарной орбите. Подробные результаты испытаний модернизированного радара в период с 2014 по 2017 г. представлены, например, в работе [13].

Важнейшим техническим достижением в модернизации радара стала возможность его работы в W-диапазоне (92–100 ГГц). Основная рабочая частота — 94 ГГц. Для этого пришлось сделать новую антенну. При этом прежний режим «Хейстека» (в прежнем

42 частотном X-диапазоне) был сохранён. Возможна работа одновременно на двух частотах — 10 и 94 ГГц. Точность слежения за обнаруженным КО в диапазоне W составляет 0,0005°. Разрешающая способность радара в новом диапазоне при выстраивании изображения ИСЗ на ГЕО составляет 3 см.

Возможности радара HUSIR по наблюдению КО различных размеров наглядно характеризуются рис. 1.3.9.

НАХ. Ввиду того, что радар «Хейстек» предназначен для совсем других целей (работает в интересах Минобороны) и его отвлечение на мониторинг засорённости ОКП расходует его ресурс не по профилю и к тому же это довольно дорогое удовольствие, в начале 1990-х гг. был построен радиолокатор НАХ специально для решения задач изучения КМ. Территориально он расположен рядом с «Хейстеком». Его эксплуатация началась в 1994 г., хотя он был вполне работоспособен уже в 1993 г. В 1994 г. он отработал 371 ч с антенной, направленной в зенит. Оба радара («Хейстек» и НАХ) показаны на рис. 1.3.6 (см. с. 39).

НАХ очень хорошо дополняет «Хейстек», но имеет несколько системных отличий от прототипа. Излучает меньшую мощность и, следовательно, менее чувствителен, чем «Хейстек». Работает на более высокой частоте, имеет более широкий луч (почти в два раза), может обнаруживать среднеразмерные НОКО. При этом он более производительен и дешевле в эксплуатации. «Хейстек» из-за больших размеров антенны (и её инерции) не может после обнаружения цели переключаться на режим слежения, тогда как НАХ лишён этого недостатка. У «Хейстека» есть ещё одно слабое место. Из-за очень узкой диаграммы направленности при наблюдении крупных КО отражённый сигнал может приниматься по боковому лепестку, что вносит искажения (погрешности) при измерении координат цели. НАХ, имея диаграмму направленности почти вдвое шире, легче справляется с такими ситуациями.

Радар НАХ даёт дополнительные данные (к измерениям «Хейстека») для юстировки модели НАСА оценки размеров КО [115]. Но главное достоинство НАХа по сравнению с «Хейстеком» — его полная доступность для измерений КМ. «Хейстек», например, большую часть зимы работает на Северо-восточную радиообсерваторию (*англ.* Northeast Radio Observatory Corporation — NEROC) в качестве радиотелескопа, т.е. с удалённым передатчиком.

Основные характеристики НАХ: пиковая мощность 50 кВт, рабочая частота 16,7 ГГц, ширина импульса 2,009 мс, частота повторения импульсов 94,46 Гц, диаметр антенны 12,2 м, количество некогерентных импульсов накопления для обнаружении цели — 12 [116–118].

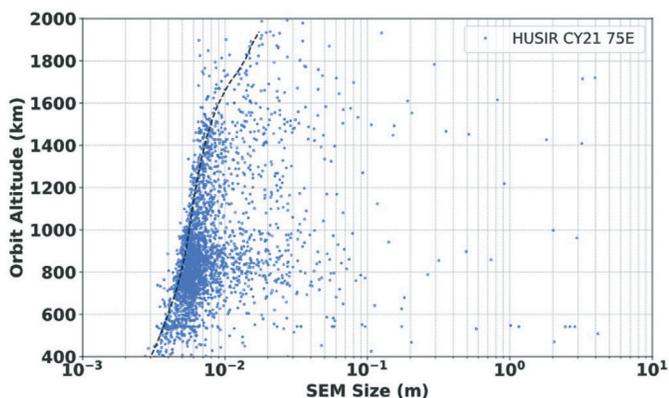


Рис. 1.3.9. Наблюдения радаром HUSIR элементов КМ различных размеров на различных высотах в кампании 2021 г. [476]. Чёрной штриховой линией обозначены теоретические предельные возможности, т.е. чувствительность радара HUSIR

«Кобра Дейн» (англ. Cobra Dane) — национальное радиолокационное средство разведки США, размещённое на острове Шемайя, Аляска, на базе ВВС (рис. 1.3.10). Оно создавалось для сбора разведданных об испытательных пусках советских баллистических ракет в сторону п-ова Камчатка и Тихого океана. В 1977 г. радар «Кобра Дейн» (радиолокатор AN/FPS-108), успешно прошёл испытания и был передан командованию противовоздушной обороны. Антенна — фазированная решётка с пассивным электронным сканированием диаметром 29 м, рабочая частота 1215–1400 МГц (L-диапазон, длина волны 23 см). Пиковая мощность 15,4 МВт, которая излучается 15 360 активными элементами решётки. Главная задача — обнаружение и слежение за межконтинентальными баллистическими ракетами, в том числе запускаемыми с подводных лодок. Выходная информация — координатная и сигнатурная. Предельный размер обнаруживаемого КО ~5 см, так что радар с успехом может использоваться и неоднократно использовался для наблюдения КМ.

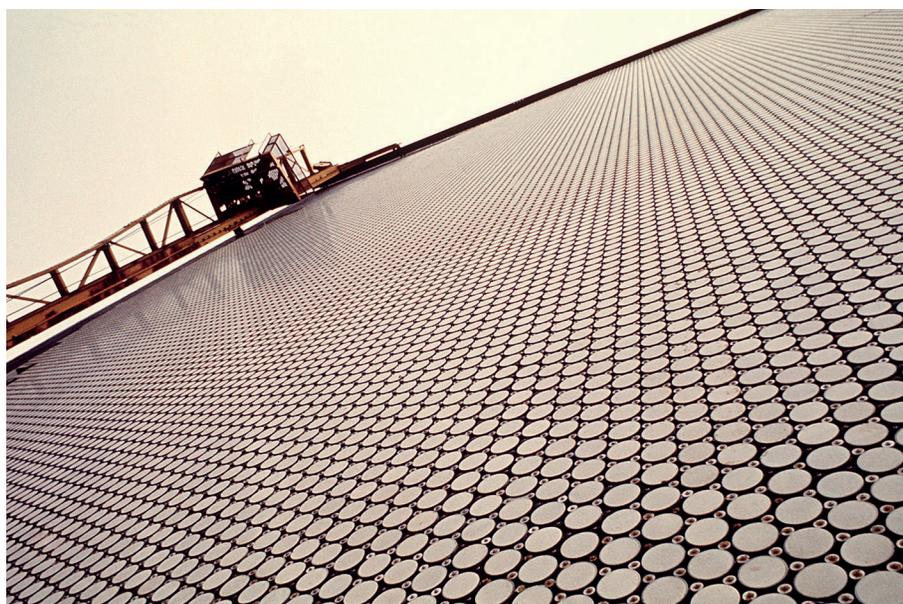


Рис. 1.3.10. РЛС «Кобра Дейн» и её антенное полотно

44 В 1994 г. радиолокатор был выведен из штата ввиду бюджетных ограничений, но в марте 2003 г. снова введён в состав СККП, причём этот факт был ознаменован существенным увеличением объёма каталога КО СККП США (более чем на 2000 НОКО) [120, 121, 53, 122].

Кроме американских радаров, в кампаниях IADC использовались и европейские.

TIRA (Вахтберг, нем. Wachtberg, Германия). Оператор — FGAN (англ. Research Establishment for Applied Science). Режим работы радара — моностатический. Его антенна — 34-метровый параболический рефлектор в 49-метровом куполе (рис. 1.3.11). В режиме обнаружения и слежения РЛС работает в L-диапазоне (рабочая частота — 1,333 ГГц) с пиковой мощностью 1 МВт при ширине луча $0,45^\circ$ по уровню 3 дБ. Длительность импульса составляет 1 мс, частота повторения импульсов — 30 Гц. Этот режим позволяет обнаруживать КО размером 2 см на дальности 1000 км. В функции построения изображения радар работает в Ku-диапазоне (рабочая частота — 16,7 ГГц) с пиковой мощностью 13 кВт при ширине луча $0,031^\circ$ по уровню 3 дБ, частота повторения импульсов — 55 Гц, разрешение по дальности — 15 см. В рамках мониторинга ОКП РЛС использовалась для контроля входа в плотные слои атмосферы крупных КО, таких как Skylab, «Салют-7», «Мир», наблюдения процессов сближения в космосе и в режиме построения изображений — для контроля целостности КК («Салют-7», «Мир») [123, 124].



Рис. 1.3.11. РЛС TIRA

Система **TIRA/Effelsberg** (Германия). Бистатический режим работы. 34-метровая передающая антенна (TIRA, Вахтберг) и 100-метровая принимающая антенна, работающая в парковом режиме (радиоастрономическая обсерватория в Эффельсберге, нем. Effelsberg) (рис. 1.3.12). Антенны расположены на расстоянии 21 км одна от другой. Частотный диапазон — L. Минимальный размер наблюдаемого КО ~ 9 мм (для сравнения: в моностатическом режиме — 2 см). Радиолокатор начиная с 1993 года уже провёл для ЕКА 14 кампаний по наблюдению КО в парковом режиме. В них изучались КО размером 1–10 см в диапазоне высот от 250 до 2000 км. Кампания 2006–2008 гг. была посвящена бистатической конфигурации совместно с радиотелескопом Effelsberg в Эффельсберге, который после модернизации был оборудован семилучевым приёмником L-диапазона. Кроме улучшенной чувствительности, позволяющей теперь обнаруживать КО размером менее 1 см, новый многолучевой приёмник существенно повысил точность измерения ЭПР цели и параметров её траектории [106, 125].

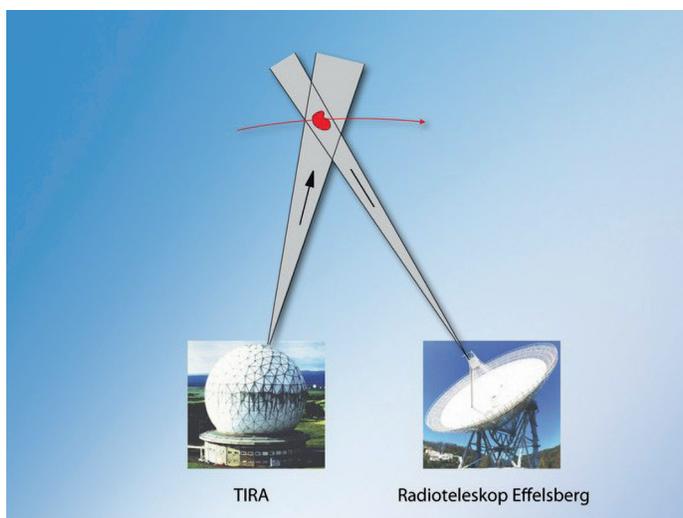
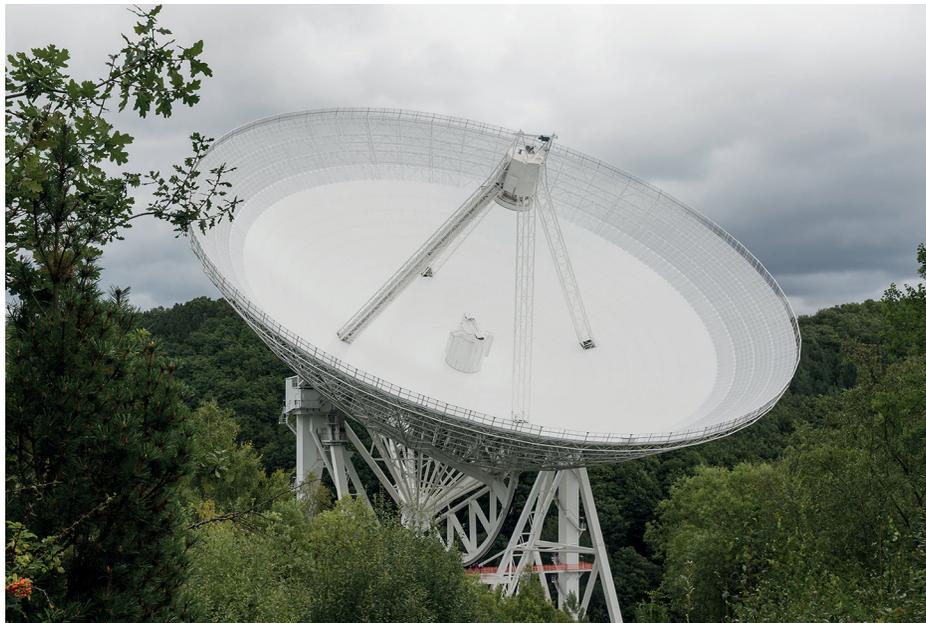


Рис. 1.3.12. 100-метровый радиотелескоп в Эффельсберге, Германия



Рис. 1.3.13. Система РЛС EISCAT

Система европейских РЛС некогерентного рассеивания **EISCAT** (*англ.* European Incoherent Scatter Radar Site) (рис. 1.3.13) (Финляндия/Норвегия/Швеция) включает в себя три ионосферных радара в северной Скандинавии. Моностатический радар VHF-диапазона (рабочая частота 224 МГц) дислоцирован в Тромсё (*норв.* Tromsø) (Норвегия). Моностатический, но с двумя антеннами радар ESR (*англ.* Electronically Scanning) с рабочей частотой 500 МГц размещён в Свальбарде (*норв.* Svalbard). Трискатический радар UHF-диапазона (рабочая частота 928 МГц, ширина полосы 7 МГц, пиковая мощность 2 МВт, диаметр антенны 32 м) с передающей и приёмной антеннами в Тромсё, а также приёмными антеннами в Кируне (*швед.* Kiruna) (Швеция) и в Соданкюля (*фин.* Sodankylä) (Финляндия).

По контракту с ЕКА радары системы EISCAT были сконструированы таким образом, чтобы кроме непосредственных ионосферных наблюдений они были способны также проводить наблюдения КМ. Чувствительность радара ESR с его 42-метровой антенной позволяет ему обнаруживать КО диаметром 3,5 см на высоте 1000 км в центре луча. Такая возможность наблюдать КМ в добавление к основной функции контроля ионосферы значительно удешевляет (в хорошем смысле) сами измерения. Система функционирует вполне успешно. Например, в наблюдательной кампании 2007–2008 гг. за 7700-часовой период и передатчик, и приёмник были в хорошем рабочем состоянии в общей сложности 5000 ч. В течение этого времени было зарегистрировано 197 000 случаев пересечения КО луча радара. Высотное покрытие было реализовано в четырёх зонах с центрами на высотах 320, 880, 1430 и 1990 км. Ширина зон сначала составляла 190 км, а затем была расширена до 340 км.

Стоит напомнить, что в наблюдательной кампании 2002 г. в течение 4,5 ч наблюдений было обнаружено 56 КО размером от 1,9 до 52 см на высотах от 490 до 1480 км. IADC регулярно привлекает ионосферные радары EISCAT к наблюдениям КМ различных классов [106, 126].

РЛС **Fylingdales** (Файлингдэйлз, Северный Йоркшир, Великобритания) с фазированной решёткой. Оператор — Министерство обороны Великобритании (BBC) совместно со Стратегическим командованием США. Антенна — три плоскости ФАР с нормальями, разделёнными на 120° друг относительно друга и наклоном 20°. Диаметр активного поля 22 м. Покрытие по азимуту 360°, по углу места от 3 до 85°. Частотный диапазон — UHF. Назначение РЛС — контроль космического пространства (с выдачей данных в СККП

США) и обнаружение запусков баллистических ракет (это один из трёх радаров СПРН). Кроме этого, для слежения за обнаруженными КО и в работе по целеуказанию в комплект РЛС входят три тарелочные антенны диаметром 25,6 м.

В Уинчестере (*англ.* Winchester) работает РЛС **CAMRa** (*англ.* Chilbolton Advanced Meteorological Radar) с 25-метровой антенной, рабочей частотой в S-диапазоне (3 ГГц), шириной луча 0,28°. Пороговый размер обнаруживаемого КО ~10 см на высоте 600 км [123].

В Вардё (*норв.* Vardø, Норвегия) по наблюдению КО периодически работает РЛС слежения **GLOBUS II** (после модернизации GLOBUS III). Оператор — норвежская Служба разведки по двустороннему соглашению совместно со Стратегическим командованием США. Это 27-метровая антенна в 35-метровом куполе, частотный X-диапазон (9,5-10,5 ГГц), ширина луча 0,08° по уровню 3 дБ [123]. Пиковая мощность 200 кВт. Используется для слежения за КО в глубоком космосе, включая и ГЕО, и широкодиапазонного построения радиоизображений КО. В настоящее время РЛС модернизируется с последующим сроком эксплуатации до 2030 г.

Наконец, последнее детище Министерства обороны Франции (оператор — ВВС Франции), позиционируемое как основа создаваемой европейской СККП, — мощный бистатический радар **GRAVES**. Его задача заключается в контроле космического пространства нижних высот, обнаружении КО размером не менее 1 м, автономном ведении каталога КО. Две передающие фазированные решётки размером 15×6 м, работающие в частотном диапазоне VHF (143,049 МГц), дислоцированы на базе ВВС в Дижоне (*англ.* Dijon) (обращены на юго-запад и юго-восток, соответственно). Приёмная решётка (горизонтальная) размером 60×60 м находится в 380 км к югу от передатчика в Апте (*фр.* Apt), провинция Прованс (*фр.* Provence). Радар контролирует над Францией высоты от 400 до 1000 км.

РЛС может одновременно контролировать большое количество целей. Измеряет азимут, угол места, дальность, радиальную скорость (по Доплеру) — по сути, определяет полный набор параметров орбиты. Чувствительность станции: способна обнаруживать КО размером 1 м на высоте до 1000 км. Более 80 % каталогизированных КО проходят через зону действия РЛС. В каталоге около 3000 КО [123, 127]. К 2008 г. GRAVES обнаружила около 30 КО, отсутствовавших в каталоге СККП США. Но это вовсе не говорит о превосходстве её чувствительности над таковой радаров США: просто это могли быть военные КА США, информация о которых не публикуется, в том числе и в каталогах КО, открываемых НАСА своим союзникам. Руководство Франции заявляет, что РЛС собирает достаточно информации для определения параметров орбит, размеров и частоты излучения не каталогизированных КА. РЛС GRAVES совместно с аналогичными системами Германии и Великобритании может внести значительный вклад в информационный поток европейской СККП [128, 75]. В настоящее время мощность сигнала РЛС настолько высока, что многие радиолюбители с помощью дешёвых радиоприёмников пользуются отражённым сигналом для наблюдения за КА системы Starlink и даже принимают сигнал, отражённый от Луны [129].

В Японии в префектуре Окаяма с 2004 г. функционирует специализированная РЛС для наблюдения КО для информационной поддержки пилотируемых полётов КК. Правда, его предельная дальность наблюдения КО всего 600 км, и радар способен следить за 10 КО одновременно [130].

Китай, Франция, Великобритания располагают также радиолокационными (и оптическими) СН морского базирования.

Франция, например, использует корабль слежения и управления **Monge** (рис. 1.3.14), оборудованный радаром слежения за баллистическими ракетами, прежде всего, с целью обеспечения национальных ракетных испытательных программ. На борту корабля размещены два радара **ARMOR** с тарелочными рефлекторами диаметром 10 м, работающими в частотном С-диапазоне (5,5 ГГц). Их пиковая мощность 1 МВт, ширина луча 0,4° по уровню 3 дБ, максимальная дальность 4000 км, три канала обработки могут сопровождать одновременно три цели в пределах одного луча. Кроме того, на борту имеются три аналитических радара, один телескоп с ПЗС-приёмником, один лидар и несколько

телеметрических антенн. В функции мониторинга КМ система может следить за КО, входящими в атмосферу, а также за сближающимися объектами. Франция располагает, кроме этого, девятью сканирующими РЛС в Беарне (*фр.* Béarn), имеющими 4-метровые антенны, с пиковой мощностью 1 МВт, шириной луча $0,96^\circ$ по уровню 3 дБ, а также моноимпульсными системами С-диапазона в Провансе (пиковая мощность 1 МВт, ширина луча $0,96^\circ$) и Гаскони (*фр.* Gascogne) (пиковая мощность 0,5 МВт, ширина луча $0,9^\circ$). Антенны обеих последних РЛС также 4-метровые [123, 131].



Рис. 1.3.14. Французский корабль Monge

Оптические средства наблюдения (наземного базирования)

Оптические средства наблюдения естественнее использовать для обнаружения и наблюдения за высокоорбитальными КО [132]. В отличие от радиолокаторов, телескопы обладают следующими *достоинствами*:

- по габаритам они существенно меньше радаров;
- в принципе, допускают передислоцируемые варианты;
- не требуют слишком больших мощностей электропитания;
- для наблюдения цели достаточно её освещения солнцем (редко используется специальная подсветка);
- чувствительность оптических средств обратно пропорциональна квадрату расстояния до цели (у РЛС она обратно пропорциональна четвёртой степени расстояния);
- дальность обнаружения и наблюдения значительно больше, чем у РЛС.

Однако они не лишены *недостатков*. Это прежде всего:

- возможность наблюдения зависит от времени суток, погодных условий, фазы Луны, степени освещённости цели, фазы её освещённости;
- обнаружительные способности и точность измерений сильно зависят от скорости пересечения целью поля зрения средства;
- одно средство может одновременно контролировать крайне ограниченное число целей;
- операция перенацеливания телескопа на другой КО требует заметно большего времени, чем радара с фазированной решёткой;
- программно-алгоритмическое обслуживание процесса наблюдения, обнаружения полезного сигнала и его измерения значительно сложнее, чем в радиолокационной системе;
- производительность оптических средств значительно ниже, чем радиолокационных.

Цейсовский телескоп ЕКА для наблюдения КМ SDT (Тенерифе, Испания). В телескопе использована система Кассегрейна с оптикой Ричи — Кретьена (с фокусным расстоянием $f = 4:47$ специально для наблюдения КМ) и Коде. Апертура 1 м, поле зрения $0,7^\circ$. ПЗС-камера с охлаждаемой жидким азотом решёткой 4×4 ПЗС-чипов по 2048×2048 пикселей каждый. Пороговое отношение полезный сигнал/шум $\sim 5,0$, время накопления энергии сигнала ~ 2 с, время считывания ~ 19 с. Допускается до трёх считываний изображения в минуту. Проницающая способность $19\text{--}21^m$, что позволяет наблюдать на ГЕО КО размером 15 см с альбедо 0,1. Система контролирует 120° ГЕО. Телескоп регулярно привлекается к кампаниям IADC по наблюдению КМ. Например, в кампании 1999 г. за 49 ч работы было обнаружено 206 КО в окрестности ГСО, из которых только 27 % было идентифицировано с КО каталога СККП США [123–134] (рис. 1.3.15). Программное обеспечение телескопа постоянно совершенствуется.



Рис. 1.3.15. Главный цейсовский телескоп ЕКА

Телескоп AIUB (*англ.* Astronomical Institute of the University of Bern) (Циммервальд, *нем.* Zimmerwald, Швейцария) — кассегрейновский инструмент с оптикой Ричи–Кретьена принадлежит Астрономическому институту Бернского университета (рис. 1.3.16). Апертура телескопа — 1 м, поле зрения — $0,5^\circ$. Оснащён складным куполом. ПЗС-матрица имеет 2048×2048 пикселей. Предельная наблюдаемая звёздная величина 20^m . Контролирует 100° ГЕО. Использовался как испытательный стенд для отладки алгоритмов и программ телескопа ЕКА. Главная специализация — астрометрия и лазерное измерение дальности (применения в спутниковой геодезии). Во время двух кампаний в 2000 г. телескопом AIUB обнаружено 75 неидентифицированных КО на ГЕО [135].

Телескоп ROSACE (Космическое агентство Франции, *фр.* Centre National d'Études Spatiales, CNES) — ньютоновской конструкции, предназначен для наблюдения медленно движущихся объектов в окрестности ГЕО (рис. 1.3.17). Апертура телескопа 50 см, поле зрения $0,3 \times 0,4^\circ$, ПЗС-матрица содержит 1024×1556 пикселей, чувствительность оценивается в 19^m (что равносильно возможности наблюдать КО размером 20 см на ГЕО). Орбита объектов определяется по измерениям азимута и угла места с точностью 1 угл. с (3 σ). Основная задача — мониторинг геостационарной орбиты. Может работать по целеуказаниям от телескопа TAROT.

Телескоп TAROT (Франция) имеет апертуру 25 см, поле зрения $2 \times 2^\circ$. Оборудован ПЗС-камерой с чипом 2048×2048 пикселей. Время считывания 2 с. Проницающая способность 17^m , время накопления 10 с, обнаруживает КО размером 50 см на ГЕО. Французское космическое агентство предусматривает и использование этого средства в режиме первичного обнаружения целей на ГЕО с последующей передачей целеуказаний телескопу ROSACE для более точного измерения координат.

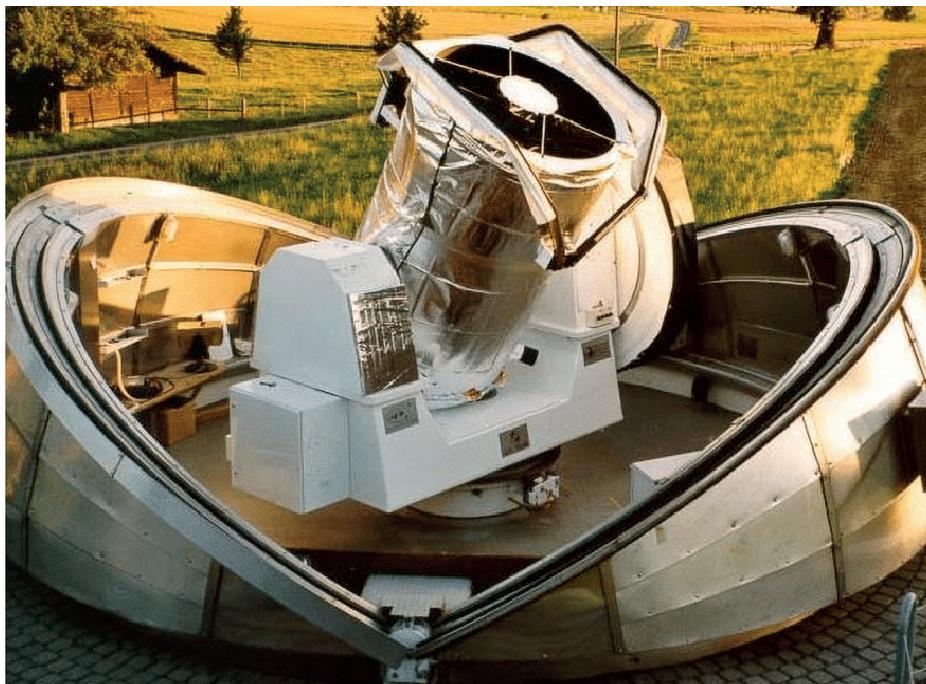


Рис. 1.3.16. 1-метровый телескоп AIUB в Циммервальде

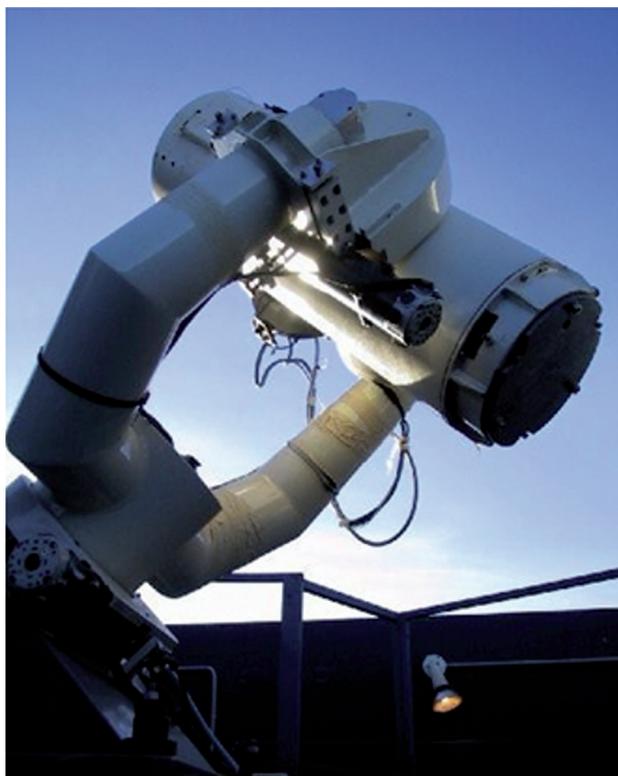


Рис. 1.3.17. Телескоп ROSACE



Рис. 1.3.18. Французский оптический инструмент SPOC

Система SPOC (Тулон и Одейло, Франция) — широкоугольная оптическая система Министерства обороны Франции. Каждая из двух её станций оборудована четырьмя ПЗС-камерами, обращёнными на запад, север, восток и в зенит. ПЗС-матрицы камер имеют 576×384 пикселей. Поле зрения каждой системы $50 \times 50^\circ$, чувствительность 7^m . Система позволяет обнаруживать до 400 НОКО за ночь, из которых 80–90 % обычно идентифицируются с каталогом СККП США. SPOC используется также для получения фотометрических сигнатур с целью определения скорости собственного вращения КО относительно центра масс (рис. 1.3.18).

Телескопы PIMS (*англ.* Passive Imaging Metric Sensor) предназначены для мониторинга ГЕО и области высоких орбит. Оператор — Министерство обороны Великобритании. В конструкции телескопа использована система Кассегрейна с апертурой 40 см и полем зрения 40×40 угл. мин. ПЗС-камера имеет 1024×1024 пикселей, время считывания не превышает 5 с. Телескоп может обнаруживать КО размером 1 м на ГЕО и определять его положение с точностью лучше, чем 10 мкрад. Для покрытия дуги 165° на ГЕО (от 65° з.д. до 100° в.д.) используются три сенсора, соответственно, в Великобритании, в Гибралтаре и на Кипре.

Телескоп SAT (Италия). Его апертура 40 см, ПЗС-камера $1k \times 1k$, проникающая способность 17^m , время накопления энергии сигнала 20 с. Обнаруживает КО размером 50 см на ГЕО.

В распоряжении НАСА имелся телескоп **LMT** с трёхметровым жидким (ртутным) зеркалом, используемый специально для наблюдения КО (рис. 1.3.19).

Путём вращения основания телескопа со скоростью 10 оборотов в минуту ртутная поверхность приобретает параболическую форму. Отсюда следует, что его ось во время работы всегда направлена вертикально, т.е. в зенит. В зависимости от применяемого усилителя изображения поле зрения телескопа может быть $0,444$ и $0,27^\circ$. Проникающая способность — до 19^m . Исходным детектором служила ПЗС-матрица размером 2048×2048 15-микронных пикселей, которая позднее была заменена на более совершенную с большим разрешением. Телескоп был создан специально для наблюдения в оптическом диапазоне КО размером от 1 до 10 см.

Телескоп был готов в 1994 г. и установлен временно в Хьюстоне. Там были проведены и первые сеансы наблюдений. В апреле 1995 г. телескоп передислоцировали в обсерваторию НАСА наблюдения КО, расположенную на высоте 2745 км в Клаудкрофте (*англ.* Cloudcroft), Нью-Мексико. В 1996 г. он уже функционировал в полном штатном режиме [136]. Второй такой телескоп планировалось установить вблизи экватора, где он мог бы контролировать КО с любыми наклонами орбит. Кроме того, наблюдение КО на ГЕО

52 с экватора (как уже упоминалось, телескоп всегда направлен в зенит) обеспечивает высокое качество измерений ввиду того, что КО на ГЕО движутся медленно через поле зрения телескопа [137].

Возможности этих сравнительно дешёвых в производстве инструментов с жидким ртутным зеркалом (создание LMT обходится в 10 раз дешевле обычного телескопа такого же диаметра) и, вместе с тем, достаточно эффективных позволяют обнаруживать КО диаметром 2 см на высотах до 500 км, т.е. и в низкоорбитальной области [138–141].

О качестве изображений, которые можно получить с помощью LMT, можно судить по рис. 1.3.20 [142].



Рис. 1.3.19. Трёхметровый телескоп НАСА с жидким зеркалом

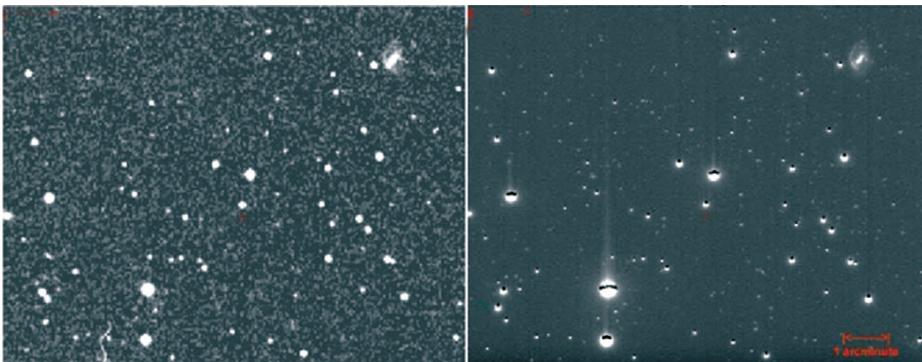


Рис. 1.3.20. Изображения одного и того же участка неба, полученные в Паломарской обсерватории (слева) и с помощью LMT (справа)

Для большей объективности результатов наблюдений Джонсоновский космический центр НАСА совмещает радиолокационные и оптические наблюдения. В этих кампаниях в качестве радаров используются «Хейстек» и НАХ, а в качестве оптических средств — LMT и специальный телескоп с ПЗС-камерой для наблюдений КМ **CDT** (*англ.* Charged Coupled Device Debris Telescope) [143]. Последний представляет собой передислоцируемый телескоп Шмидта с апертурой 32 см и полем зрения $1,5^\circ$. Оба телескопа размещены в Клаудкрофте, Нью-Мексико (рис. 1.3.21). Чувствительность LMT — $17,5^m$, а CDT — $17,1^m$ при экспозиции 30 с. CDT работает в основном по КО на ГЕО, тогда как LMT используется для контроля низких и средневысоких орбит [144]. Совмещение результатов наблюдений LMT и «Хейстека» показало, что LMT свободно наблюдает КО размером 3 см, а после аппаратурной и программной доработки нижний размер наблюдаемых КО может быть доведён до 1 см [145]. К сожалению, LMT, несмотря на прекрасные результаты наблюдения КМ, использовался лишь до июня 2002 г., после чего был списан. Некоторые его компоненты были использованы при создании 6-метрового жидкозеркального телескопа LZT (*англ.* Large Zenith Telescope) в Канаде (вблизи Ванкувера, *англ.* Vancouver), проработавшего с 2003 г. по 2019 г. Он был списан в значительной степени из-за плохих погодных условий на полигоне. Однако LZT не был предназначен для работы по КМ. Университет Британской Колумбии планировал создание более крупного, 8-метрового жидкостного телескопа.



Рис. 1.3.21. Обсерватория НАСА для наблюдения космического мусора в Клаудкрофте, Нью Мексико, США [142]

54 В апреле 2022 г. в Индии заработал 4-метровый телескоп с ртутным зеркалом на ртути из LZT. Но пока мало информации о планах его использования.

Совместное использование радаров и оптических телескопов показало, что радары по своим возможностям значительно превосходят телескопы при контроле низких орбит. Они могут работать 24 ч в сутки, и их эффективность не зависит от метеоусловий. На низких высотах размер обнаруживаемых ими КО по крайней мере в 10 раз меньше, чем наблюдаемых оптическими телескопами, т.е. радары лучше подходят для обнаружения именно КМ [146].

В последние годы активно и плодотворно работает Мичиганский телескоп для обзорных наблюдений КМ **MODEST** (*англ.* Michigan Orbital Debris Survey Telescope) (рис. 1.3.22), размещённый в Межамериканской обсерватории (СТЮ, *англ.* Cerro Tololo Inter-American Observatory), Серро-Тололо, Чили. Это телескоп системы Шмидта с апертурой 0,6/0,9 м и полем зрения 1,3°. Предельная наблюдаемая звёздная величина — 18^m со временем накопления 5 с. Может обнаруживать КО размером 20 см на ГЕО. Телескоп используется в основном в режиме обзоров областей ГЕО с целью обнаружения малых и слабоконтрастных КО. Методы наблюдения КМ в области геосинхронных орбит с помощью этого телескопа постоянно совершенствуются [147, 148]. При обработке кадров применяется специальный алгоритм автоматического обнаружения слабых КО [149].

Например, в кампании наблюдений 2002 г., продолжавшейся 151 ночь, собрана большая коллекция коррелированных (связанных с общим источником) и некоррелированных (относящихся к разным целям) наблюдений КО с размерами, соответственно, 30 и 10 см. В частности, наблюдались осколки от взрывов ступени РН «Титан-3С-4» (*англ.* Titan IIIС-4) и ИСЗ «Экран-2».

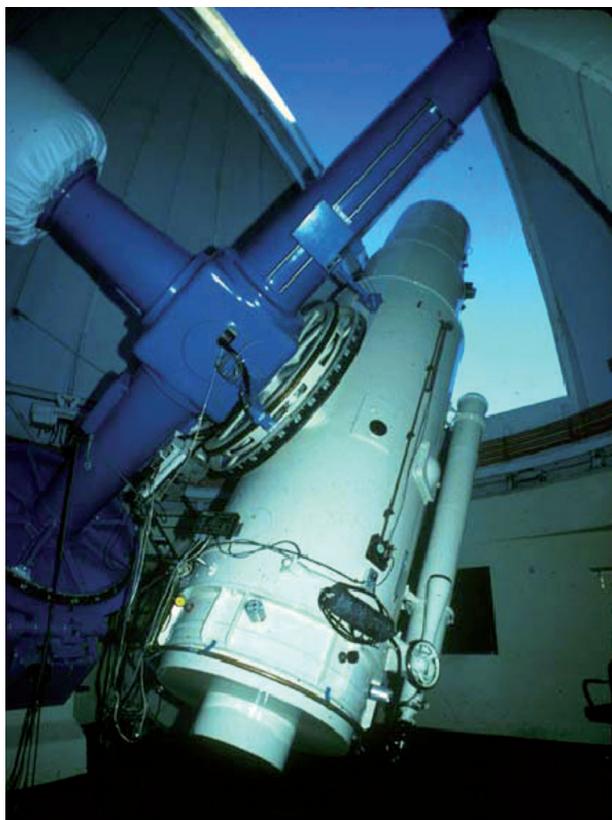


Рис. 1.3.22. Телескоп MODEST Мичиганского университета [162]

В кампании 2007–2008 гг., включившей в общей сложности 35 активных ночей, использовались одновременно два телескопа — MODEST и собственный телескоп обсерватории СТЮ с апертурой также 0,9 м и полем зрения $0,22^\circ$. Обнаруженный телескопом MODEST объект на геостационарной орбите после грубого определения параметров первоначальной орбиты по грубым же целеуказаниям передавался второму телескопу, который старался отслеживать его как можно дольше (даже в течение нескольких ночей подряд) с последующим точным определением параметров орбиты. При этом в данной кампании наблюдений процент успешных передач КО от телескопа MODEST второму телескопу оказался достаточно высоким (85 %) несмотря на довольно узкое поле зрения телескопа СТЮ.

Телескоп MODEST мог бы и самостоятельно продолжать отслеживать обнаруженный КО и определять параметры его орбиты, но ценой прерывания обзорной функции. Так что спарка этих двух инструментов оказалась весьма удачной для решения поставленной задачи.

Одной из целей кампании была каталогизация КО на ГЕО с блеском слабее 15^m . Обнаруженные и каталогизированные объекты имели как круговые, так и эллиптические орбиты (20 % из них имели эксцентриситет более 0,2) [150–160]. Совместная работа этих двух телескопов по наблюдению КМ была признана особенно успешной [151, 157, 159, 161].

В Японии (Бисей, *англ.* Bisei) действуют два специализированных оптических телескопа для обнаружения и контроля за КМ на ГЕО — один с полуметровым входным отверстием, другой — 1,01-метровый рефлектор, способный наблюдать КО размером до 30 см на ГЕО. Оба телескопа участвуют в кампаниях IADC по наблюдению КМ, оборудованы мозаичными ПЗС-приёмниками. Предельная звёздная величина — 18^m , т.е. наблюдению доступны КО на ГЕО размером 30 см [106, 163].

Как показал длительный опыт каталогизации крупных КО, а также многочисленные кампании по «биопсии» разных классов мелкого и среднеразмержного КМ с помощью наземных и бортовых космических средств наблюдения и, кроме того, технологии *in situ*, выборочные зондирования областей пространства малоэффективны по сравнению с непосредственным обнаружением и отслеживанием обнаруженных КО. А главное, такие разрозненные «сеансы» выборочного контроля некоторых областей орбит не дают полной картины об объёме и динамике соответствующих популяций КМ. Не спасает положения (а всего лишь несколько улучшает ситуацию) и принятие целевых национальных и международных программ выборочного зондирования ОКП. К этим методам прибегают лишь по причине отсутствия полноценной замены. Очевидно, важным шагом в направлении улучшения качества описания техногенной космической среды стало бы снижение минимального размера обнаруживаемых и отслеживаемых КО. Такую перспективу открывает новый подход к поиску малоразмерных и слабоконтрастных КО узкопольными и узколучевыми СН по неполной априорной информации об орбитах КО [25, 26]. Последнее требование, конечно, представляется определённым ограничением. Но какая-то априорная информация практически всегда есть и при неудачном запуске, и при манёвре, и при взрыве, и при столкновении, и при намеренном или ненамеренном отделении фрагмента от КО. Тем более что положительный и весьма эффективный опыт использования такого подхода уже есть [26, 164, 165].

До сих пор оптические обзоры ГЕО проводились с помощью телескопов метрового класса, таких как MODEST в Серро-Тололо, SDT на Канарских о-вах, имеющих пределы обнаружения в диапазоне $18\text{--}19^m$, что соответствует размерам КМ на этой орбите более 10 см с альбедо 0,175. Эти обзоры позволили обнаружить существенную популяцию КО с яркостью слабее 15-й звёздной величины, отсутствующую в официальном каталоге СККП США.

Для обнаружения КМ с яркостью слабее 20^m (размером на ГЕО менее 10 см) нужны более мощные телескопы. Недавно для этих целей стал использоваться 6,5-метровый Магелланов телескоп (*англ.* Giant Magellan Telescope) в обсерватории Лас-Кампанас (*англ.* Las Campanas Observatory) в Чили с полем зрения $0,5^\circ$. Это самое большое поле

56 зрения среди всех Магеллановых телескопов. При 5-секундной экспозиции предельная звёздная величина равнялась 21^m . За 6 ч наблюдения было обнаружено 19 КО. Приблизительно одна треть — это объекты с переменной яркостью (три и более вспышек за 5-секундную экспозицию), т.е. кувыркающиеся. Ни один из них не входил в официальный каталог СККП США. Это, разумеется, предварительные результаты, которые можно расценить как положительные и даже обнадеживающие [166–168].

Особого внимания заслуживает автономный телескоп метрового класса **MCAT** (*англ.* Meter Class Autonomous Telescope) (рис. 1.3.23) [169–174]. Это один из самых современных и совершенных телескопов в мире. Может следить не только за КО на ГЕО, но и за быстродвижущимися НОКО. У MCAT нет мёртвой зоны в окрестности зенита и нет необходимости переключения в системе управления при пересечении меридиана. Главная задача MCAT — просматривать (сканировать) геостационарный пояс с целью составления базы для описания техногенной среды как в инженерных моделях КМ (используемых при проектировании космических миссий), так и при долгосрочном прогнозировании состояния засорённости ГСО.



Рис. 1.3.23. Внешний вид телескопа MCAT

Телескоп размещён на о. Вознесения (*англ.* Ascension Island) в обсерватории орбитального мусора NASA/AFRL (*англ.* Air Force Research Laboratory) имени Джона Африкано в «слепой зоне» для других оптических средств, находится в идеальном месте для наблюдения низких орбит с низкими наклонами. Это инструмент с апертурой 1,3 м с высокоскоростным перенацеливанием и быстро перемещающимся куполом. Он способен отслеживать КО на низких, средних и высоких орбитах с малым и большим эксцентриситетом, в том числе геосинхронных и переходных с низких на геосинхронные. Вместе с телескопом того же класса, но меньшего размера будет использоваться в различных режимах с целью пополнения знаний о техногенном засорении ОКП и совершенствования соответствующих моделей, используемых НАСА. В 2017 г. ему было присвоено имя Юджина Стэнсбери (*англ.* Eugene Stansbury). В том же году MCAT окончательно принят в эксплуатацию. Он сейчас способен осуществлять обзор ГЕО в автоном-

ном режиме, отслеживать индивидуальные каталогизированные КО с определением и выдачей TLE (*англ.* Two-Line (Orbit) Element set) во всех орбитальных областях (от низких до ГЕО), осуществлять слежение с сидерическими и специальными несидерическими скоростями с целью калибровки по стандартным звёздам.

В 2018 г. раньше планового срока профилактики (из-за агрессивного влияния влажной среды) компания ZeCoat Corporation с помощью новой ионной технологии выпаривания нанесла на 800-фунтовое первичное зеркало улучшенное защищённое серебряное многослойное покрытие с отражательной способностью в среднем более 95 % во всех спектральных диапазонах телескопа. Эта патентованная технология позволила не только существенно улучшить функциональные характеристики по сравнению с показателями при старом, алюминиевом покрытии, но и увеличить продолжительность его службы. В главной камере была поставлена также новая ПЗС-матрица. В 2021 г. телескоп достиг своих полных операционных возможностей.

На рис. 1.3.24 показаны наблюдательные возможности телескопа МСАТ по точечным КО различных звёздных величин. По обработке нескольких циклов наблюдений (1 цикл — 25 ночей) предельная наблюдаемая звёздная величина оценена как $19,5^m$.

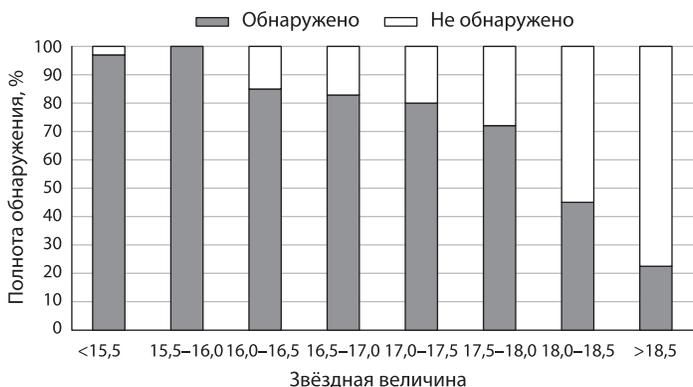


Рис. 1.3.24. Полнота (в процентах) обнаружения телескопом МСАТ точечных КО данной звёздной величины

Главная цель использования оптических наблюдений Управлением НАСА по проблемам техногенного засорения ОКП состоит в составлении функций распределения орбит КМ, количества КМ разных размеров, яркости, типов обнаруженного КМ на геосинхронных орбитах и переходных на ГЕО. Вторая цель — накопление информации по низкоорбитальным ИСЗ с низким наклоном, описание материала поверхности ИСЗ с помощью многодиапазонной фотометрии, раннее обнаружение разрушений КО, составление распределения средневысотных орбит. Третья цель — информационный вклад в оценку космической обстановки.

В ККП целесообразно использование этих двух телескопов в качестве привлекаемых средств в координации наблюдений со штатными наземными средствами (как радиолокационными, так и оптическими) для более точного определения орбит или дальнейшего исследования свойств КМ, включая сбор данных о космической погоде. Управление НАСА планирует эксплуатировать оба телескопа в автономном режиме с помощью специальных программ, которые непосредственно из Хьюстона управляют их операционными режимами.

1.4. Мониторинг мелкого космического мусора

Как следует из всего вышесказанного, крупный КМ размером более 10–20 см в основном обнаруживается и отслеживается системами ККП России и США, к которым, будем

надеяться, вскоре присоединится и европейская СККП. Однако этим системам удаётся контролировать далеко не весь крупноразмерный КМ. Например, обе действующие системы испытывают значительные трудности в обнаружении, анализе сигнатур и тем более каталогизации ВЭКО (космический объект на высокоэллиптической орбите) и КО размера меньше 50 см – 1 м на ГЕО [5, 175]. Многие крупные каталогизированные КО ввиду особенностей их орбит перестают наблюдаться, выпадают из каталога (теряются), и их приходится заново обнаруживать. Причём это не всегда удаётся, а если удаётся, то часто с помощью специальных поисковых технологий [25, 26]. Что уж говорить о мелкой фракции КМ.

Сейчас не остаётся ничего другого как осуществлять поиск, обнаружение, наблюдение и идентификацию мелкого КМ выборочно, по мере появления возможности, в отдельных местах и в отдельные интервалы времени. Полученная таким образом крайне ограниченная и, можно сказать, драгоценная информация должна далее использоваться в моделях в качестве выборочных представителей отдельных популяций КМ. В совокупности вся эта информация служит основой для оценки характеристик общей популяции КМ с помощью статистических методов, моделирования и экстраполяции.

Такие пробы из суммарного потока КМ могут браться либо посредством контакта поверхности КА (или даже пассивного КО) с окружающей космической средой с последующим возвращением его на Землю для исследования, либо дистанционно с помощью наземных или бортовых измерительных средств, регистрирующих КМ в момент его прохождения через поле зрения или луч СН.

В последние два десятилетия популярными стали кампании дистанционной «биопсии» потоков среднеразмерного и мелкого КМ с Земли. Взятие таких проб осуществляется путём фиксации оси диаграммы направленности радиолокатора или телескопа в определённом направлении (чаще вертикальном для достижения наибольшей чувствительности сенсора). В этом, «парковом» режиме СН «считает» объекты, пересекающие его поле зрения.

На первый взгляд, такой подход может показаться весьма многообещающим. Метровый телескоп в тёмное время суток теоретически способен обнаруживать освещённую солнцем металлическую сферу диаметром 1 см на расстоянии 900 км. К сожалению, в жизни не всегда так, как в теории. Большинство элементов КМ отражает гораздо меньше солнечного света, чем металлическая сфера. В среднем отражается лишь 10 % света. Кроме того, НОКО имеют угловые скорости, по крайней мере, 0,5 град/с по отношению к наземным СН, что ещё больше затрудняет их обнаружение и наблюдение КМ [5]. Наконец, могут возникать трудности с различением сигнала от техногенного КМ и от свечения метеоров.

Тем не менее, несмотря на все подобного рода трудности, наземные телескопы уже дали ценную информацию о популяции среднеразмерного КМ на низких орбитах. НАСА с 1983 г. регулярно проводит эксперименты по обнаружению не каталогизированных НОКО с помощью телескопов в кооперации с Линкольновской лабораторией Массачусетского технологического института и Космическим командованием США. В этих экспериментах используется электронная оптика с апертурой порядка 1 м. Они помогли также уточнить размеры и некоторых каталогизированных КО. Средний размер обнаруживаемых в этих кампаниях КО меньше 10 см [176].

Наземные телескопы также используются для «биопсии» различных популяций КМ и на более высоких орбитах. Периодически предпринимались обзоры высокоэллиптических орбит и ГЕО с участием СН РАН и НАСА. Выборочные обзоры переходных высокоэллиптических орбит (используемых для вывода ИСЗ на ГЕО) предпринимаются и Оптико-электронным комплексом наблюдения за ВОКО (GEODSS), принадлежащим СККП США [175, 177].

С 1987 г. проведено множество кампаний наблюдения КМ в парковом режиме и накоплено немало ценной измерительной информации о мало- и среднеразмерном КМ с помощью коротковолновых РЛС «Хейстек», НАХ, «Аресибо», «Голдстоун». А с 2014 г.

по 2017 г. проводились интенсивные наблюдения КМ модернизированным радаром «Хейстек» (HUSIR) [13]. О результатах кампаний неоднократно докладывалось на сессиях Комитета IADC и Европейских конференциях по КМ. Кроме того, РЛС с большей длиной волны TIRA (FGAN, Германия) и MU (*англ.* Mitsubishi, Япония) используются для зондирования потоков КМ среднего и крупного размера [178, 179].

Интересны результаты кампании 1989 г. по наблюдению КМ с участием мощных РЛС обсерватории «Аресибо» (длина волны 10 см) и Комплекса глубокого зондирования космоса «Голдстоун» (длина волны 3 см) в кооперации с другими радаром. Ни одно из этих средств не было предназначено для наблюдения КМ. Однако в течение 18-часового сеанса РЛС «Аресибо» обнаружила около 100 КО размером до 5 мм, а «Голдстоун» — порядка 150 КО размером 2 мм [180]. Значительная позитивная результативность этого эксперимента заключается в том, что он продемонстрировал высокую эффективность использования РЛС сантиметрового диапазона для сбора информации о миллиметровом КМ и доказал наличие большой популяции малоразмерного КМ.

Наиболее интенсивно и плодотворно для наблюдения мало- и среднеразмержного КМ используется радар «Хейстек» (рис. 1.4.1) (длина волны 3 см) — ветеран мониторинга КМ, а теперь уже его существенно модернизированная с значительно улучшенной способностью построения изображений КО версия HUSIR. Предназначенный и штатно используемый в совершенно иных целях, «Хейстек» только с 1990 по 1994 г. отработал более 2400 часов по КМ [181]. С тех пор он ежегодно привлекается к наблюдению КМ [146]. Этот радар, размещённый на широте 42° с.ш., может ориентировать свой луч в парковом режиме либо вертикально, либо на юг с углом места 25° и 10° (более поздние модернизации позволили расширить этот диапазон углов). В вертикальном парковом режиме достигается максимальная чувствительность, но могут обнаруживаться только НОКО с наклоном орбит более 42° . При ориентации луча на юг обнаруживаются НОКО с наклонами орбит до 25° .

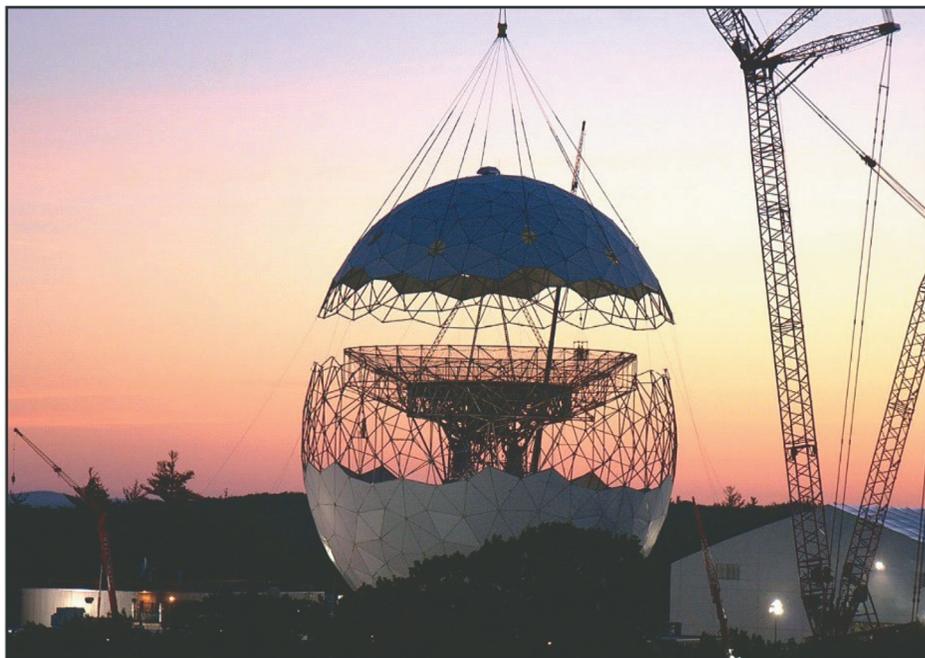


Рис. 1.4.1. «Хейстек» в процессе реконструкции. Установка новой антенны для более высокочастотного диапазона «Хусир»

РЛС «Хейстек» за всё время её использования в парковом режиме дала обширную информацию о размере, высоте, радиальной скорости (по доплеровским измерениям)

и направлениям движения элементов КМ на высотах до 1500 км. Эти данные дают возможность определять наклоны орбит КО с точностью до $\pm 5^\circ$ и грубо оценивать эксцентриситет. При вертикальной ориентации размер обнаруженных частиц изменялся от 3 мм на высоте 350 км до 7 мм на высоте 1400 км. В режиме ориентации на юг наименьший обнаруженный КО имел размер ~ 1 см. Ещё больше полезной информации о мелком КМ дало 4-летнее тестирование его модернизированной версии HUSIR [13].

«Хейстек» излучает радиоволны с правой круговой поляризацией, а принимает — и с правой, и с левой. Измерения поляризации принятого сигнала можно использовать для описания общей формы обнаруженного объекта [182].

В наблюдательных кампаниях одновременно проводилась и калибровка радаров (по размещённым на орбитах калибровочным болванкам — сферам и диполям — с заранее известными размерами, массой и формой), а по результатам калибровки уточнялись ранее полученные данные измерений КМ. С этой целью в 1994 и 1995 гг. в США под эгидой НАСА проводился космический эксперимент ODERACS с участием и Российской СККП (подробности в подразд. 1.3). В СССР в некоторой степени аналогичный эксперимент «Пион», как уже отмечалось выше, был проведён в 1993 г. (см. подразд. 1.3).

Наземные РЛС и телескопы вынуждены «разглядывать» КМ через вовсе не идеально прозрачную и, к тому же, неоднородную атмосферу, причём находясь на больших расстояниях. Естественно возникает предложение обратиться к бортовому базированию СН. Но у этого способа наблюдения, несмотря на ряд преимуществ (возможность наблюдения КМ с близкого расстояния, отсутствие «атмосферного фильтра»), есть и существенные недостатки. Это — и большая стоимость реализации и обслуживания, и высокие относительные скорости близко наблюдаемого КМ и сенсора, и трудности с калибровкой орбитальных сенсоров. С первым недостатком — дороговизной — обычно справляются известным приёмом «подселения» функций наблюдения КМ или даже специальных СН на КА, запускаемые с другими целями. Такой приём широко распространён в мире в виду его экономической эффективности. Для него даже ввели специальный термин — *riggy-back* (разг. нести на спине, на закорках).

По этому пути можно пойти ещё дальше. Как архив, так и результаты текущих астрономических и астрофизических наблюдений, проводимых специализированными бортовыми инструментами во время миссий, ничего общего не имеющих с исследованием КМ, наверняка содержат попутные и невольные наблюдения и самого КМ. В таких случаях получение данных наблюдений КМ обходятся совершенно бесплатно. Стоит только заглянуть в «чужие» записи и «выудить» нужную информацию. Но, почему-то этим приёмом не принято пользоваться.

Из предыдущих разделов уже ясно, что наземные активные (излучающие) СН вполне способны наблюдать мелкий (много меньше 1 см) КМ. Самая мощная РЛС сантиметрового диапазона (длина волны 3 см) «Голдстоун» может обнаруживать КО диаметром 2 мм. Наиболее эффективно, с точки зрения мониторинга техногенной засорённости ОКП мелкой фракцией КМ, они могут использоваться для контроля самых нижних орбит низкоорбитальной области.

Сенсоры космического базирования выгоднее использовать для поиска и наблюдения КО на верхних орбитах низкоорбитального диапазона. Ещё более полезными эти средства могут оказаться будучи применены для зондирования высокоэллиптических орбит и ГЕО. На последней редкий наземный инструмент может обнаруживать КМ размером менее 50 см. Кроме того, на ГЕО объекты движутся значительно медленнее, чем на низких орбитах, так что естественным образом на ГЕО исчезает второй недостаток средств наблюдения космического базирования — резкое снижение их эффективности из-за больших относительных скоростей СН и цели.

Наконец, мы дошли до мониторинга частиц размером меньше нескольких миллиметров. Их практически не могут обнаруживать ни наземные СН, ни (дистанционно) СН космического базирования. Здесь сравнительно эффективно работает только технология *in situ*, т.е. бортовые контактные датчики. Подобные способы регистрации мелкого

КМ используются уже давно. Они довольно эффективны, так как позволяют определять химический состав частиц (что важно для различения техногенных и метеорных частиц), их размеры, динамические характеристики и их плотность на разных орбитах. А современные бортовые детекторы позволяют регистрировать время столкновения его с КМ, что даёт возможность восстановить не только интегральную картину засорения ОКП мелким КМ, но и динамику его потоков. На многих КА система бортовых детекторов обслуживается специальным передатчиком, транслирующим на Землю информацию о событиях столкновений с мелким КМ либо в реальном времени, либо с небольшой задержкой.

Регистрация может осуществляться как пассивно, так и активно. В первом случае для фиксации ударов частиц мусора можно не прикладывать никаких специальных усилий. Достаточно естественного экспонирования поверхности КО (обычно крупного) в открытом космосе. Остаётся только либо вернуть на Землю КО или его фрагменты с экспонированными в космосе материалами через несколько лет или, на худой конец, месяцев полёта (как это произошло с отработавшими КА LDEF (*англ.* Long Duration Exposure Facility), Solar Wind, Palapa, EURECA (*англ.* European Retrieval Carrier), материалов со станций «Мир», «Салют»), либо с помощью специальной бригады космонавтов проинспектировать поверхность действующего КА непосредственно в космосе (как это происходит, например, с МКС и космическим телескопом «Хаббл»). Между прочим, в НАСА была составлена и постоянно обновлялась база данных обо всех столкновениях шаттлов с мелким КМ, которая тщательно анализировалась специалистами [183]. После каждого возвращения на Землю вся поверхность шаттла предоставляла ценнейшую информацию о техногенной засорённости области его полёта (и, будучи дополнительной к основной миссии шаттла, совершенно бесплатно).

Пассивная технология бортовых измерений КМ (в отличие от активных детекторов *in situ*) не требует разработки и использования специальных дорогих датчиков удара. В качестве регистратора удара используется естественная «штатная» поверхность КА или любого пассивного КО. Затратной оказывается лишь доставка КО на Землю, да и то, если она осуществляется специально только ради исследования результатов воздействия КМ на поверхность КО, чего во многих случаях удаётся избежать. Часто такой возврат бывает предусмотрен по другим функциональным поводам (возврат капсулы «Аполлона» (*англ.* Apollo), неизбежные возвращения шаттла и других планово возвращаемых КА). Ради специального инспектирования поверхности КА в космосе на предмет оценки её повреждения мелким КМ никогда целевая командировка космонавтов не осуществлялась. Такая операция всегда проводилась попутно, как, например, при ремонте телескопа «Хаббл», при регламентных выходах в космос членов экипажа МКС и т. п.

Сравнительная доступность пассивной регистрации ударов КМ о поверхность КО и обработки следов позволила собрать большой объём данных о результатах воздействия мелкого КМ на поверхность КО. Наибольшую поверхность, возвращённую с орбиты на Землю, имел КА LDEF, который находился на орбите 69 мес. Его поверхность имела десятки тысяч следов ударов КМ (максимальный кратер имел 0,63 см в диаметре). По крайней мере, половина крупных кратеров — от КМ, и практически все мелкие — от окиси алюминия Al_2O_3 . Но это было давно. В последующие годы регистрировались более крупные повреждения (сейчас мы говорим только об ударах мелкого КМ). Сравнить, хотя бы, с 2-сантиметровой дырой в антенне телескопа «Хаббл», пробоиной в роботизированной руке на МКС (2021), вмятиной диаметром 40 см на поверхности КА Sentinel-1A или крупными повреждениями солнечных панелей на некоторых КА.

Был проведён тщательный анализ экспонированных в космосе материалов, возвращённых с космических станций «Салют», «Мир», КА Solar Max Mission, LDEF, EURECA, Palapa, Westar, иллюминаторов капсулы Apollo, шаттлов, в эксперименте со Skylab, а также материалов, доставленных на Землю после ремонта космического телескопа «Хаббл» (рис. 1.4.2).

И всё же, несмотря на гигантский объём полученной информации о воздействии КМ на поверхность КО, она имеет ограниченную ценность для описания общей популяции

мелкого КМ. Во-первых, пассивные измерения рисуют только интегральную картину взаимодействия мелкого КМ с поверхностью КО и не дают возможности определить наличие и орбитальное местоположение скоплений КМ, оценить неравномерность распределения его в пространстве, динамику мелкой популяции под влиянием солнечной активности и других возмущающих факторов, тенденцию изменения характеристик популяции во времени. В основном данные получены с высот до 600 км, что тоже ограничивает выводы из их исследований. Поскольку большинство из возвращённых поверхностей не было предназначено специально для пробирования именно популяции КМ, оказалось сложным определить, где на них следы от техногенных частиц, а где от метеоров. Не так просто было выработать и систему градаций повреждений, провести их калибровку. В итоге оценки размеров и других параметров частиц различались у разных исследователей в три, а иногда и в 15 раз [184]. Поэтому значительные усилия были предприняты в направлении усовершенствования и унификации соответствующих методов [185].

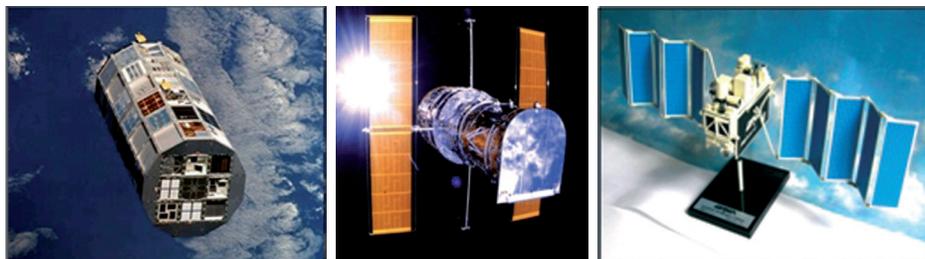


Рис. 1.4.2. КА LDEF, HST (англ. Hubble Space Telescope), EURECA

Активные технологии измерений *in situ* используют специальные бортовые датчики ударов частиц КМ (конденсаторные, полупроводниковые, химические). Такие датчики регулярно применяются в течение многих лет. Они устанавливались на борту КС «Салют», «Мир» [186], на ИСЗ серий «Эксплорер-16, -23, -46» (англ. Explorer), «Пегас» (англ. Pegasus) [187]. Например, на орбитальной станции (ОС) «Мир» во время миссии шаттла STS-76 были размещены детекторы и коллекторы КМ. После 18-месячной экспозиции в космосе они были возвращены для анализа на Землю миссией STS-86 [188].

Простейшие и дешёвые детекторы ударов КМ и метеороидов (конденсаторные, акустические, пьезоэлектрические, датчики давления) просто регистрируют факт удара [189]. Более сложные и высокотехнологичные типы детекторов (плазменные, химические, композитные, спектроаналитические, фотометрические) позволяют восстановить широкий диапазон характеристик ударившейся о поверхность КА частицы КМ. С помощью новейших активных детекторов можно измерять характеристики процесса удара во времени, в его динамике. По-видимому, нет смысла доказывать важность таких измерений для изучения характера изменчивости параметров космической среды, её моделирования и калибровки моделей.

КА LDEF был оснащён простейшими активными детекторами — полупроводниковыми конденсаторами, которые разряжаются во время удара. Целью эксперимента было изучение концентрации скоплений КМ на низких высотах [190, 191]. Вообще, для увеличения объёма и разнообразия собираемых данных о КМ целесообразно одновременно устанавливать различные типы детекторов.

Удобство активных детекторов состоит и в том, что нет необходимости в возвращении их на Землю для анализа, большая часть которого выполняется на борту. Все полученные данные (количество ударов в единицу времени и приходящихся на единицу площади, время каждого удара, относительная скорость, размеры и материал бомбардирующих детектор частиц КМ) транслируются на Землю. Это расширяет и диапазон высот, на которых можно проводить измерения КМ. Он, по сути, ограничен только дальностью действия радиопередатчика. Но из этого есть выход — передавать информацию транзитом через ближайшие КА. Сложные детекторы для определения относительной

скорости при ударе, химического состава материала атаковавшей детектор частицы КМ были установлены, например, на борту КА «Хитеи» (Япония) и Bremsat (Германия), а также на космическом зонде Cassini orbiter. Их стоимость колебалась от 100 000 до 1 млн дол. [192].

Для обнаружения скоплений КМ можно обойтись и более дешёвыми детекторами, например, теми, что были установлены на поверхности LDEF. Именно такими детекторами, действующими по принципу ёмкостного разряда, была оснащена промежуточная ступень РН КА «Клементина-1» (*англ.* Clementine). По периферии переходника ступени размещались детекторы с суммарной площадью активной поверхности $0,14 \text{ м}^2$. Сам переходник был сброшен на высокоэллиптической орбите вокруг Земли. Счётчик метеороидов и частиц КМ имел массу всего 500 г [193]. Эксперимент продолжался до тех пор, пока переходник не вошёл в плотные слои атмосферы в мае 1994 г. Его стоимость и стоимость эксплуатации составили 200 000 дол.

Кроме дороговизны, у активных детекторов есть и другие недостатки. Площадь экспонированной в космосе чувствительной поверхности датчика может составлять всего несколько сантиметров при значительной массе самого датчика (десятки килограмм). Нужна вспомогательная аппаратура для обслуживания датчика, которая опять-таки имеет значительную массу и занимает немалый объём. Затем могут возникнуть проблемы с интерпретацией полученных данных, а также потребоваться множество калибровочных тестов. Конечно же, ведутся интенсивные работы по преодолению этих недостатков [187]. Разрабатываются комбинированные системы детекторов с упрощённой методикой калибровки [194].

Очень большой недостаток активных датчиков — ограниченная площадь рабочей поверхности детектора. По этой причине размер наибольшей обнаруженной детекторами LDEF частицы равнялся 1 мм [195]. Дело в том, что плотность потока среднеразмерных частиц много меньше, чем мелких.

Миссия STS-41С в 1984 г. возвратила на Землю около 3 м^2 внешнего покрытия КА Solar Max после его более, чем четырёхлетнего пребывания в космосе. Эта же миссия вывела в космос спутник LDEF с поверхностью 130 м^2 . В ноябре 1984 г. миссия STS-51А возвратила на Землю ИСЗ Palara-B2 после девятимесячного его пребывания в космосе. Данные о 1600 ударах КМ в возвращённую часть поверхности Solar Max подтвердили значительное присутствие мелкого КМ в низкоорбитальной области. Обследование 1 м^2 поверхности ИСЗ Palara-B2 выявило более 50 отверстий в термопокрытии и кроме этого восемь кратеров глубиной до 0,7 мм в солнечных панелях. Изучение возвращённых из космоса поверхностей продолжается до сих пор. Оно уже позволило многое понять о происхождении мелкого КМ и степени его опасности [196].

Значительное увеличение площади рабочей поверхности детектора и времени его пребывания в космосе позволило бы не только существенно увеличить объём измерений самой мелкой фракции КМ, но и расширить возможность более полного изучения среднеразмерной фракции. И это не фантазия. Реальные возможности продвижения в этом направлении показаны в публикациях [186, 197]. В этом отношении перспективны сравнительно дешёвые тонкоплёночные активные детекторы, генерирующие сигнал, будучи пробиты элементом КМ. К сожалению, проблематично обеспечение достаточной продолжительности их полёта на низких орбитах (учитывая высокое отношение площади их поперечного сечения к массе). Кроме того, они сами выступают источником возможного столкновения с другими КО и очередного размножения КМ [5].

В мае 2006 г. было объявлено о проекте коллектора КМ LAD-C (*англ.* Large Area Debris Collector) с большой площадью поверхности (10 м^2) для установки на борту МКС в августе 2008 г. и возвращении его на Землю для анализа в 2009 или 2010 г. Он представляет собой систему аэрогелевых и акустических сенсоров для сбора и снятия характеристик КМ субмиллиметрового диапазона [198, 199].

В заключение раздела упомянем об интересном эксперименте, в котором Чикагский университет (*англ.* University of Chicago) в феврале 1999 г. вывел в космос инструмент

для регистрации космической пыли SPADUS (*англ.* Space Dust Instrument) на почти полярную орбиту высотой 830 км. В этом эксперименте впервые в истории освоения космоса бортовые датчики предоставили прямые свидетельства принадлежности суб-миллиметрового КМ взрывам конкретных КО. Главная задача программы состояла в обнаружении малых частиц размером менее 100 мкм. В течение первого года полёта SPADUS зарегистрировал 195 ударов таких частиц — в среднем по одному удару каждые два дня. В конце марта 2000 г. темп обнаружения ударов резко возрос более чем на порядок, свидетельствуя о вхождении детектора в облако или поток мелкого КМ. 40 % из обнаруженных в конце марта ударов КМ было ассоциировано с разрушением третьей ступени китайской РН серии «Великий поход» («Чанчжэн», *англ.* Long March) [200, 201].

1.5. Моделирование засорённости околоземного космического пространства

Сегодня мы осознаём, что располагаем лишь скудными данными о текущем состоянии космической среды. Хорошо известно распределение лишь крупных КО. Но для адекватного мониторинга ОКП не менее важно знать характеристики популяций среднеразмерного и мелкого КМ во всех орбитальных областях, а также и перспективу их динамику в будущем. Поэтому для заполнения пробелов (существует целый ряд критических областей) в собранной быстро и часто непредсказуемо меняющейся информации о потоках КМ неизбежно моделирование. При этом важно знать, что можно ожидать от моделирования и какие условия должны быть соблюдены для его хотя бы относительной корректности.

Прежде всего, необходимо располагать в качестве исходных данных исследования надёжными, предельно реалистичными (пусть даже неполными) оценками текущего состояния техногенной засорённости ОКП и иметь возможность прогнозировать различные характеристики космической среды на обозримое будущее.

Существует множество моделей засорённости космической среды. Они дают различные, часто противоречивые результаты. Только в материалах IADC фигурирует около двух десятков моделей, которые подразделяются на два самых общих класса — модели текущей засорённости ОКП (так называемые инженерные модели) и модели для прогноза засорённости (фундаментальные модели). Первые устроены наиболее просто: в качестве исходной используют информацию о параметрах орбит и некоординатных характеристиках КО, взятых в основном из каталогов КО и архивов измерений не каталогизированных КО, и преобразуют их в обобщённые показатели, такие как плотность потоков КМ в разных орбитальных областях, вероятность столкновения КО различных классов между собой и, прежде всего, с действующими КА, типичные виды распределения КМ и т.п.

Задача моделей первого типа — обобщённая интерпретация разрозненной массы данных (в большинстве случаев выборочных), собранных в ходе столь же разрозненных космических экспериментов, операций с КО, систематических измерительных кампаний с помощью, как правило, наземных СН, бортовых датчиков ударов КМ. Имеющиеся данные затем экстраполируются на другие орбитальные области и другие классы КМ. Выходные данные множества таких моделей характеризуются различной степенью достоверности, неопределённости и сроками пользовательской пригодности.

Модели второго типа используются для прогноза роста (*sic!*) популяции КМ, её структурных изменений, динамики различных её параметров, причём для различных возможных сценариев развития деятельности человека в перспективном освоении ОКП. Это последнее становится одним из главных отличий моделей второго типа от моделей первого.

Модели обоих типов содержат множество неопределённостей, обуславливающих недостаточную надёжность получаемых решений в результате их прогонов. Это неопределённости:

- в части текущих количественных характеристик и распределений КО разных категорий (по размеру, массе, материалу, форме, плотности и т. д.) на орбитах;
- количества, характеристик и исходных распределений КА, которые будут запущены в ближайшем и особенно отдалённом будущем;
- будущего уровня и динамики солнечной активности и его влияния на сопротивление атмосферы;
- характеристик фрагментов, образующихся в результате взрывов и столкновений КО;
- характера и темпов образования продуктов возрастной деградации поверхностей космического объекта;
- неточности и иногда неоднозначности самой измерительной информации (как координатной, так и некоординатной).

Все эти факторы имеют различное влияние на точность моделей текущей засорённости ОКП и прогнозирования будущих популяций КМ. Неопределённость знания характеристик не каталогизированных КО имеет, вообще говоря, ограниченное влияние на прогноз будущего состояния среды, так как именно крупные КО (а большинство их каталогизировано) определяют дальнейший рост общей популяции КМ. Мелкие КО обычно характеризуются меньшим сроком орбитального существования, чем крупные (в примерно одинаковых орбитальных условиях) в основном из-за большего отношения площади поперечного сечения к массе. Некоторые исследования показывают, что некаталогизированные КО не оказывают заметного влияния на эволюцию будущей популяции НОКО [202, 203]. Это предположение используется в моделях, где в качестве начальной популяции берутся только каталогизированные КО [204]. Однако это мнение оспаривается многими специалистами. В то же время, не следует упускать из виду опасность столкновения с мелким КМ, особенно в низкоорбитальных областях, что требует знания, по крайней мере, распределения плотности его потоков при планировании космических миссий и расследования выхода из строя КА.

Наконец, добавим, что ввиду постоянного развития и совершенствования измерительной техники и методологии измерений каталоги КО становятся всё более полными за счёт включения в них более мелких КО.

Темп будущих запусков, размеры будущих КА, их прочность и распределение их орбит нельзя предсказать точно ввиду их зависимости от таких факторов, как цели будущих миссий и требования к ним, появление новых технологий, мировое экономическое и политическое развитие. Из-за низкой точности прогноза солнечной активности и, следовательно, атмосферного сопротивления движению КО в низкоорбитальной области трудно точно предсказать количество объектов, которые сойдут с орбит в будущем под действием естественных причин.

В составе упомянутых выше двух общих типов моделей в качестве внутренних модулей или дополнительно привлекаемых частных моделей используется также множество других (узкоспециализированных) моделей, таких как модели столкновений, взрывов, процесса разрушения (разлёта осколков), трафика, выживания КО при входе в атмосферу, изменения солнечной активности и т. д.

Далее. Поскольку в основе моделей разрушений лежит очень ограниченный объём фактических данных (достаточно полно задокументированы последствия лишь нескольких известных столкновений в космосе и результаты небольшого числа наземных тестов при скоростях столкновений ниже типичных для НОКО) и они сами идеологически содержат много неопределённости, то и эти модели вносят весомый вклад в общую неопределённость предсказания состояния космической среды в будущем.

Нет также достаточной уверенности в том, насколько хорошо современные модели столкновений:

- учитывают влияние конфигурации различных КО и различные геометрические схемы столкновений;
- определяют пороговые размеры (в терминах массы и/или энергии) КО, которые могут разрушить встречный КО заданного размера;

- выстраивают распределение размеров и масс осколков, образованных в результате столкновений;
- предсказывают распределение векторов скоростей образующихся обломков и осколков.

Что касается последних сомнений, то проведённые наземные испытания указывают на то, что современные модели с вполне приемлемой точностью предсказывают количество крупных обломков, возникших при столкновении. Этому «помогли» недавние «исторические» разрушения — китайского ИСЗ «Фенгюн-1С», американского «Иридиум-33» и российского «Космос-2251», точнее, их анализ.

Авторы современных моделей прогнозирования засорённости ОКП часто управляют с этими неопределённостями, включая их как переменные в математическое представление моделей. Очень полезный и удобный приём. Например, модель может быть поставлена на прогон с установкой частоты взрывов РН, равной текущей. Затем можно провести прогон с нулевой частотой взрывов и оценить влияние пассивации РН на характер роста будущей популяции КМ. Замена некоторых неопределённостей на переменные не снижает общей неопределённости модели, но позволяет уточнить результаты моделирования для различных частных случаев и делает модель более гибкой и удобной в использовании.

Довольно простые ранние модели, применявшиеся для прогнозирования будущей засорённой среды [205, 206, 5, 207], строились на основе моделей первого класса (моделей текущей засорённости ОКП), включали модели взрывов и разрушений и модели сопротивления атмосферы. Они оказались на редкость удачными: строившиеся для предсказания параметров космической среды в 1980-е гг., они успешно использовались для решения тех же задач в 1990-х гг.

В настоящее время используются более сложные модели, сочетающие в себе так называемую модель трафика (плотности движения КО), модель разрушений и модель прогнозирования положения КО. В настоящее время используются постоянно совершенствуемые модели второго типа: разработанная Робертом Рейнолдсом (*англ.* Robert C. Reynolds) (первая версия была построена им в 1986 г.) эволюционная модель НАСА долгосрочной эволюции техногенной засорённости околоземного космического пространства EVOLVE [208–211], эволюционная модель ЕКА, разработанная Питером Эйхлером (*англ.* P. Eichler) в Брауншвейгском университете (*нем.* Technische Universität Braunschweig), CHAIN (модель ЕКА долгосрочной эволюции техногенной засорённости околоземного космического пространства) [212], модель А.И. Назаренко (*англ.* Space Debris Prediction and Analysis — SDPA) [213–215].

Первая представляет среду как совокупность целых космических систем и КМ, каждый элемент которой характеризуется своей орбитой, массой, площадью поперечного сечения и прочими традиционными характеристиками. В качестве исходных данных используется историческая запись запусков (КА, РН, операционных элементов), модель трафика для будущих запусков, модель разрушений для определения распределения характеристик фрагментов, образующихся в результате взрывов и столкновений. Модель движения учитывает сопротивление атмосферы, возмущения от сжатия Земли (J_2), лунно-солнечные возмущения для высокоэллиптических орбит. Однако модель EVOLVE потребляет слишком много компьютерного времени и большой объём памяти, поэтому её не используют для прогноза эволюции засорённости ОКП на очень отдалённую перспективу (столетия для тысячелетия), где непременно требуется учитывать и каскадный эффект.

Поэтому Питером Эйхлером был предложен другой подход («частица в ящике»), воплощённый им в модели CHAIN, специально предназначенной для самого долгосрочного исследования эволюции техногенного засорения ОКП и развития цепной реакции столкновений в космосе. Среда рассматривается как рандомизированный набор элементов в дискретных группах размеров КМ и высот. Точные модели трафика, разрушений, прогнозирования движения КО, в отличие от модели EVOLVE, используются лишь однократно в цикле для расчёта коэффициентов изменения параметров и аппроксимирующих

функций. Благодаря этому расход компьютерного времени сократился на три порядка. Эта модель используется и в НАСА.

У каждой из этих моделей есть, естественно, свои достоинства и недостатки. Модель EVOLVE работает медленно, но может в явном виде моделировать и учитывать практически все условия, влияющие на эволюцию среды, и вполне хороша для прогноза изменения среды на десятки и сотни лет. Модель CHAIN работает быстро и даёт картину эволюции среды на сотни лет и тысячелетия вперёд с учётом каскадного эффекта. Но есть значительные сложности с расчётом надёжных коэффициентов для представления скорости изменений [216]. Кстати, модель долгосрочной эволюции засорённости низкоорбитальной области EVOLVE 4.0 в 2000 г. была модифицирована и развита в модель GEO EVOLVE 1.0 для предсказания засорённости среды в глубоком космосе, в частности, в области геосинхронных орбит. В статье [217] дано довольно подробное описание особенностей последней модели.

Модели EVOLVE и CHAIN, к сожалению, малодоступны для широких кругов исследователей, включают как составляющие подсистемы инженерные модели НАСА и EKA, соответственно, ORDEM [218, 204, 219, 220] и MASTER (*англ.* Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model) [218, 221] постоянно улучшаемых версий. Сравнение возможностей этих двух моделей довольно подробно приведено в публикации [480]. Как оказалось, их результаты сравнительно близки, а расхождения легко объясняются.

В НАСА одна из наиболее совершенных моделей для предсказания динамики популяции КМ с учётом ожидаемой интенсивности запусков новых ИСЗ, той или иной политики и мер по предотвращению дальнейшей засорённости и смягчения её негативного влияния на космическую деятельность, т.е. для самых различных сценариев развития связанных с этим событий — это эволюционная модель LEGEND (*англ.* LEO-to-GEO Environment Debris model) [222–224]. Это модель следующего поколения, пришедшая на смену модели EVOLVE. Сравнение моделей EVOLVE и LEGEND, а также с рядом других моделей проведено в исследованиях [225, 226]. Контрольные сравнения орбитальных параметров элементов КМ на GEO, предсказанных моделью LEGEND, с измеренными телескопом MODEST описаны в публикации [30].

Ключевой компонент модели LEGEND — модуль оценки вероятности столкновений в космосе. Моделируется (прогнозируется) последовательность «срезов» каталога КО, и для каждого среза трёхмерное ОКП (или какая-либо его орбитальная область) разбирается на элементарные кубы. Далее, для каждого куба рассматриваются только КО, попавшие в данный куб (подход, аналогичный подходу в кинетической теории газа), после чего эти объекты больше не рассматриваются в данном цикле (для данного среза каталога). Это достаточно быстрый и эффективный способ осуществления попарного сравнения орбит. Время вычислений в этом случае растёт пропорционально общему количеству КО в каталоге N , а не N^2 , как в использованном ранее классическом случае задачи N тел.

На каждом временном шаге интегрирования необходимо идентифицировать кубы и рассчитать вероятности столкновений для каждой пары КО в каждом кубе. Как и в любом стандартном статистическом методе для повышения точности расчётов предпочтительны разбиение пространства на большее число более мелких кубов и/или более короткий интервал времени между срезами каталога КО. Практически достаточно принять размер стороны куба не более 1% от средней по каталогу большой полуоси орбиты КО. Предельно допустимые установки для модели LEGEND — временной шаг интегрирования, равный пяти суткам, и размер куба $10 \times 10 \times 10$ км.

Данный подход совместим с моделированием эволюции орбит любых КО (ИСЗ, астероиды, кометы и т.д.) при расчёте вероятности столкновений в долгосрочной перспективе [222], что сильно расширяет область её применения, делает её универсальной.

Основная рабочая инженерная модель НАСА ORDEM 2000 в 2010 г. претерпела существенную модернизацию и была заменена её последней версией ORDEM 2010, которая,

кстати, впервые включила моделирование популяции геосинхронного КМ размером 10 см и крупнее. Однако с её помощью моделируется и очень мелкий КМ — например, в диапазоне 10 мкм – 1 мм, а также в сантиметровом диапазоне [227–229].

Опорными для моделирования популяции геосинхронных КО становятся измерения телескопов, а для моделирования низкоорбитального КМ — радиолокационные измерения (СККП США, «Хейстек», НАХ). Ключевым нововведением в версии модели ORDEM 2010 выступает структура входных файлов ежегодных популяций КМ с 1995 по 2035 г. размером от 10 мкм до 1 м от низких орбит до геосинхронных.

Основными измерительными данными, учитываемыми при моделировании популяции КМ микронного размера, служат зарегистрированные *in situ* кратеры и эрозии от сверхкосмических ударов, выявленные в послеполётном анализе возвращённых на Землю экспонированных в космосе поверхностей [219, 220, 229]. Сравнение версий этих моделей ORDEM 2010 и MASTER 2009 достаточно подробно проведено в исследовании [218].

В этих моделях за основу берётся текущее состояние засорённости ОКП, затем добавляются и исключаются некоторые потоки КМ (с учётом взрывов, столкновений, сгорания КМ в атмосфере, мусора, сопутствующего запускам и функционированию и т.п.), прогнозируются орбиты этих КО. В результате получается статистическая картина засорённости в будущем с множеством координатных и некоординатных характеристик КМ, включая даже плотность материала КМ (как, например, в ORDEM 2010).

Очередная обновлённая версия модели — ORDEM 3.0 была выпущена осенью 2012 г. [66]. В виду большой её значимости и практической востребованности модель постоянно модернизируется, о чём специалистов регулярно информируют в ежеквартальных отчётах НАСА ODQN (*англ.* Orbital Debris Quarterly News).

В конце 2019 г. вышла версия модели ORDEM 3.1, имеющая ту же структуру, что и предыдущая, но с существенными обновлёнными исходными данными для её калибровки. Описание её возможностей и результатов сравнения с моделью EKA MASTER-8 содержится в публикации (ODQN. 2021. V. 25. Iss. 3).

НАСА стала всё чаще обновлять свою инженерную модель, и очередная её версия ORDEM 3.2 была выпущена в 2022 г. [476]. Прежняя структура сохранена (что говорит о высоком доверии к ней), но модель была дополнительно откалибрована по измерениям фрагментов разрушения КА «Космос-1408», полученных от специализированных радаров «Хусир» и «Голдстоун».

В современных моделях прогноза засорённости важным компонентом служит так называемая модель трафика, предсказывающая частоту и характер будущих космических миссий и событий и их влияние на количественные и качественные характеристики популяций КМ, частоту случайных и намеренных взрывов на орбитах. Модель учитывает все типы выводимых на орбиты КО, размер, массу, параметры орбит, ожидаемые орбитальные манёвры и коррекции орбит, переводы на орбиты захоронения, возможные причины будущих взрывов (остатки топлива на борту, баллонов со сжатым газом, наличие аккумуляторных батарей и других энергетических ресурсов).

Хорошая модель трафика должна позволять для разных сценариев развития космических программ оценить эффективность предлагаемых мер по предотвращению дальнейшего техногенного засорения космоса. Но именно в этой области мы наталкиваемся на препятствия. Здесь нельзя обойтись без учёта национальных, международных, частных, межкорпоративных и прочих программ космической деятельности, которые ожидают нас в будущем. Предвидеть их особенно на далёкое будущее — дело весьма ненадёжное: на их формирование и, главное, фактическое выполнение влияет множество факторов, которые могут реализоваться или не реализоваться в будущем с очень большой неопределённостью. Также могут вмешаться и новые, заранее не предсказуемые факторы. Причём всё это модель должна преломлять и отражать в различных областях орбит и для разных классов КМ.

Модель разрушения КО (в результате взрыва, столкновения, «старения» последнего), используя по возможности более объективное физико-математическое описание механизма и процесса разрушения (своего для каждой причины разрушения), должна представить соответствующую картину разлёта осколков с указанием всех необходимых параметров для каждого фрагмента или статистически в виде распределения координатных и массогабаритных параметров (в том числе начальных скоростей).

Входной информацией для модели должны служить вид и энергетические характеристики причины разрушения. Ею, в частности, может быть и комбинация столкновения с последующим взрывом, как, например, при испытании кинетического оружия или столкновении РН, сохранившей остатки топлива на борту, с крупным обломком.

Одна из известных моделей разрушения, используемых НАСА, применялась в 2002 г. при апостериорном моделировании и исследовании взрыва ступени американской РН «Титан IIIС» в 1992 г. [230]. Основная модель разрушений, используемая НАСА, была радикально обновлена в 1998 г. и в последующие годы продолжала совершенствоваться [231]. Её характеристики приведены в публикациях [232, 233].

Вместе с тем, существующие модели разрушений весьма далеки от совершенных. Во-первых, не существует типичного разлёта фрагментов ни по количеству, ни по направлениям (который можно было бы положить в основу модели), что связано с большим разнообразием конструкций КА, причин и конкретных реализаций взрывов, типов, конкретных условий и особенностей столкновений. Невозможно предсказать, столкнутся ли крупные КО лоб в лоб, встретятся под углом или только коснутся друг друга, тогда как результаты во всех этих случаях будут абсолютно различными. Здесь доступно лишь статистическое усреднение (причем весьма грубое).

Характер фрагментации, количество и картина разлёта осколков существенно зависят от размеров и массы сталкивающихся КО, взаимного положения векторов их скоростей в пространстве, материалов конструкций обоих КО и самих конкретных конструкций, непосредственных точек соударения и т.д. Во-вторых, исследователям доступно очень мало подробных данных о конкретных взрывах и столкновениях именно в космосе, а не в лабораторных условиях. Эти данные можно было бы использовать для изучения и большей конкретизации характера процессов взрыва и столкновения, а также для калибровки соответствующих моделей.

В первом случае можно было бы разработать теоретическую классификацию столкновений и взрывов и при построении моделей опираться на полученные распределения, но этот путь опять-таки упирается во второе препятствие: мало реальных данных для калибровки. Взрывы и столкновения в космосе удаётся регистрировать не так уж часто (гораздо чаще их просто не замечают СН), а если уж с этим повезёт, то нужно тщательно отследить и детально, пофрагментно измерить с самого начального момента разрушения все нужные параметры, чтобы получить удовлетворительный комплект данных. Сделать это в естественных условиях совсем не просто.

Проводились наземные опытные взрывы специально для определения распределений масс и скоростей фрагментов [234]. Однако в лабораторных условиях невозможно воспроизвести точно ситуацию в открытом космосе. В США в 1992 г. довольно полные данные о характере разрушения были получены Национальным управлением по ядерной безопасности (*англ.* National Nuclear Security Administration — NNSA) в лабораторном эксперименте, в котором снарядом массой 150 г на скорости 6 км/с обстреливалась натурная модель целого ИСЗ и его частей [235]. Но скорости КО в космосе, тем более относительные, могут колебаться в очень широком диапазоне — от нуля до 15 км/с и выше, не говоря уже о ракурсах столкновения.

Проводились и преднамеренные столкновения в космосе, например, P-78 и D-180 в 1986 г. на высоте 192 км [5, 236], но при этом не было получено сколько-нибудь значимой информации о мелких, не отслеживаемых в то время фрагментах, которые, по всей вероятности, все сгорели в течение недели-двух в виду крайне низкой орбиты [383].

Значительное количество данных о разрушении катастрофического типа и эволюции орбит фрагментов было получено и продолжает поступать от наблюдения последствий испытания Китаем кинетического оружия в космосе в январе 2007 г. [237–242] и Россией в ноябре 2021 г. То же можно сказать и о мониторинге злосчастного столкновения действующего американского КА «Иридиум-33» с пассивным российским ИСЗ «Космос-2251» в феврале 2009 г. [243]. Но, опять-таки, существенных сведений об образовании (и, тем более, динамике) в результате этих разрушений мелкой фракции КМ получено не было.

Все эксперименты — и на Земле, и в космосе — а также наблюдение и анализ реальных взрывов и столкновений в космосе проливают свет главным образом на характеристики потоков крупных фрагментов разрушений. Что же касается количества и динамики образующихся при этом мелких частиц, то всё это до сих пор остаётся белым пятном в области изучения околоземного техногенного КМ.

В настоящее время в существующих моделях разрушений для их калибровки и настройки используются количественные и динамические данные об известных взрывах, столкновениях, «возрастных» разрушениях КО (случившихся в космосе или лабораторных условиях) [244]. Но это данные, повторяем, практически только о фрагментах размером <2–3 мм. Для полноты модели мелкая фракция моделируется теоретически, статистически, путём экстраполяции. Но, к сожалению, ещё слишком мало знаний о связи между известной наблюдаемой крупноразмерной фракцией фрагментов разрушения и его малоизвестной, практически не наблюдаемой малоразмерной фракцией.

Иногда независимо используется модель предсказания опасности от разрушения КО в ближайшей перспективе.

Крайне актуально создание комплексной модели разрушения, в которой по известной (наблюдаемой) картине разлёта осколков крупноразмерной фракции автоматически, с учётом заранее установленной корреляции с достаточно высокой достоверностью и точностью воспроизводилась бы соответствующая мелкая фракция. Только в этом случае модель разрушения можно было бы справедливо оценить как полную и сравнительно адекватную.

Непременной составляющей современных моделей прогнозирования техногенной засорённости ОКП становится модель движения КО в поле возмущающих сил, предсказывающая значения параметров орбит ИСЗ в функции времени. Она используется, во-первых, в оперативных целях для определения положения конкретных КО в ближайшей перспективе по начальным данным об их орбитальных параметрах в ближайшем прошлом с целью предсказания возможного их сближения или столкновения и, в случае необходимости, для расчёта манёвра увода от столкновения. Оперативное краткосрочное прогнозирование необходимо также для предсказания времени и области входа КО в плотные слои атмосферы с последующим определением времени и места возможного падения его обломков на Землю, что в случае крупных обломков крайне важно.

Во-вторых, эта модель нужна и для долгосрочного прогнозирования (на годы, десятки и сотни лет) движения множества КО с орбитами самых разных классов с целью предсказания будущего состояния техногенной космической среды, в которой нашим потомкам придётся осуществлять космическую деятельность. В чём-то эти задачи схожи, но каждая встречается со своими трудностями. Обе модели должны учитывать воздействие на КО (кроме центрального гравитационного поля Земли) различных возмущающих его движение сил (сопротивление атмосферы, нерегулярности гравитационного поля Земли, давление солнечного излучения, гравитационные возмущения со стороны Луны и Солнца). Конечно, далеко не на всех орбитах ИСЗ испытывают одновременно ощутимое влияние всех этих сил в мере, требующей их учёта. И это хорошо, так как программно-алгоритмический учёт одновременно всех возмущений довольно трудоёмок. Кроме того, действие этих сил на конкретный КО зависит не только от параметров его орбиты, но и от отношения площади его поверхности к массе.

Для каждого класса орбит естественно учитывать только те возмущения, которые существенно влияют на движение КО именно этого класса. Например, в классе низких орбит,

где наклонение орбиты практически не меняется в течение длительного времени, при долгосрочном прогнозировании обычно ограничиваются определением изменения положения апогея и перигея орбиты под воздействием атмосферного торможения.

В моделях краткосрочного прогнозирования при решении очень ответственных задач, например, предсказания сближения или столкновения объектов требуется знание и позиционирование всех сил, действующих на КО (и, конечно, более частое проведение позиционных измерений). В классе низких орбит присущая атмосферному фактору «хроническая» непредсказуемость вносит наибольшие ошибки в результаты прогноза, выполненного детерминистскими моделями движения НОКО. И здесь для случаев, где требуется очень высокая точность прогнозирования вектора состояния КО, единственный выход — более частые наблюдения КО. В Российской СККП такой подход используется в аварийных и критических ситуациях (например, при входе крупных КО в плотную атмосферу или при оценке степени опасного сближения МКС с другим КО). При этом используются модели краткосрочного прогнозирования вариаций плотности атмосферы, в которых, кроме солнечной и геомагнитной активности, учитываются и данные о текущей плотности атмосферы, получаемые по почти синхронным массовым наблюдениям других КО в данной области [245, 246].

Иначе дело обстоит в задачах долгосрочного прогнозирования орбит НОКО, в которых неопределённость в короткопериодических изменениях плотности атмосферы (являющаяся большой проблемой для краткосрочного прогнозирования положения НОКО) не так серьёзна. Во-первых, это не единственная неопределённость, с которой приходится считаться, и все они должны быть усреднены. Во-вторых, модели долгосрочного прогнозирования «не очень заинтересованы» в КО, движение которых сильно подвержено воздействию сопротивления атмосферы, так как они всё равно довольно скоро сгорят.

Тем не менее, фактор неопределённости сопротивления атмосферы всё же заметно ограничивает точность долгосрочного моделирования движения КМ. Если известны показатели солнечной и геомагнитной активности, прогноз плотности атмосферы сопадёт с реальным её значением в будущем с точностью 20%. Но плотность атмосферы может изменяться в 10 раз на протяжении 11-летнего цикла изменения солнечной активности, а уровень будущих циклов обычно непредсказуем [5].

Насколько существенно влияние уровня солнечной активности на «очищающее» действие атмосферы, можно хотя бы качественно оценить, обратившись к следующему факту. Половина сгоревших за пять лет (к 2012 г.) фрагментов китайского КА «Фенгюн-1С» (а всего за этот срок сгорело 6% из образовавшихся) сгорела именно за 2012 г. из-за повышенной солнечной активности [247]. На рис. 1.5.1 показано изменение темпа сгорания в атмосфере низкоорбитального КМ за пять лет (с 2007 по 2012 г.) на примере обломков разрушения КА «Фенгюн-1С».

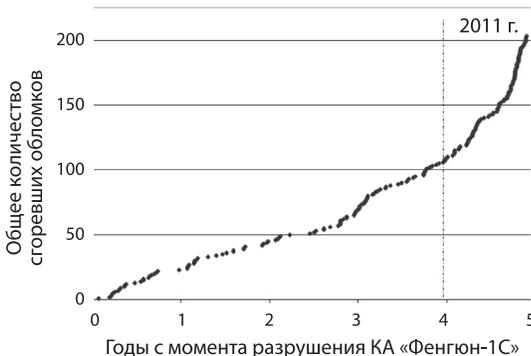


Рис. 1.5.1. Приблизительно половина сгоревших фрагментов КА «Фенгюн-1С» сгорела за пятый год после разрушения из-за возросшей солнечной активности

72 Для прогнозирования солнечной активности используются специальные модели [248–250]. Из вышесказанного следует, что для долгосрочного прогнозирования состояния популяции техногенного КМ оправдано применение лишь самых простых моделей движения НОКО.

На эволюцию более высоких орбит (выше 500–600 км) сопротивление атмосферы перестаёт заметно влиять, но начинает сказываться более сильное влияние лунных и солнечных гравитационных возмущений, неравномерности земной гравитации, давления солнечного излучения. Особенно значительно такое влияние на очень мелкие КО и объекты с большим отношением площади поперечного сечения к массе. Эти возмущения вызывают заметные изменения в эксцентриситете, наклонении, высоте апогея и перигея. В отличие от плохо предсказуемого атмосферного фактора, влияние данных возмущений может быть учтено в модели движения с вполне приличной точностью, что и оправдывает усложнение моделей с этой целью для обслуживания областей средне-высоких и высоких орбит, а современная вычислительная техника вполне справляется с требуемым для этого увеличением объёма вычислений.

В области высоких орбит трудности на пути решения задач высокоточного расчёта опасных сближений КА с элементами КМ и расчёта манёвров уклонения возникают вовсе не со стороны моделей краткосрочного прогнозирования движения КО (которые в этой области работают вполне удовлетворительно), а из-за сложности обнаружения и слежения за объектами на таких орбитах, точности определения положения ВОКО и, в частности, геостационарных и вообще геосинхронных КО. Отсюда большое число ложных тревог в службах контроля за опасными сближениями ВОКО. С ними возникает много проблем и при обеспечении безопасности полёта МКС (см. подразд. 3.1).

У всех существующих моделей, несмотря на их обилие, есть свои недостатки, и исследователи, как правило, вынуждены полагаться на доступный модельный инструментарий, не подвергшийся всесторонней отработке, не откалиброванный по последним, новейшим измерительным данным (их ещё нужно получить и отсортировать!).

Даже самые лучшие модели быстро устаревают ввиду, по крайней мере, двух следующих причин.

1. Всякая, даже самая полная модель, учитывающая все важнейшие влияющие на качество её результатов факторы, должна быть тщательно откалибрована. Для этого нужно располагать реальными измерениями моделируемой среды хотя бы в отдельных её областях. К настоящему времени получен гигантский объём измерений параметров КМ всеми доступными средствами наблюдения. Однако ввиду необъятных размеров ОКП, сложной взаимной и внутренней структуры потоков КМ в разных областях космоса и весьма непростой динамики (во всех параметрах) этой структуры, недостаточности средств наблюдения — вся совокупность полученных на сегодня данных измерений оценивается как относительно скудная, не дающая адекватного представления о засорённой космической среде. Поэтому для качественной калибровки модели необходимо получить как можно больше дополнительной информации и желательно о возможно большем числе различных областей ОКП.
2. Околоземная космическая среда постоянно изменяется и ввиду свойственной ей динамики, и из-за постоянного вброса новых порций КМ при запусках ИСЗ, высвобождения новых объектов в процессе полёта и функционирования КА, разрушений КО, взрывов и т.п. Причём каждый тип вброса происходит со своими индивидуальными закономерностями изменения параметров среды. Стационарность потоков КМ периодически нарушается появлением сингулярных точек образования новых региональных популяций КМ в результате взрывов, столкновений, прочих разрушений. Эти образования имеют практически непредсказуемые характеристики (количество, распределение масс и векторов скоростей её элементов). Поэтому модель должна постоянно совершенствоваться и обновляться, а её калибровка — регулярно повторяться с участием новых полученных измерений.

В заключение раздела, посвящённого мониторингу ОКП, можно сделать следующие выводы. Крупный КМ (размером более 10–20 см, на ГЕО более 1 м, а некоторыми СН

до 50–100 см) удовлетворительно контролируется системами ККП России и США, и его популяция, особенно НОКО, вполне информативно представлена в каталогах этих систем. Это достаточно хорошо известный своими каталогизированными характеристиками сегмент общей популяции КМ. Вместе с тем, в них плохо представлены ВЭКО, КО с малыми наклонениями орбит и КО на полусуточных круговых орбитах, особенно неоперируемые, не говоря уже о малоразмерных КО. Улучшению качества каталогов КО мог бы способствовать регулярный обмен их данными между Россией и США и вообще обмен орбитальной и измерительной информацией между всеми государствами, располагающими средствами наблюдения с достаточными возможностями. Взаимовыгодным итогом этого процесса могло бы стать создание и ведение единого каталога КО на базе национальных каталогов и национальных средств наблюдения.

В отличие от мониторинга крупного КМ, значительные пробелы существуют в обнаружении и сопровождении мелкого и среднеразмерного. Наиболее эффективным способом мониторинга последнего остаются дистанционные наблюдения с Земли с помощью различных радиолокационных, оптических и оптико-электронных средств, прежде всего, работающих в парковых режимах. Выборочное зондирование потоков среднеразмерного и мелкого КМ, будучи довольно эффективными, к сожалению, проводится в основном эпизодически, по случаю и по возможности, отсутствует системный подход к решению этой задачи. В результате обследованы весьма ограниченные области космического пространства и за ограниченное суммарное время. Целесообразной была бы централизованная системная координация этого процесса с постоянным увеличением числа его участников и организация совместного анализа как архивных, так и новых данных, что улучшило бы понимание источников малых и среднеразмерных частиц КМ и динамики их популяций.

Несомненно, полезны кампании наблюдений КМ всеми доступными средствами, периодически организуемые комитетом IADC.

Разработкой моделей текущей техногенной засорённости ОКП и её прогнозирования занимается множество специалистов во всём мире. Сравнительный анализ некоторых из них проведён, например, в публикации [251]. Однако эти модели всё ещё далеки от совершенства как вследствие недостатка знания механизмов происходящих в космосе процессов с КМ, так и из-за недостаточного объёма измерений потоков среднеразмерного и мелкого КМ.

Итак, все типы упомянутых моделей нуждаются в дальнейшем совершенствовании: уточнение теоретической основы, получение и ассимиляция в модели новой измерительной информации, устранение или, по крайней мере, уменьшение присущих им неопределённостей, учёт как можно большего числа источников мусорообразования, повышение точности моделей. Всё это необходимо делать, причём с высокой ответственностью, хотя бы потому, что на основе результатов прогонов моделей принимаются очень дорогостоящие решения о мерах борьбы с засорением космоса и о конструкциях и программах полёта КА.

Раздел 2. СОСТОЯНИЕ ЗАСОРЁННОСТИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Специалистам хотелось бы иметь как можно более полное и точное описание всей популяции КМ и различных её фракций. Без этого невозможно проводить обоснованную политику освоения космоса и осуществлять космическую деятельность эффективно и безопасно. К сожалению, достаточно полные и надёжные характеристики этой быстро меняющейся среды пока получить практически невозможно. Информация об этих характеристиках нужна для оценки степени сегодняшней и будущей опасности для космических миссий со стороны КМ. Имеющиеся характеристики среднеразмерной и мелкой популяций КМ основаны на весьма ограниченном объёме выборочных измерений и экстраполяции этих данных на неисследованные орбитальные области. Таким образом, и оценки общей популяции КМ довольно неопределённые. Более того, оценки самих границ этой неопределённости также не отличаются достаточной точностью.

2.1. Источники засорения космоса

Источники техногенного засорения ОКП весьма разнообразны, но все они связаны с освоением космоса человеком. Естественные метеороиды не создают серьёзной опасности для грамотно спроектированных КА. Тем более что они, придя извне, быстро проходят через ОКП, сгорая в плотных слоях атмосферы, либо (в редких случаях) достигают поверхности Земли. Техногенные же КО, будучи запущены с Земли на орбиты вокруг неё, остаются на этих орбитах длительное время, создавая постоянную угрозу (пропорциональную времени их орбитального существования) для действующих космических аппаратов, объектов на Земле и её населения, а также прочие негативные эффекты.

Космический мусор образуется при запуске ИСЗ, выводе его на орбиту и в процессе функционирования КА (как пилотируемого, так и автоматического). Этот КМ называется сопутствующим миссии КА. Неудачные запуски (а в последнее время их было слишком много) обидны вдвойне. Во-первых, миссия не удалась, и бессмысленно потрачены баснословные средства. Во-вторых, на нештатные орбиты выведены массивные объекты, сразу превратившиеся в КМ, даже не приступив к выполнению полезной работы.

Наиболее мощный источник образования КМ — разрушения КО. Они бывают четырёх основных видов: 1) взрывы КА и РН (намеренные или самопроизвольные), 2) столкновения КО и 3) деградация поверхности КО под воздействием агрессивной космической среды (так называемое «старение» КО, или «возрастная» деградация), 4) продукты работы твердотопливных двигателей.

В отдельную категорию можно выделить аэродинамическое разрушение, которое часто происходит с КО на высокоэллиптических орбитах в области перигея при достижении им достаточно низкого положения (например, 75–100 км). Этот вид разрушения, при котором обычно теряются солнечные батареи и другое навесное оборудование, может сопровождаться взрывом, хотя и не обязательно. К счастью, образующиеся при этом фрагменты разрушения в большинстве оказываются короткоживущими.

Фактически, это совершенно разные источники образования КМ. Конечно же, все эти источники следует учитывать с различными весами при анализе степени их влияния на общее засорение ОКП. Причём в перспективе соотношение этих весов может (и, скорее всего, будет) радикально изменяться. Например, когда столкновения КО при достижении критической плотности КМ в некоторых областях орбит перерастут в фазу каскад-

ного эффекта (см. ниже синдром Кесслера), самым мощным источником образования нового КМ станут именно столкновения.

При этом не обязательно нужно ждать начала цепной реакции столкновений. Уже в её преддверии столкновения становятся доминирующим источником образования КМ в низкоорбитальной области. Мониторинг космоса свидетельствует об увеличении частоты столкновений. И это только по данным зарегистрированных случаев.

Если сравнивать взрыв и столкновение с точки зрения опасности для перспективы состояния космической среды, то столкновение опаснее. Средняя относительная скорость столкновений в космосе 10 км/с, но бывает и значительно больше. Эти скорости относятся к категории сверхзвуковых. Их особенностью является образование огромного количества мелкого КМ, гораздо большего, чем при взрыве. (Здесь имеются в виду обычные взрывы, происходящие на орбитах — неядерные.) На рис. 2.1.1 сравниваются результаты взрыва полуторатонной ступени РН и сверхзвукового столкновения такого же по массе объекта с небольшим обломком [191].

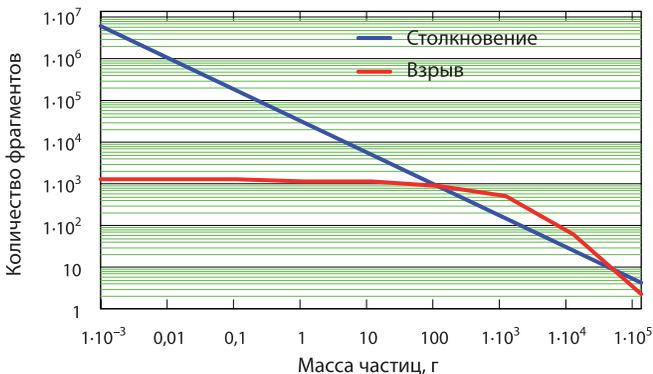


Рис. 2.1.1. Сравнение выхода фрагментов различных размеров в результате взрыва и сверхзвукового столкновения

Если текущий темп накопления КМ сохранится, то уже к середине нашего столетия в некоторых диапазонах низких орбит плотность КМ достигнет критического уровня и начнётся каскадный эффект. Это предсказание его автор Дональд Дж. Кесслер (*англ.* Donald J. Kessler) сделал в 1991 г. Сегодняшние прогнозы ещё серьёзнее, и они более обоснованы, а следовательно, более достоверны, так как за 30 лет накоплено много фактических данных о текущей засорённости ОКП, а главное — о её динамике.

По мнению некоторых экспертов, каскадный эффект уже начался, по крайней мере, на высотах 900 км – 1000 км, а также в пределах некоторых популяций мелкой фракции КМ [213, 252, 191]. Ниже эти процессы и классы результирующего КМ будут рассмотрены подробно.

Во время работы твердотопливного реактивного двигателя (ТРД) образуются и выбрасываются из сопла мелкие частицы продуктов горения, например, окиси алюминия Al_2O_3 . ТРД обычно используются для перевода КА с низкой орбиты на ГЕО. В результате своей работы они выбрасывают тысячи килограммов в основном пылевидных частиц. Эти выбросы способны подвергать коррозии поверхности КО, химически засорять ОКП, повреждать наиболее уязвимые компоненты КА — оптические поверхности приборов, иллюминаторы, солнечные панели. В течение одного только 1993 г. в космосе работало около 30 твердотопливных ракетных двигателей.

Размеры этих частиц по теоретическим расчётам обычно не превышают 10 мкм. Зато их количество, выбрасываемое за полный цикл работы двигателя, может достигать 10^{20} [253, 5]. Частицы выбрасываются с большой относительной скоростью (до 4 км/с, а в среднем 1,5–3,5 км/с в зависимости от размера частиц) в широком секторе направлений,

76 что существенно сказывается на расширении области их дальнейшего орбитального существования. Некоторую долю выхлопа составляют довольно крупные частицы несгоревшего топлива ТРД и шлака.

Большинство из них быстро входят в атмосферу, другие (более крупные) переходят на эллиптические орбиты. То, что эти частицы представляют вполне определённую опасность для космических аппаратов, становится понятно из рис. 3.1.24, 3.1.25, 3.1.29, 3.1.31 (см. с. 123 и далее), на которых показаны кратеры на иллюминаторах шаттла от ударов таких и подобных им частиц.

Кусочки краски и другого рода покрытий космических аппаратов, отделяющиеся в результате старения поверхности, обычно крупнее частиц окиси алюминия и их размер составляет в среднем сотни микрон. Они имеют гораздо меньшую начальную относительную скорость и первое время остаются на орбитах «родительских» КО.

Между прочим, в наземных испытаниях, проведённых в США в Центре космических полётов имени Джорджа Маршалла (*англ.* George Marshall Space Flight Center — MSFC) и Комплексе инженерных разработок Арнольда (*англ.* Arnold Engineering Development Complex — AEDC), в выхлопах твердотопливного двигателя обнаружено небольшое число хлопьев Al_2O_3 размером более 1 см, которые уже требуют к себе более серьёзного отношения [254]. Это подтверждается и наземными телескопическими наблюдениями, и фиксацией частиц КМ по технологии *in situ* [255].

В НАСА в течение двух лет проводились исследования последствий работы твердотопливных двигателей для космической среды, и по результатам был выпущен технический отчёт [256]. Полученные результаты исследований подтверждают, что во время работы таких двигателей образуется значительное количество окиси алюминия, выбрасываемой из сопла в виде довольно крупных частиц (0,01–5 мм). Эти частицы образуются вследствие быстрого расширения и отвердевания расплавленного Al_2O_3 . Составляя около 0,65 % исходной топливной массы, эти частицы довольно сильно и опасно загрязняют космическую среду. Так что не следует недооценивать и иные, отличные от взрывов и столкновений источники образования КМ [257].

Приведённые в отчёте численные оценки используются сегодня во многих моделях заорённости ОКП в качестве исходных данных.

И все же самая опасная (особенно в перспективе) причина образования КМ — разрушение КО вследствие взрыва, столкновения с другим объектами или «возрастной» деградации поверхности КО под воздействием агрессивной среды (радиация всех видов, перепады температуры, космическая пыль, окисление атомарным кислородом, повреждение мелким КМ и метеороидами и т. п.).

Если сближающиеся КО или взрывоопасный объект неуправляемые, то катастрофу предотвратить нельзя. Образование КМ, сопутствующего миссии КА, можно сократить за счёт более рационального проектирования конструкции КА, использования устойчивых к воздействию среды материалов, хорошо продуманного программирования его запуска и вывода на орбиту, тщательной проработки программы функционального полёта. Что же касается взрывов, столкновений и «возрастной» деградации КО, то нам остаётся только констатировать случившееся и, опираясь на данные обработки наблюдений, корректировать соответствующие модели. Правда, есть один потенциальный, по существу политический рычаг для уменьшения количества разрушений в космосе, но об этом в разд. 4.

Большинство разрушений происходит сейчас случайно, не по воле оператора КА, а из-за столкновений, нештатных процессов в топливных системах РН и КА, аккумуляторных батареях, баллонах со сжатым газом, других бортовых приборах — как правило, после завершения их программного функционирования с потерей управляемости.

Могут быть ещё разрушения смешанного типа — взрыв, спровоцированный столкновением. Собственно, к этому типу могут относиться и разрушения в испытаниях противо-

спутникового оружия, если по программе предусмотрен подрыв противоспутника или кинетический удар вызывает самопроизвольный взрыв на борту цели.

В отличие от фрагментов взрыва, столкновения КО или продуктов работы твердотопливного ракетного двигателя, КМ, образующийся в результате износа, старения и деградации поверхности КО под влиянием агрессивной космической среды, отделяется от «родительского» КО с относительно низкими скоростями и малым разбросом векторов скоростей. При этом образование продуктов старения не носит массового характера, и, как правило, они отделяются поодиночке. В виду перечисленных существенных отличий их орбиты не создают такого эффекта (свойственного разрушениям от взрывов и столкновений), какой мы видим на рис. 3.2.4 (см. с. 135). Очень немногие из образующихся таким образом КО могут быть каталогизированы. Подавляющая масса — очень мелкие частицы. А крупные, если и образуются, имеют большое отношение площади поперечного сечения к массе и довольно быстро прекращают своё орбитальное существование, если образуются в области низких орбит. Типичная чешуйка отслоившейся от поверхности КО краски имеет массу 10^{-6} г.

Эти частицы могут вызвать последующую деградацию поверхности «материнского» или другого КО, при этом сами измельчаясь, могут повредить незащищённые чувствительные компоненты (оптику, иллюминаторы, тросы).

К сожалению, создатели космической техники обычно мало заботятся о сохранении прочности покраски КА и РН после окончания их функционирования. Они просто не выдвигают соответствующего требования. И по окончании миссии КА и РН краска с каждым годом отслаивается все интенсивнее.

Постепенную деградацию поверхности КО могут вызывать и постоянные удары очень мелкого КМ, что приводит к снижению качества функционирования КА или его компонент. Модели такого снижения качества трудно создать, так как оно не всегда напрямую связано с размером физического повреждения или размером ударяющейся частицы. В то же время влияние деградации поверхности КА должно анализироваться очень детально при оценке возможного изменения качества функционирования и космического аппарата в целом, и его отдельных систем и компонент.

Наиболее уязвимые компоненты КА для элементов деградации поверхностей от ударов КМ — оптические поверхности бортовых инструментов. Удары частиц диаметром в десятки и сотни микрометров могут значительно увеличить рассеяние оптикой света [258]. Это особенно нежелательно для оптических средств построения изображения, от которых обычно требуется низкий уровень оптического рассеяния. Удары мелких частиц в трубу телескопа или дефлектор тоже могут приводить к деградации его компонент из-за образования больших пучков мельчайших частиц, которые способны расстроить или ослепить оптические датчики.

Многочисленные мелкие удары в устройство термоконтроля приводят к изменению общей площади поверхности радиатора, потенциально определяющей температурные режимы систем КА, и обнажению их защищённых участков открытому космосу. На LDEF кратерные повреждения удалили всего лишь ~0,26 % наружной (термозащитной) краски. Но фронтальные сколы увеличили общее количество удалённого материала до 5 % от окрашенной площади [259]. Перфорации в термозащитных покрытиях могут также более радикально нарушить систему терморегулирования, обнажая защищаемые компоненты [260, 261].

Удары мелких частиц способны повредить солнечные батареи и соответствующую инфраструктуру внешнего энергопитания КА, что, кстати, происходит довольно часто. В этой части диапазон уязвимости довольно широк: от локальных повреждений стеклянных покрытий и самих солнечных элементов до нарушения последовательной связи отдельных ячеек и наружной кабельной системы вообще, включая и силовые кабели. Удары КМ могут вызывать короткие замыкания или разрывы соединений. Даже очень мелкие частицы могут порождать плазму, которая в свою очередь наносит повреждения солнечным элементам [262].

С начала космической эры всеми космическими державами было осуществлено более 6000 запусков (по данным ЕКА и его операционного центра на январь 2022 г. — 6130, исключая аварийные), в результате чего в ОКП на орбиты было выведено около 12 230 ИСЗ. Из них в космосе остаются 7600 КА, из которых ещё функционируют около 4800 и контролируются наземными и космическими средствами наблюдения. Количество каталогизированного КМ (американской и российской СККП) — порядка 30 380. Количество разрушений, взрывов, столкновений и аномальных событий, приводящих к фрагментации, за весь период освоения космоса до 2021 г. было более 630. Суммарная масса всех КО в ОКП — более 9700 т. Количество КМ в ОКП крупнее 10 см, по оценкам статистических моделей, — 36 500. КМ размером от 1 до 10 см — порядка 1 000 000, а размером от 1 мм до 1 см — 330 000 000. Это всё были оценки ЕКА [263]. Оценки других ведомств с ними расходятся, иногда существенно. Например, в базе данных НАСА ещё в 2014 г. содержались сведения о 280 разрушениях, включая аэродинамические. За период 6–7 лет этот показатель не мог вырасти более чем в два раза. Но в целом, оценки всех ведомств весьма впечатляющие и удручающие.

И американская, и российская СККП ведут динамические каталоги крупных КО. Лишь порядка 5 % последних составляют действующие, т.е. полезные КА. Их сейчас порядка 4800 (по данным ЕКА). Для сравнения, в 1992 г. их было около 400, т.е. наблюдается явный прогресс в освоении космоса. Остальные 95 % — крупный КМ с массой объектов от 300 г до 20 т. Суммарная масса КМ этого класса порядка 10 000 т. На рис. 2.2.1 представлена примерная классификация КО в ОКП.

К 2012 г. на околоземных орбитах штатными средствами наблюдения контролировалось более 21 000 КО, из которых было каталогизировано ~17 500 (в официальном каталоге СККП США на 1 января 2012 г. — 17 147) размером более 10 см, что составило 7,8 % прироста по сравнению с 2010 г. [264, 12]. Из них объектов размером более 1 м около 4500 (по данным модели MASTER-2001, ЕКА).

Официальный (публикуемый в интернете) каталог СККП США на ноябрь 2022 г. содержал 25 857 каталогизированных КО, из них 9803 составляет полезный груз, 16 054 — корпуса РН и обломки [265]. Небольшая разница в приводимых объёмах каталогов КО объясняется, во-первых, разными источниками, во-вторых, различными эпохами привязки каталогов, в-третьих, нарастающей солнечной активностью, ускоряющей вход КО в плотные слои атмосферы и их последующее сгорание (очередной максимум активности пришёл на 2013 г., а следующий ожидается в 2024 г.).

В США ведётся также каталог, содержащий более 100 000 КО. Но в него входят и более мелкие КО. Для сравнения в 2006 г. в каталоге СККП США было 9000 КО общей массой 5 000 000 кг [266]. Данные на август 2022 г. см. выше. При этом суммарная орбитальная масса составляла порядка 10 000 000 кг.

Для сравнения с данными ЕКА на соответствующий период приведём их же количественные оценки околоземных популяций КО размером более 5 см [267]:

- НОКО ($H_a < 2000$ км) — 21 484;
- КО на средневисоких орбитах (среднее движение более 1,5 и менее 2,5 вит/сут) — 1392;
- КО на геосинхронных орбитах ($H_p > 34 000$ км, $H_a < 38 000$ км) — 7964;
- КО на прочих орбитах — 12 773;
- Всего КО размером более 5 см — 43 837.

Эти данные также используются как исходные для моделирования засорённости ОКП, проводимого в ЕКА.

Кроме этих, в основном, каталогизированных и регулярно наблюдаемых КО, в ОКП находится огромное количество мелких (но от этого не менее опасных), как правило, не видимых радиолокационными и оптическими средствами частиц — порядка 500 000 размером 1–10 см (модель MASTER-2001, ЕКА), десятки и возможно сотни миллионов частиц размером 0,1–1 см.

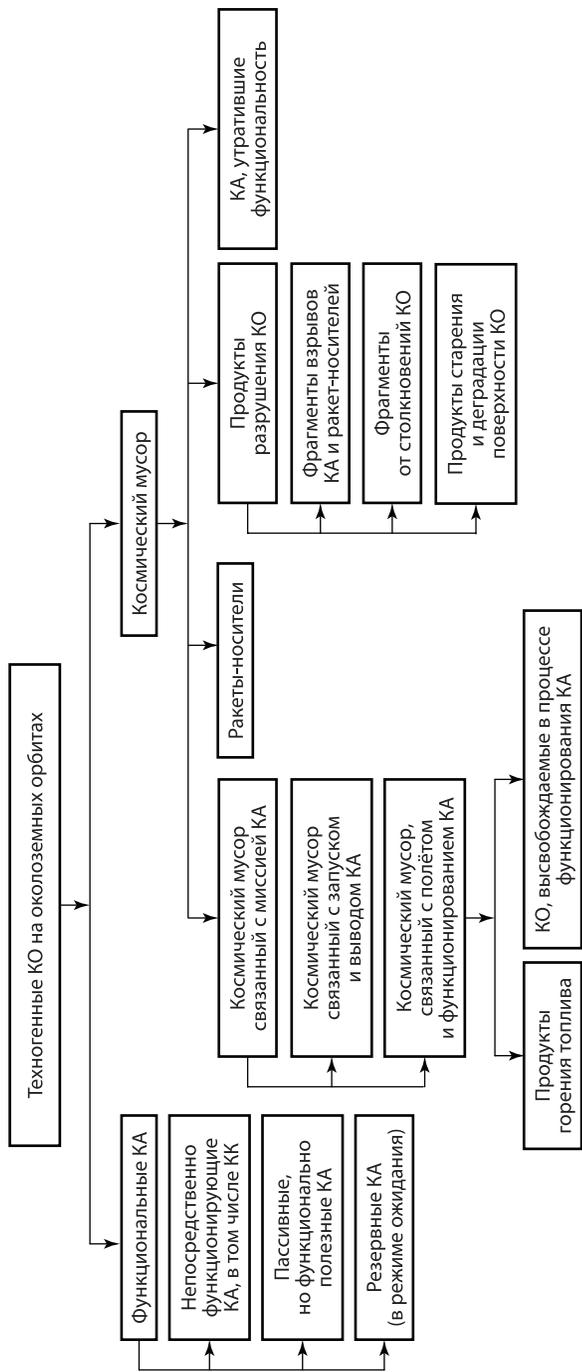
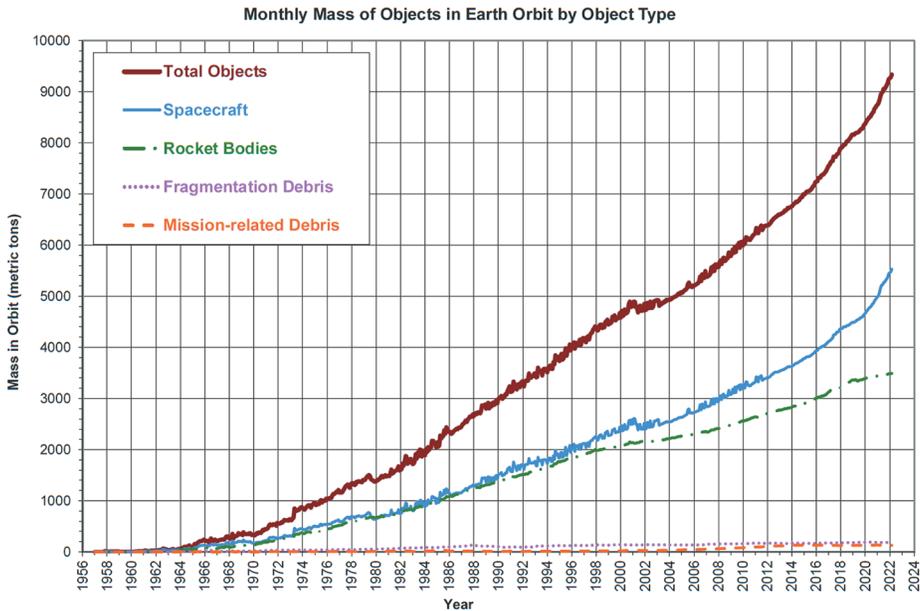
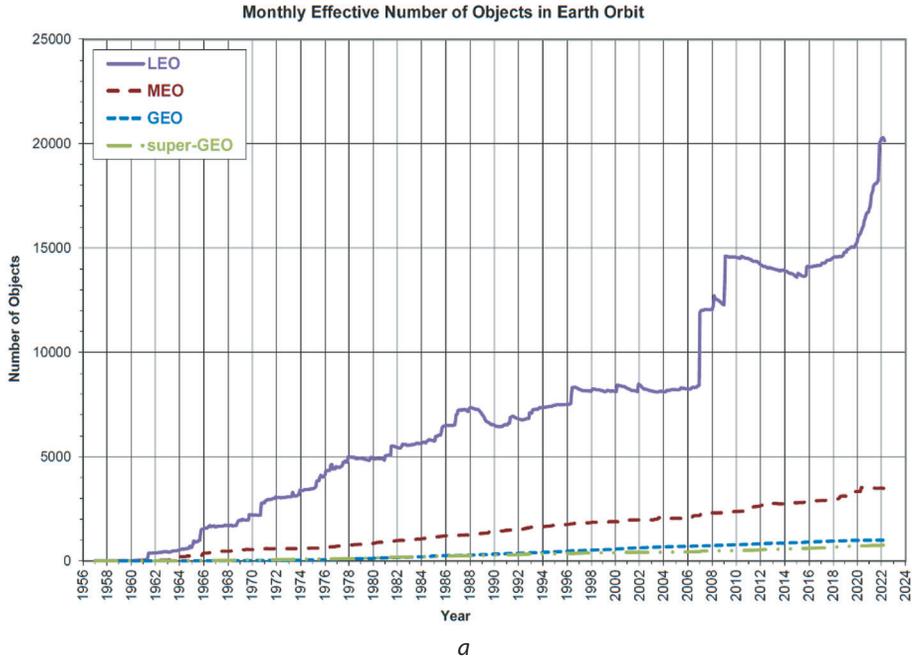


Рис. 2.2.1. Классификация космических объектов (в ОКП)

80 Количество более мелких частиц в ОКП исчисляется уже миллиардами и триллионами [268, 8]. Известны расчётные теоретические данные, указывающие на то, что популяция КО размером от 5 мм до 1 см составляет около 80 % от общей популяции орбитально-го мусора размером более 5 мм [269]. С этой «мелочью» приходится считаться, так как опасность её определяется не столько размерами, сколько скоростью и количеством.



Monthly Mass of Objects in Earth Orbit by Object Type as of 3 May 2022. This chart displays the mass of all objects in Earth orbit officially cataloged by the U.S. Space Surveillance Network.

Рис. 2.2.2. История изменения количества КО в ОКП по 2022 г. (а). История изменения массы КО в ОКП по 2022 г. (б) [270, 479]

Результаты исследований специалистов России, США, Франции, Германии, Японии свидетельствуют о прогрессивном характере процесса засорения космоса. В настоящее время наиболее засорены высоты 800, 1000 и 1500 км и, с учётом её малой рабочей ёмкости, геостационарная орбита. Причём это орбиты, наиболее интенсивно используемые для размещения функциональных КА. (Это не тавтология, так как на орбитах (захоронения) размещают и отработавшие КА.) Однако в последние годы это распределение начинает существенно меняться в связи с развёртыванием гигантских космических систем Spacelink, OneWeb. Это очень наглядно иллюстрируется рис. 2.3.11 (см. с. 92).

Изменение состояния техногенной засорённости ОКП с самого начала космической эры и до настоящего времени (в части крупных каталогизированных КО) иллюстрируется рис. 2.2.2 [270, 479]. Диаграмма построена по данным каталога КО СККП США на август 2022 г. Первый резкий скачок в количестве обнаруженных и каталогизированных КО, приходящийся на 2007 г., вызван взрывом китайского КА «Фенгюнь». Второй скачок — следствие разрушения КА «Иридиум-33» и «Космос-2251» в результате их столкновения в 2009 г. Ну и третий скачок отражает прирост количества КО после разрушения КА «Космос-1408» в ноябре 2021 г. На этих рисунках кривая 1 (сверху) представляет общее количество КО в каталоге, кривая 2 — количество фрагментов, образовавшихся в результате взрывов и других разрушений, кривая 3 — количество КА и КК (как действующих, так и прекративших активное существование), кривая 4 — КМ, сопутствующий запускам и функционированию КА, кривая 5 — количество ракет-носителей.

На рис. 2.2.3–2.2.6 [106] наглядно в разных масштабах и ракурсах представлена общая визуальная картина современного техногенного засорения ОКП, построенная на основе реальных данных каталога КО СККП США. Рисунок 2.2.6 [271] демонстрирует явный «прогресс» в засорении ОКП за 30 лет с 1981 г. по 2011 г. Вряд ли эти рисунки требуют комментариев. Мало того, тот КМ, который изображён на этих рисунках, это лишь очень скромная надводная часть «айсберга». Динамику дальнейшего засорения ОКП количественно и по массе иллюстрируют рис. 2.2.2.

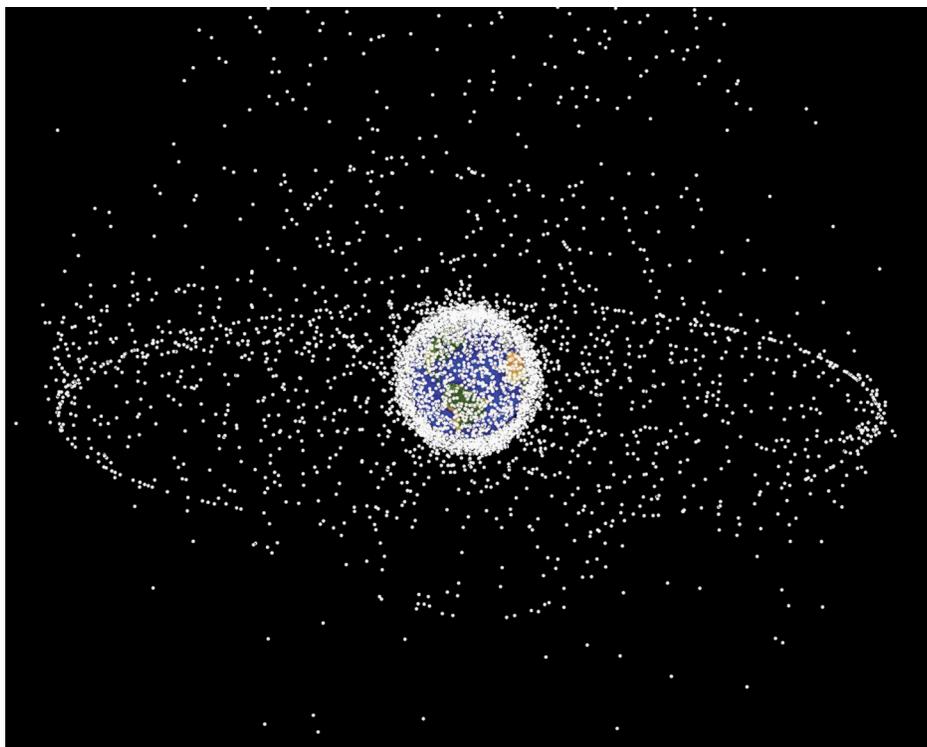


Рис. 2.2.3. Каталогизированные космические объекты

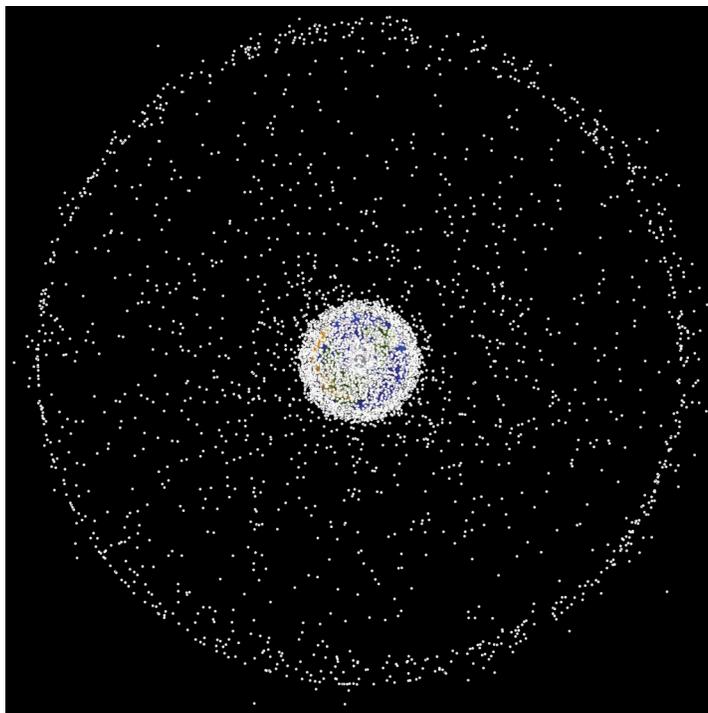


Рис. 2.2.4. Космические объекты вместе с геостационарным кольцом. Вид с Северного полюса

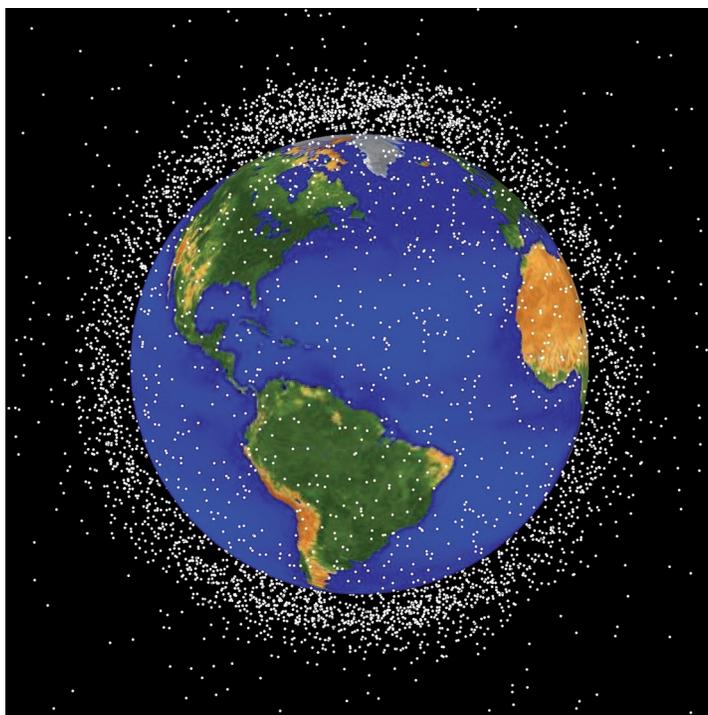


Рис. 2.2.5. «Срез» каталога КО на фоне Земли

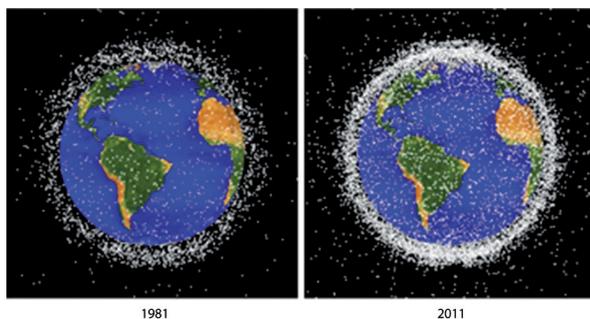


Рис. 2.2.6. «Срезы» каталогов с интервалом 30 лет

На рис. 2.2.1 (см. с. 79) была представлена примерная классификация техногенных космических объектов в околоземном пространстве. Здесь дадим её краткий обзор.

К функциональным КА, в соответствии с данным во введении определением космического аппарата, будем относить:

- 1) автоматические КА, управляемые с Земли и имеющие определённое, как правило, узкое целевое назначение, и пилотируемые космические корабли;
- 2) временно не функционирующие в данный момент времени резервные КА, находящиеся на орбитах в режиме ожидания;
- 3) пассивные, но функционально полезные КО, например, калибровочные сферы или диполи типа «Пион», ODERACS, орбитальные платформы с уголковыми отражателями и другими настроечными или эталонными устройствами типа «Блиц» и т. п.

Из-за включения последнего типа КО в эту категорию точнее было бы её назвать «функциональные» КО (а не КА). Они составляют приблизительно 1/4–1/5 от общего числа КА, находящихся на орбитах (количество тех и других постоянно меняется вследствие запуска новых ИСЗ, схода с орбит некоторых ИСЗ, завершения функционирования действующих, разрушения, перехода каких-то из одной категории в другую и т. п.), и всего лишь порядка 5 % от общего числа каталогизированных КО (к 2021 г. их было более 2000).

Функциональные КО отличаются большим разнообразием конструкций, размеров, форм, покрытий (определяющих отражательные свойства КО), орбит функционирования (консервации или ожидания, если это резервные КА) и конечно же назначения. Последнее определяет всё остальное.

Значительно более обширную популяцию (приблизительно в 4–5 раз), чем функциональные КО, составляют КА, утратившие функциональность (вследствие какой-либо неисправности, полного расхода рабочего ресурса или разрушения).

Таким образом, действующие КА со временем пополняют популяцию КМ. На 5 января 2011 г. общее количество крупных КО (как функциональных, так и нефункциональных КА), каталогизированное СККП США, составляло 3380 [272, 273], к началу 2023 г. каталог СККП США содержал уже 25 857 КО [487]. Некоторые расхождения в количестве каталогизированных КА могут объясняться тем, что в публикуемые и обмениваемые каталоги КО СККП США и НАСА не включают КА военного назначения.

КА сильно разнятся своими размерами и массой. С одной стороны, это многотонные конструкции, такие как МКС (440 т), ОС «Мир» (135 т), «Салют-7» (43 т).

С другой стороны, в конструировании космической техники давно уже наметилась тенденция к миниатюризации. Например, в 2006 г. США был запущен, а в августе 2010 г. вошёл в плотные слои атмосферы 5-килограммовый наноспутник GeneSat-1 с размерами 10×10×35 см. Он предназначался для изучения влияния микрогравитации на биологические культуры и успешно выполнил свою миссию (рис. 2.2.7) [274].

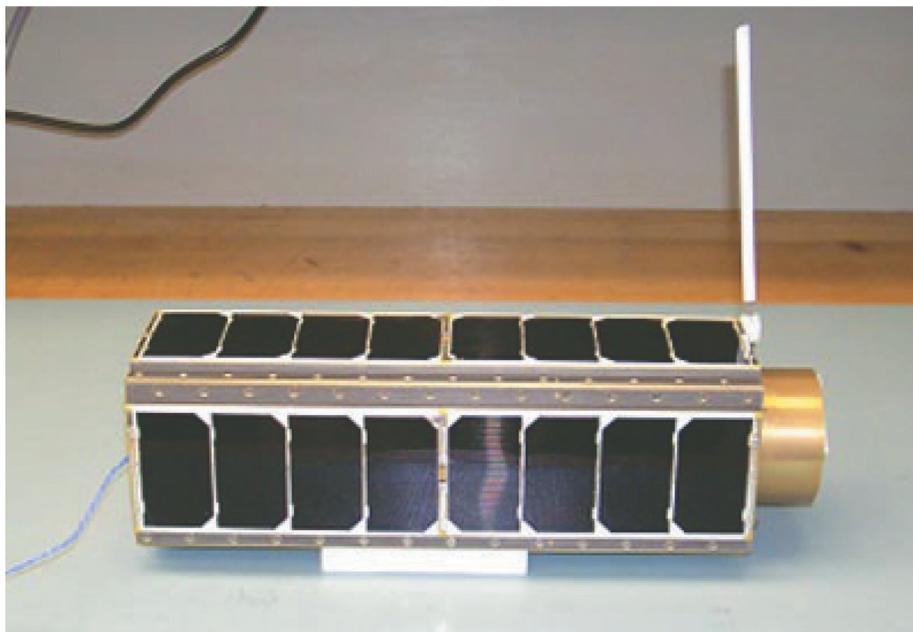


Рис. 2.2.7. Наноспутник GeneSat-1

И это не самый маленький из ИСЗ. В сентябре 2009 г. Швейцария запустила свой первый ИСЗ с помощью PH Polar Express с индийского полигона. Этот наноспутник под названием «Швейцарский кубик», изготовленный в Федеральной политехнической школе в Лозанне (*фр.* École polytechnique fédérale de Lausanne) и предназначенный для изучения ночного атмосферного свечения, имеет массу 820 г [8].

10 мая 2012 г. на солнечно-синхронную орбиту был запущен китайский спутник-разведчик «Яоань Вейсин-14» (*англ.* Yaogan Weixing), а через минуту после вывода на орбиту с его борта отделился попутный военно-исследовательский наноспутник «Тяньто-1» массой 9,3 кг. Это параллелепипед с размерами 425×410×80 мм [275].

В мае 2012 г. при запуске японского и корейского спутников попутно с борта японского GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission) были выведены два малых японских КА — SDS-4 (*англ.* Space Debris Sensor) (массой около 50 кг и размерами 50×50×50 см) и Horyu-2 (массой 7,1 кг и размерами 35×31×31,5 см) [276].

Здесь уже говорилось о тенденции к миниатюризации космической техники в последние годы во всём мире. Smallsats — ИСЗ массой менее 500 кг. Они подразделяются по массе (по убыванию) на мини-, микро-, нано- и пикоспутники. Их популярность возрастает: большая дешевизна их запуска достигается возложением этой функции на другие выводимые на орбиту более крупные ИСЗ в качестве попутной функции [277]. В 2013 г. стоимость самого дешёвого кубсата (CubeSat) (формата 7,5 см) была 50 дол.

К настоящему времени микроспутники есть у США, России, ЕКА, Японии, Китая, Германии, Франции, Израиля, Великобритании, Индии, Канады, Швейцарии, Турции и других государств. В разд. 1 уже отмечалось, что в США даже разрабатывается специальная параллельная микро-СККП космического базирования, состоящая из наноспутников Angels.

В 2013 и 2014 гг. наблюдался всплеск запусков малоразмерных ИСЗ (кубсатов) и крупных космических систем, продолжение которого ожидается также в ближайшем будущем, что заметно повлияет на изменение среды КМ. В последние годы на орбиты выведен 231 ИСЗ подобного формата (стандарт 1U — это кубик со стороной 10 см и массой

примерно 1 кг) и ещё 44 потеряно при неудачных запусках. Обычно кубсаты варьируют в диапазоне от 0,5U (это, так называемый «карманный» размер 1Q — 5 см) до 27U. Кубсаты могут также попутно выводить и более мелкие ИСЗ. Кубсаты выводятся также с борта МКС и с КА, посещающих МКС. На рис. 2.2.8 показано итоговое количество запусков кубсатов различных категорий по годам. Виден существенный рост количества запусков таких малоразмерных ИСЗ с 2013 г. В 2013 г. состоялось 77 запусков, в 2014 — 35, причём 33 с борта МКС, а остальные с кораблей-посетителей МКС. Наиболее популярны запуски кубсатов размером 10 и 30 см.

Классификация кубсатов по размерам примерно такая:

- 1U: 10×10×11,35 см.
- 2U: 10×10×22,70 см.
- 6U: 20×10×34,05 см.
- 12U: 20×20×34,05 см.

Распределение запусков кубсатов по различным странам показано на рис. 2.2.9.

К категории крупных КО (обычно более крупных, чем функциональные) относятся ракеты-носители. Одна-две ступени (иногда больше — три-четыре) РН выводят на орбиту полезную нагрузку, т.е. КО предыдущей категории. Если после вывода НОКО на орбите остаётся лишь одна ступень, то после запуска ВОКО на орбитах могут остаться и три ступени. Самые крупные первые ступени РН обычно вскоре возвращаются в атмосферу и либо сгорают, либо их крупные обломки падают на Землю, тогда как последние ступени могут долго находиться на орбитах.

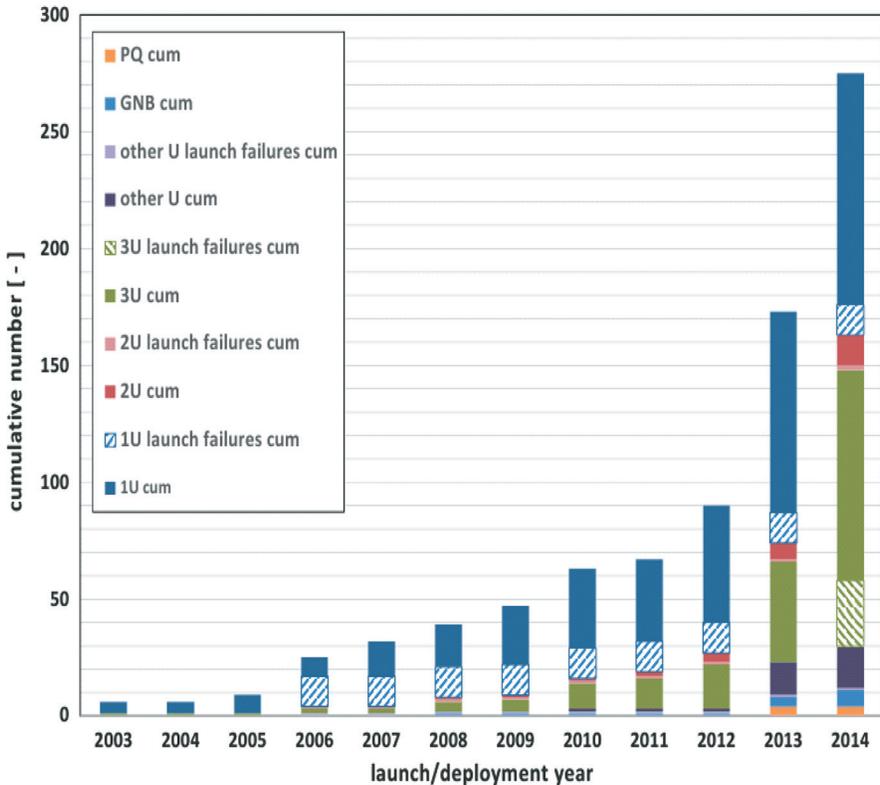


Рис. 2.2.8. Динамика запусков кубсатов (включая неудачные) категорий 0,5U, 1U — 3U, 2/5U, 6U и др. Устойчивый их рост наблюдается в 2006–2012 гг. и скачки с 90 до 173 в 2013 г. и затем до 275 в 2014 г.

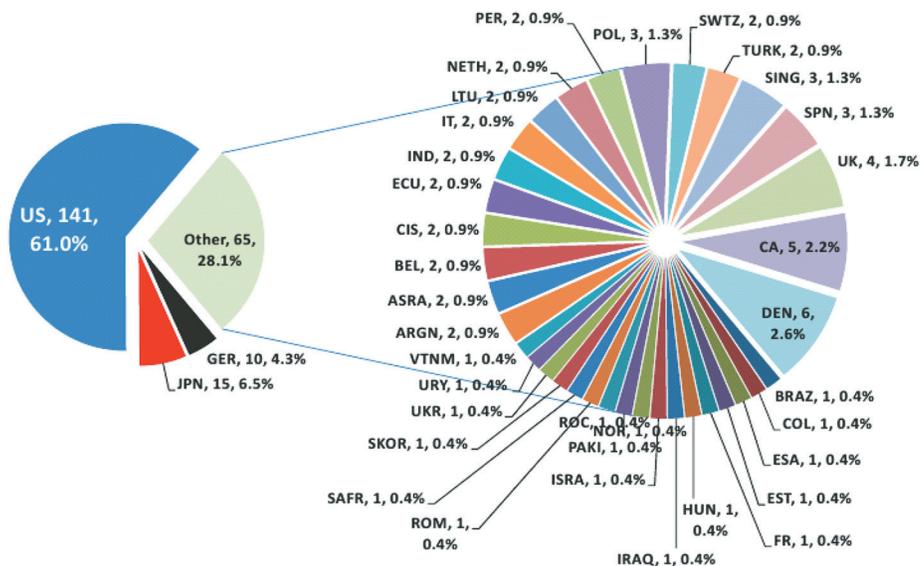


Рис. 2.2.9. Распределение запусков кубсатов по странам. У США 141 запуск (61 %) у Японии 15 запусков (6,5 %), далее идёт Германия с 10 запусками (4.3 %). Оставшиеся 65 запусков (28,1 %) представлены другими странами [481]

В процессе запуска, вывода на орбиту, активации и функционирования КА высвобождается множество временных и вспомогательных технологических приделков, уже сыгравших свою роль и более не нужных для дальнейшего активного существования КА. Это заглушки, крышки для линз, временный крепёж, пиротехника, взрывные болты, защитное покрытие кабелей и другого полезного груза, элементы арматуры, страховочные стяжки (крепления безопасности) солнечных панелей и других раскрывающихся в космосе элементов конструкции и т. п.

Во время пилотируемого полёта КК на борту накапливается всякого рода мусор, в том числе и продукты жизнедеятельности экипажа. Всё это, во всяком случае, раньше выбрасывалось в открытый космос. Например, со станции «Мир» просто выбрасывали помойные ведра. Сейчас с Международной космической станции уже ничего не выбрасывают. И если в последнее время к этому стали относиться более ответственно (контейнеры с бортовым мусором стали возвращать на Землю), то космонавты, работая в открытом космосе, бывает, теряют или роняют инструменты, перчатки и даже целые сумки с инструментами, пополняя популяцию КМ.

Довольно много операционных отходов образуется в процессе активного полёта КА. В течение первых восьми лет активного существования орбитальной станции «Мир» от неё было отделено более 200 только крупных элементов, которые удалось обнаружить наземными наблюдательными средствами и каталогизировать [5, 8]. Опять-таки это только видимая и зарегистрированная часть «айсберга».

Значительную популяцию, широко распределённую в ОКП, представляют фрагменты разрушений КО в результате взрывов и столкновений. В неё сейчас (после драматических событий 2007 и 2009 гг.) входит около 60 % каталогизированных КО и, возможно, бо́льшая доля не каталогизированных. Эта популяция охватывает широкий диапазон размеров. При разрушении, особенно при столкновении, образуется, кроме крупных обломков и осколков, очень много мелкого КМ, количество которого, конечно, подсчитать не удаётся.

Несмотря на то, что фрагменты разрушений количественно превосходят все типы КМ, на цельные (ещё не разрушенные) КА и РН приходится наибольшая доля суммарной

площади поперечного сечения и массы КМ, т.е. для перспективы дальнейшего засорения ОКП это наиболее опасные КО, так как потенциальные столкновения с ними имеют наибольшую вероятность. Последствия таких столкновений не идут ни в какое сравнение со всеми остальными: образуется гигантское количество обломков и осколков самых различных размеров и масс, постепенно охватывающих широкий непрерывно расширяющийся спектр орбит. Причём большое количество крупных обломков способно к дальнейшим катастрофическим столкновениям. Иными словами, отработавшие КА и РН, особенно на высоких орбитах, сильно увеличивают долгосрочный потенциал будущих столкновений. Мерой их опасности служит их суммарная кинетическая энергия (точнее, пропорциональная ей величина).

Вообще говоря, с одной стороны, чем больше суммарная площадь поперечного (вектору набегающего потока КМ) сечения некоторой популяции КМ, тем больше вероятность столкновений представителей этой популяции в ОКП. Но, с другой стороны, сечение большой площади является хорошим фильтром (уловителем, очистителем) для самого мелкого мусора. Разумеется, при условии, что столкновение с ним не образует нового КМ. К сожалению, последнее опасение вполне реально с учётом возможных огромных скоростей столкновений. Этот вопрос требует более углублённого изучения.

КА может взорваться и в процессе функционирования, и по завершении активного существования. Причины самые разнообразные. Это и взрывы баков с компонентами топлива и баллонов со сжатым газом, и неполадки непосредственно в двигателе, и повреждение баков мелкими элементами КМ, и короткое замыкание батарей аккумуляторов, и случайно возникающие высокие угловые скорости вращения КА, и прочие нарушения в структурах и компонентах, а также намеренные подрывы. Взрывы РН по большей части обусловлены наличием остатков горючего и окислителя в баках после выполнения ими своей миссии. Непосредственно взрыв происходит в результате неконтролируемого смешивания горючего и окислителя либо под воздействием физических факторов (повышенное давление, например, из-за перегрева бака или неисправности клапана сброса давления).

На рис. 2.2.10 показано распределение каталогизированных КО по различным государствам и группам государств по состоянию на 6 июля 2011 г. Диаграмма построена по данным каталога КО СККП США [272, 273]. Общее количество каталогизированных КО на эту дату составляло 16094, 95 % которого — космический мусор. В последующий период наблюдался существенный рост количества запусков, что отражено на графике рис. 2.2.11, где также показано соотношение удачных и неудачных запусков.

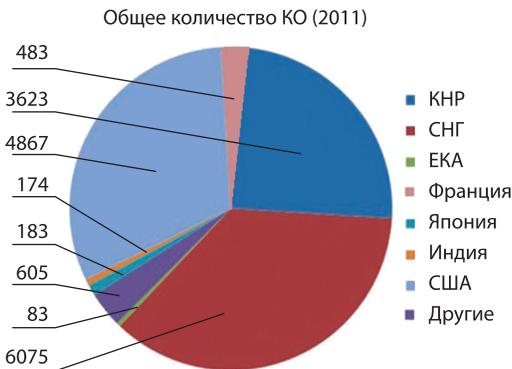


Рис. 2.2.10. КО, принадлежащие различным странам

Есть ещё одна категория КМ, о которой говорилось выше — продукты деградации, старения поверхности КО под действием агрессивной окружающей среды. Размер таких фрагментов может значительно колебаться. Это могут быть и мельчайшие частицы краски, абляционного покрытия, используемых для терморегуляции КА и РН, постепенно отслаивающиеся под воздействием атмосферы (даже сильно разреженной), солнечной

радиации, ударов пылинок КМ. Отваливаются и относительно крупные элементы — плитки термозащитного слоя, фрагменты бронезащитных щитов, солнечных панелей, которые могут наблюдаться и наземными средствами. Например, в 1993 г. с поверхности действующего ИСЗ COBE (англ. Cosmic Background Explorer) отделилось более 40 объектов, обнаруженных и сопровождавшихся средствами американской СККП. Скорее всего, это были сегменты термозащитного одеяла, оторвавшиеся в результате температурных перепадов [5].

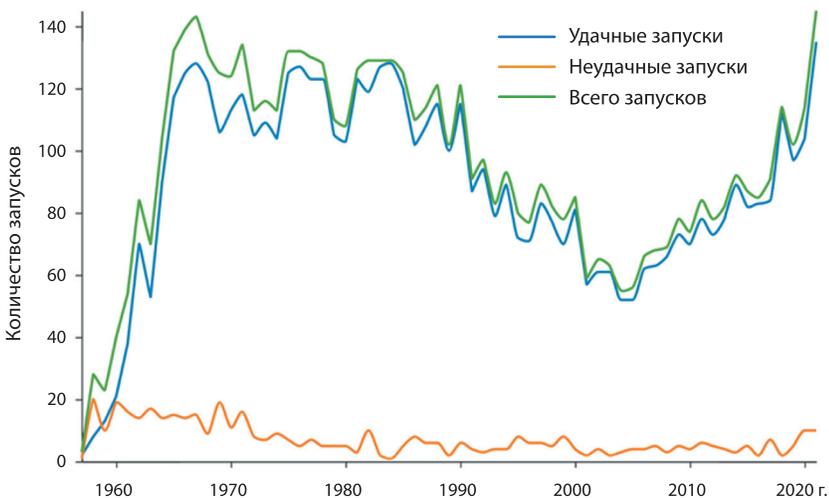


Рис. 2.2.11. Общее количество запусков по годам

2. В заключение на основе анализа всей доступной информации о засорённости ОКП можно сделать следующий обобщающий вывод (так сказать, ещё одна попытка классификации), который может оказаться полезным при построении моделей прогноза засорённости ОКП.

Состав и количество КМ постоянно изменяется. Можно выделить три его составляющие: компонента А — это короткоживущая популяция, обращающаяся близко к плотным слоям атмосферы, которую ожидает сгорание в атмосфере в ближайшее время; компонента Б — долгоживущая популяция, т.е. КМ на значительных высотах, которая очень нескоро достигнет плотных слоёв атмосферы; наконец, компонента В — новообразования в общей популяции КМ, т.е. «молодой» КМ, образующийся в результате текущих запусков ИСЗ, взрывов и столкновений КО, деградации их поверхности и т.п. Компонента В (точнее, мета-компонента) — источник постоянного пополнения компонента А и Б. За счёт сокращения компоненты А происходит некоторое очищение ОКП от мусора, однако её убывание не компенсирует роста общей популяции за счёт компоненты В и пополнения самой А. В среднем 2–3 каталогизированных КО ежедневно входят в плотные слои атмосферы и, как правило, сгорают. Но темп появления новых КО из различных источников заметно выше. Последнее очень хорошо видно из рис. 2.2.2 (см. с. 80) и подтверждается сделанным моделью НАСА LEGEND [278] прогнозом на ближайшие 100 и 200 лет роста количества столкновений крупных КО (размером более 10 см) в области низких орбит (рис. 2.4.1 и 2.4.2, см. с. 98).

2.3. Распределение космического мусора разных типов по различным параметрам

В настоящее время КМ разных типов (как и действующие КА) распределён в ОКП крайне неравномерно. Даже в сравнительно населённом полусинхронном поясе и на ГЕО средняя плотность только каталогизированных КО в 100 раз ниже, чем в низкоорбитальной

области. В других высокоорбитальных областях плотность в 1000 раз ниже. Судя по данным радара «Хейстек» о корреляции распределения среднеразмерного и крупного КМ, можно предполагать, что средняя пространственная плотность среднеразмерного КМ если не в той же пропорции, то значительно ниже на высоких орбитах, чем на низких. Для геостационарной области плотность КО быстро падает с удалением от ГЕО. Плотность потока КО уменьшается почти в 10 раз при удалении от ГЕО на 50 км и примерно в 100 раз при удалении на 500 км.

Вследствие относительной скудности собранных измерительных данных, значительной, сложной и часто непредсказуемой динамики образования и распространения различных потоков КМ любые оценки общей популяции КМ (в том числе и касающиеся распределения КМ) не отличаются высокой достоверностью и быстро стареют. С достаточной определённой можно говорить только о распределениях крупного КМ, так как он в значительной степени каталогизирован и по нему накоплено много фактических данных (как в части координатной, так и некоординатной информации). Ниже приводятся гистограммы распределения КО по данным каталога КО на 2010 г. по их орбитальным параметрам (рис. 2.3.1–2.3.4).

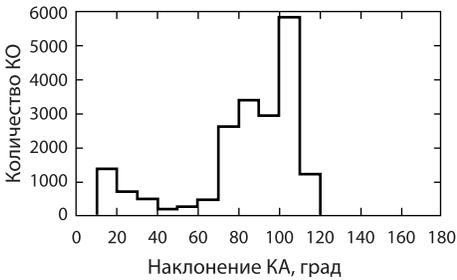


Рис. 2.3.1. Распределение КО по наклону. Общее количество КО — 19 377

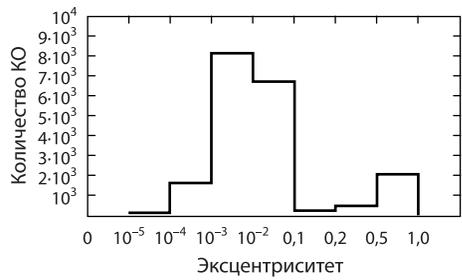


Рис. 2.3.2. Распределение КО по эксцентриситету. Общее количество КО — 19 377

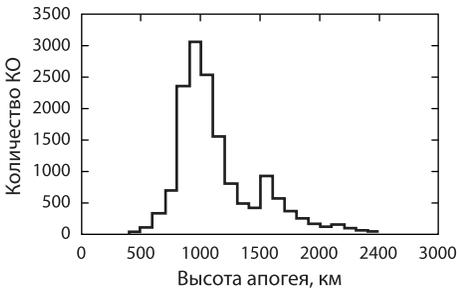


Рис. 2.3.3. Распределение КО по высоте апогея (в диапазоне высот 100–3000 км). Общее количество КО — 19 377

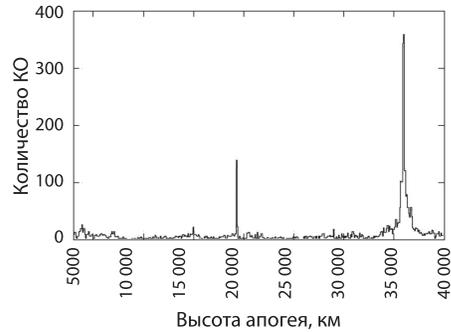


Рис. 2.3.4. Распределение КО по высоте апогея в диапазоне высот (3 000–40 000 км). Общее количество КО — 19 377

Интересно сравнить, как изменяются распределения КМ со временем. Довольно полное и подробное сравнение распределения каталогизированных КО по различным орбитальным параметрам за относительно протяжённый период времени и сравнительный анализ каталогов КО СККП России и США даётся в публикациях [279, 280]. Здесь мы приведём обновлённые сравнительные данные для каталогов КО за 1999 и за 2010 гг. Гистограммы на рис. 2.3.5–2.3.7 наглядно иллюстрируют изменение распределения КО по высоте и наклону орбит за 11 лет. Здесь и без комментариев ясно: значительный прогресс засорённости ОКП налицо. Кривые распределения 2010 г. практически абсолютно мажорируют кривые распределения 1999 г. Исключение составляют лишь незначительные участки на рис. 2.3.6 (для орбит в диапазоне 3 000–40 000 км).

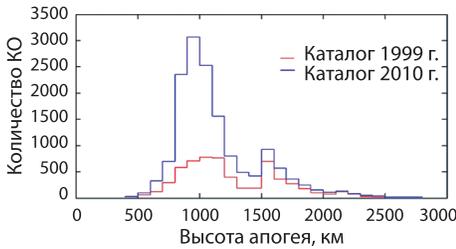


Рис. 2.3.5. Сравнение распределения каталогизированных КО в диапазоне высот 100–3000 км по высоте апогея орбиты

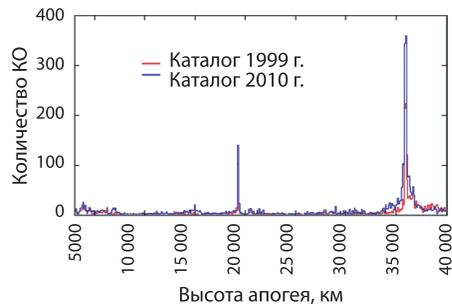


Рис. 2.3.6. Сравнение распределения каталогизированных КО в диапазоне высот 3 000–40 000 км по высоте апогея орбиты

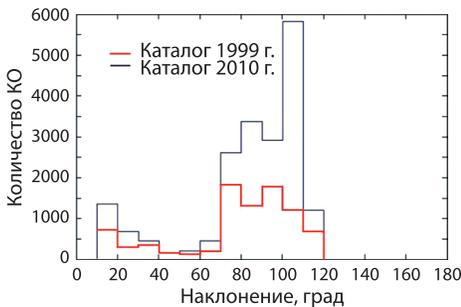


Рис. 2.3.7. Сравнение распределения каталогизированных КО по наклону

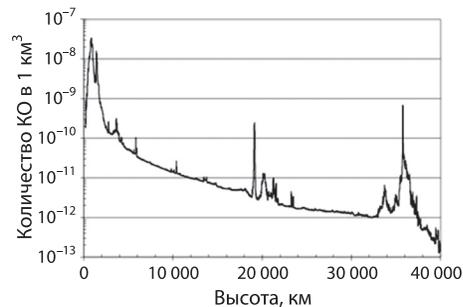


Рис. 2.3.8. Распределение по высоте пространственной плотности каталогизированных КО (данные US Aerospace Corporation)

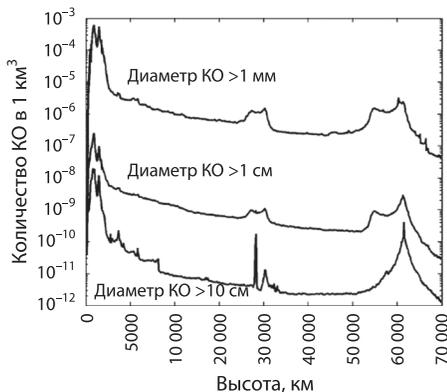


Рис. 2.3.9. Распределения пространственной плотности КО различных размеров по высоте

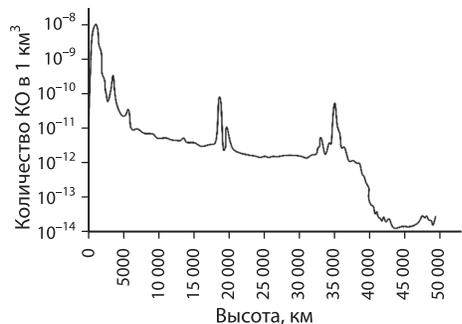


Рис. 2.3.10. Распределение по высоте пространственной плотности каталогизированных КО (данные корпорации Kaman Sciences)

Распределение по высоте пространственной плотности каталогизированных КО приведено на рис. 2.3.8 [281].

На рис. 2.3.9 [128] показано распределение КО по высоте орбит для трёх категорий размеров КО: 1) крупные КО — более 10 см, 2) среднеразмерный КО — от 1 до 10 см, 3) мелкий — от 1 мм до 1 см. Эти распределения из двух различных источников довольно хорошо согласуются между собой, особенно в области высот ниже 25 000 км.

Есть ещё одна кривая (это уже третий источник) для аналогичного распределения [5], предоставленная корпорацией Kaman Sciences (рис. 2.3.10). Она по своему характеру ближе к кривой из US Aerospace Corporation (см. рис. 2.3.8).

При анализе распределений по высотам КМ различных размеров, представленных на рис. 2.3.9, первое, что бросается в глаза — это явная корреляция распределений всех трёх категорий КМ. Эту корреляцию можно объяснить, по крайней мере, следующими двумя причинами.

Первая — мелкий КМ образуется, как правило, в результате разрушения крупных КО, и поэтому сохраняет в некоторой степени и, по крайней мере, в первое время после разрушения орбитальные параметры «родительских» КО.

Вторая — нижнее (базовое) распределение построено на основе каталогизированных регулярно наблюдаемых КО, т.е. наиболее достоверно. Два верхних распределения (для более мелких КО) рассчитаны с помощью моделей, использующих первое как исходное, опорное и, конечно же, сильно повлиявшее на моделирование двух других распределений. Кроме того, были учтены выборочные эпизодические наблюдения мелкого КМ с недостаточной представительностью. Таким образом, верхние два распределения получены с помощью аппарата модельной экстраполяции, причём под влиянием целого ряда допущений (иными словами, домыслов), обычно заменяющих недостающую реальную измерительную информацию. Эти допущения, естественно, выбирались с оглядкой на единственную достоверную информацию, представленную базовой, нижней кривой. Это второй возможный источник корреляции.

Однако, несмотря на корреляцию, два верхних распределения имеют значительно более размытые (по сравнению с нижним) экстремумы. Это, скорее всего, объясняется тем, что после разрушения крупных КО (а больше разрушений происходит в районе максимумов, т.е. уплотнений популяции КМ) орбиты образовавшихся мелких фрагментов вследствие большого разброса начальных векторов скоростей имеют также большой разброс параметров, часто сильно отличающихся от параметров «материнской» орбиты. Мажорирующий тороид, охватывающий орбиты фрагментов, со временем будет расширяться (см. рис. 3.2.4, см. с. 135). Соответственно, со временем станут ещё больше расплываться и области максимумов распределений.

Анализ распределения КМ по различным орбитальным параметрам приводит к следующим выводам.

Крупный КМ достаточно хорошо описан в каталогах КО обеих СККП и в архивах результатов независимых от СККП наблюдений, поэтому о его распределении можно судить с наибольшей достоверностью. Общая картина пространственного распределения крупного КМ наглядно и с высокой достоверностью характеризуется рис. 2.2.4–2.2.6 (см. с. 82, 83), представляющими собой временные срезы реального каталога в разных ракурсах.

Из гистограмм, изображённых на рис. 2.3.3 и 2.3.4 (см. с. 81, 82), следует, что явная концентрация КМ наблюдается на высотах ниже 2000 км, на 20 000 км и в геостационарном кольце. Причём ниже 2000 км распределение очень неравномерное: явные максимумы плотности наблюдаются на высотах от 900 до 1000 км и от 1400 до 1500 км.

Значительной плотностью засорённости характеризуются также высоты от 700 до 900 км, от 1000 до 1200 км и от 1500 до 1600 км. Однако после завершения развёртывания КС Starlink и OneWeb эта картина существенно изменится и уже изменяется (рис. 2.3.11). Что касается состава КМ, то на этих высотах обращаются в основном осколки разрушений между 2 000 и 18 000 км — сопутствующий выводу и функционированию КМ, а выше — отработавшие КА, РН и их крупные фрагменты.

Из рис. 2.3.1 (см. с. 89) видно, что большинство орбит, кроме ГЕО, имеет сравнительно большое наклонение. Различие в наклонении орбит приводит к асимметричному распределению КО по широте. Например, орбиты с низкими наклонениями как бы «оттягивают» на себя КО из довольно переполненных высокоширотных областей.

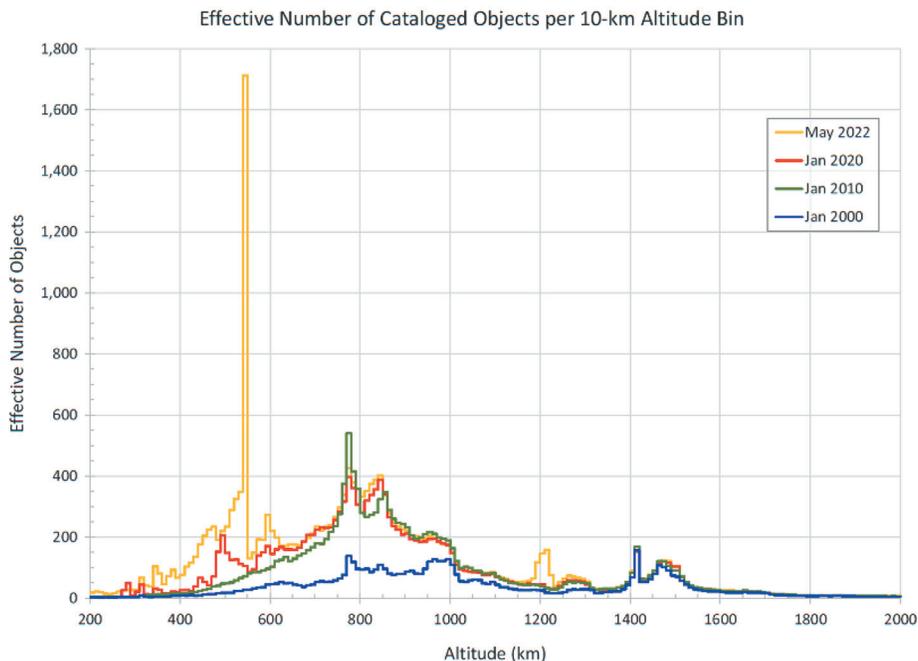


Рис. 2.3.11. Сравнение распределения каталогизированных КО по высотам в разные эпохи с учётом развёртывания новых космических систем [479]

Строго полярных орбит мало, поэтому над полюсами Земли плотность КО низка. Некоторое повышение плотности КО наблюдается на наклонениях 63–65°. Эту нишу заполняют высокоэллиптические орбиты аппаратов типа «Молния» и сопутствующий им КМ. Полусинхронные орбиты поделены между Россией и США следующим образом: орбиты американских КА имеют наклонение 55°, а российских — 65°.

Самая переполненная орбита — ГЕО. Для сохранения выделенной КА долготы точки его стояния (если он функционирующий) осуществляются периодические коррекции орбиты, которые также поддерживают значение наклонения орбиты близким к нулю. Если этого не делать, то случится то же, что происходит с отработавшими (пассивными) КА (не переведёнными на орбиту захоронения) или с фрагментами их разрушения или сопутствующим КМ. Орбитальная плоскость таких КО под воздействием несферичности Земли и возмущения от Луны и Солнца будет совершать колебания относительно плоскости Лапласа (наклонённой к экватору на 7,3°) с амплитудой около 15° и периодом 53 года [282, 283].

Кроме того, ввиду эллиптичности земного экватора пассивные КО на ГЕО подвержены дрейфу вдоль этой орбиты и колебаниям относительно ближайшей стабильной точки (либо 75° в.д., либо 105° з.д.) с периодом два года. Под действием всех этих факторов КМ в геостационарном кольце имеет значительный разброс наклонения орбит ($\pm 15^\circ$ и даже больше из-за разброса начальных скоростей осколков разрушения) и долготы пересечения их с экваториальной плоскостью.

Приведённые распределения крупных КО по параметрам орбит уже заметно изменяются в результате происходящего размещения гигантской КС Starlink компанией SpaceX (см. подразд. 2.4) и КС OneWeb. Особенно заметное перераспределение плотности произойдёт по его завершении, да и после завершения в процессе функционирования КС с учётом характерной процедуры вывода новых КА и замещения вышедших из строя.

На рис. 2.3.11 сравниваются распределения каталогизированных КО по высотам в разные эпохи. На нём представлено количество каталогизированных КО в 10-киломе-

тровых интервалах по высотам от 200 км до 2000 км на январь 2000, 2010, 2020 и май 2022 г. Значительное увеличение количества КО между 2000 и 2010 г. произошло в результате фрагментации китайского КА «Фенгюн-1С» в 2007 г. и столкновения КА «Иридиум-33» и «Космос-2251» в 2009 г. Прирост количества КО между 2010 и 2020 г. — следствие начала развёртывания космической системы Starlink и запусков кубсатов на высоты около 650 км. Наконец, скачок объёма каталога между 2020 и 2022 г. объясняется продолжением выстраивания КС Starlink и запусков кубсатов ниже 650 км. Всплеск в области 1200 км произошёл вследствие развёртывания большой КС OneWeb.

Популяция среднеразмерного КМ обнаруживается, отслеживается и, следовательно, изучена гораздо хуже, чем популяция крупного (каталогизированного). Вообще говоря, доля некаталогизированных КО возрастает с увеличением высоты даже в низкоорбитальной области. Оценки характеристик среднеразмерного КМ получены модельной экстраполяцией сравнительно небольшого объёма измерений его представителей на низких высотах и сравнительно высоких наклонениях преимущественно наземными СН в режимах выборочного зондирования.

Экстраполяция — достаточно широко распространённый приём получения значений характеристик КМ в недоступной измерениям области. Но она оправдана лишь в тех случаях, когда:

- 1) с высокой надёжностью выяснены истинные закономерности и связи между характеристиками в области с достаточным объёмом их измерений и в интересующей нас области, слишком бедной измерениями (если они вообще есть);
- 2) модель, с помощью которой осуществляется экстраполяция, хорошо и своевременно откалибрована (т.е. с учётом возможной динамики этих закономерностей и связей).

В первом приближении можно допустить, что среднеразмерный КМ находится на тех же орбитах, что и породившие его крупные КО в результате их разрушения (включая деградацию). Но среднеразмерный КМ, порождённый разными категориями крупных КО, имеет разные начальные характеристики и ведёт себя по-разному. Взрыв баков РН с остатками топлива в них может породить множество осколков и с большим разбросом начальных векторов скоростей, и поэтому дальнейшая динамика параметров их орбит будет сильно отличаться от таковой КМ, возникающего в результате «возрастной» деградации поверхности КО, или продуктов работы твердотопливных двигателей.

Происхождение среднеразмерного КМ — самое тёмное место. О нём можно только догадываться по косвенным признакам. Даже эпизодические выборочные измерения этой категории КМ показывают, что его количество гораздо значительнее количества крупных КО, и оно не может быть исчерпано только сопутствующими миссиям объектами и фрагментами известных взрывов и столкновений. Остаётся предполагать, что большинство такого КМ — это продукты незарегистрированных разрушений крупных КО.

Динамика характеристик популяции среднеразмерного КМ отличается от таковой крупного КМ ещё и ввиду различного действия возмущающих сил на КО с разными размерами, массой и формой поверхности. Среднеразмерный КМ обычно характеризуется большим отношением площади поперечного сечения к массе и, следовательно, больше подвержен воздействию атмосферного торможения, чем крупный КМ.

Большое количество среднеразмерного КМ образуется в результате катастрофических разрушений с огромным разбросом начальных скоростей мелких осколков (гораздо большим, чем у крупных обломков). Поэтому они выходят на орбиты с большим разбросом высоты, наклонения и эксцентриситета [287].

Самую полную измерительную информацию о среднеразмерном КМ на сегодняшний день дают кампании наблюдений наземными средствами и, прежде всего, с помощью РЛС «Голдстоун», «Хейстек», «Хусир» и НАХ.

На рис. 2.3.12 показано распределение по высоте обнаруженного в одной из кампаний (продолжительностью 547,6 ч) радаром «Хейстек» (в вертикальном парковом режиме)

94 КМ размером от 1 до 10 см в сравнении с распределением каталогизированных (более 10 см) КО с дискретностью 100 км [данные НАСА; 5; 284]. (Эти данные получены до развёртывания КС Starlink.)

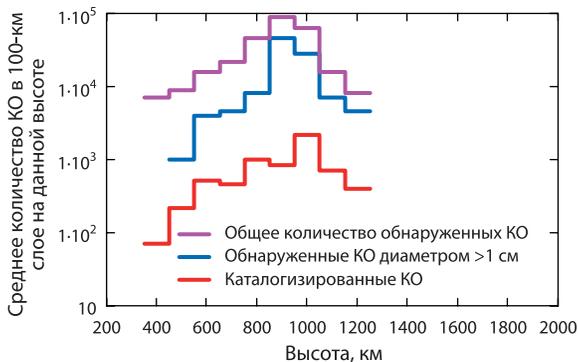


Рис. 2.3.12. Сравнительное распределение по высоте количества КО, обнаруженных радаром «Хейстек» в 547,6-часовом сеансе в парковом режиме при угле места 90°, и каталогизированных КО (данные НАСА)

Бросается в глаза подобие этих двух распределений. Но есть между ними и различия. Объём популяции КМ, обнаруженного «Хейстеком», ниже 1000 км с падением высоты уменьшается быстрее, чем количество каталогизированных КО, а в области около 900 км наблюдается явный пик в популяции КМ, обнаруженного «Хейстеком», и такого пика нет (даже наоборот, имеется небольшой провал) в популяции крупных (каталогизированных) КО.

Первое различие вполне согласуется с предположением большей подверженности среднеразмерных КО, чем крупных, торможению в атмосфере, а пик в области 900–1000 км ещё раз указывает на то, что источником образования частиц размером от 1 до 10 см в этой области высот являются скорее всего незарегистрированные разрушения крупных КО. Этим же можно объяснить и небольшой провал в этой области в распределении крупных КО.

Поскольку «Хейстек», «Хусир» и «Голдстоун» позволяют оценивать также наклонение и эксцентриситет, их измерения свидетельствуют, что среднеразмерный КМ чаще, чем крупные КО, обнаруживается на орбитах с меньшими наклонениями и большим эксцентриситетом. Кроме того, большое число КО, обнаруженных на высоте между 900 и 1000 км, движутся по почти круговым орбитам с наклонениями ~65° [284].

После тщательного анализа результатов наблюдений «Хейстека», «Хусир» и «Голдстоун» американские эксперты пришли к выводу, что большое количество КО, обнаруженных на высотах 900–1000 км и имеющих наклонения орбит 60–70°, говорит о наличии мощного источника образования среднеразмерного КМ в этой области орбит. Если бы этот источник был взрывом или столкновением крупных КО, то разброс параметров орбит КМ был бы гораздо шире, чем наблюдаемый, хотя в этой популяции могут быть и продукты неизвестных взрывов. Поляриметрические наблюдения «Хейстека» показывают, что частицы КМ из этой популяции имеют относительно гладкие и близкие к сферической поверхности, а не изрезанные, которые были бы типичны для продуктов взрывного разрушения. Результаты проведённого очень тщательно анализа орбитальных и физических характеристик этой популяции указывают на то, что принадлежащие ей объекты могут быть десятками и сотнями тысяч капель диаметром 0,6–2,0 см натрий-калиевого охладителя, вытекающего из нефункционирующего реактора российского КА системы морской космической разведки океанов RORSAT (англ. Radar Ocean Reconnaissance SATellite, УС-А — управляемый спутник активный) [285; 286]. Вытекание происходило примерно с постоянной небольшой скоростью в одном направлении, поэтому и не привело к значительному разбросу орбит этой группы КМ.

Известно гораздо меньше наблюдений, свидетельствующих о возможных источниках других концентраций КМ, не предсказанных моделями, таких, например, как концентрация КМ, обнаруженная «Хейстеком» на наклонениях 25–30°. Это другой район, в котором наблюдалось очень мало разрушений [176].

В ОКП существуют весьма многочисленные популяции мелкого КМ (размером <1 см и <1 мм). Об их наличии мы узнаём от возвращаемых на Землю КА (LDEF, Palapa, Solar Max и др.), некоторых элементов телескопа «Хаббл», МКС и, в значительно меньшей степени ввиду их количественной ограниченности, от активных бортовых датчиков (например, установленных на борту шаттла, ОС «Салют», «Мир», КА LDEF, EURECA). Но все эти данные пришли с высоты менее 600 км. Можно только предполагать, что на больших высотах из-за малого влияния атмосферы плотность частиц размером менее 1 мм должна увеличиваться с ростом высоты.

Образование мелких техногенных частиц, так же как и среднеразмерных, связано либо с выводом и функционированием КА (окись алюминия и т.п.), либо с разрушениями крупных КО (взрывы, столкновения, старение поверхности). Продукты выхлопа твердотопливных двигателей имеют приблизительно сферическую форму и диаметр в среднем 10 мкм. Возмущающие силы действуют на мелкие частицы ещё интенсивнее. В частности, из-за как правило большего отношения площади поверхности к массе: у мелкого КМ последний существенно подвержен воздействию давления солнечной радиации и сопротивления атмосферы. Анализ показывает, что менее 5 % окиси алюминия остаются на орбитах больше одного года [288], тогда как более крупные продукты разрушений могут оставаться на орбитах годами, десятками лет и дольше.

Продукты разрушений охватывают все диапазоны размеров (крупный, среднеразмерный, мелкий) и характеризуются значительным разнообразием форм. Кстати, различным видам разрушений свойственно и разное количественное соотношение образующихся крупных, мелких и среднеразмерных осколков (см., например, рис. 2.1.1 на с. 75, где сравнивается выход фрагментов различных размеров в результате взрыва и сверхскоростного столкновения КО). Предполагается, что мелкие осколки в момент образования характеризуются весьма широким диапазоном векторов начальных скоростей (более широким, чем крупные и среднеразмерные обломки) и, соответственно, столь же широким диапазоном начальных и, следовательно, эволюционирующих орбит.

В публикации [5] сделан краткий обзор результатов экспериментов с LDEF. Подробный же отчёт о результатах обследования поверхности этого КА содержится в выпущенном НАСА сборнике докладов симпозиума "LDEF: 69 Months in Space" в трёх частях [289]. Измерения, полученные от активных датчиков с борта LDEF в первый период его полёта (1984–1990), впервые указали на высоко динамичную природу популяции мелкого КМ. Это было подтверждено также экспериментом с КА Hiten [290]. Эксперимент с космической пылью [190] был единственным экспериментом в программе полёта LDEF, в котором измерялось время удара. И это оказалось весьма плодотворным: эксперимент показал, что большинство ударов было связано со скоплениями КМ. Этого, конечно, не могла бы показать миссия с пассивными датчиками.

Эксперимент поучительный, так как продемонстрировал, что именно регистрация времени ударов открывает возможность адекватно отследить динамику популяции среднеразмерного и мелкого КМ и показать наличие скоплений. Если бы на пути этих потоков КМ оказались бы СН, работающие в парковом режиме, они отметили бы увеличение интенсивности потока КМ на 3–5 порядков в течение нескольких минут. В процессе полёта LDEF эти скопления КМ обнаруживались снова и снова приблизительно в одной и той же точке орбиты LDEF, которая медленно перемещалась с характерной скоростью прецессии орбиты. И это позволило вычислить параметры орбит скоплений КМ.

Открытое в этом эксперименте существование таких скоплений указывает на то, что в предыдущем, пассивном эксперименте с LDEF измеренный им сильно усреднённый за шесть лет полёта интегральный поток КМ на самом деле мог быть очень зависимым от времени, особенно для мелкого КМ, из которого эти скопления преимущественно состояли.

Результаты экспериментов с LDEF заставили задуматься над возможными источниками образования обнаруженных роёв КМ. Выдвигалось предположение, что они состоят из окиси алюминия — продукта работы твердотопливного реактивного двигателя. Однако такие частицы быстро сходят с орбиты, т.е. не могут существовать несколько месяцев, как те, которые зарегистрировал LDEF. Дональд Дж. Кесслер предположил, что отработавшая ступень РН могла медленно испускать остатки пылевидных частиц и тем самым сформировать долго живущие скопления [176].

Другим возможным источником могли быть кусочки краски, эродировавшие под действием атомарного кислорода с поверхности КО на высокоэллиптической орбите. Уже в другой своей работе Д. Кесслер показал, что для образования такого скопления КМ, какой наблюдался LDEF, требуется расход менее 1 г краски в год с поверхности КА или РН [291]. Высказывалось также предположение, что наблюдавшиеся рои — это продукты не зарегистрированных разрушений. В публикации [191] было показано, что малые частицы, образовавшиеся в результате сверхскоростных столкновений среднеразмерных и крупных КО, могут создавать скопления КМ с распределением размеров, аналогичных тому, который был у обнаруженных LDEF.

Все это очень интересно, но объективный вывод неутешительный: *объём измерений малоразмерных частиц ($\ll 1$ см), который к тому же удалось получить только на низких высотах, настолько незначителен, что нет оснований делать какие-либо уверенные выводы относительно распределения мелкого мусора по высотам. Кроме того, на самых низких орбитах вследствие кратковременного орбитального существования КО в этой области среда очень динамична и претерпевает существенные изменения в самый короткий период времени. Таким образом, для объективного описания малоразмерной популяции КМ в настоящее время недостаточен не только объём необходимых измерений, но и частота их обновления.*

Наши знания о популяциях мелкого и среднеразмерного КМ составлены, главным образом, путём экстраполяции с использованием незначительного объёма измерений и далеко не совершенных моделей. Улучшить модели помогло бы более полное выяснение источников образования мелкого и среднеразмерного КМ.

2.4. Прогноз развития процесса засорения околоземного космического пространства в будущем

Специалистов всего мира, причастных к изучению и освоению космоса, беспокоит не только текущее состояние ОКП, но и что нас ожидает в близком и далёком будущем. Сейчас плотность КМ в ОКП ежегодно увеличивается в среднем на 4–5 %. Это и так много, а расчёты показывают, что темп этот прогрессивно наращивается (см. подразд. 2.2 и 3.6). Если вникнуть в результаты исследований современного состояния засорённости близкого космоса, и без всяких моделей становится очевидным, что в будущем нельзя ожидать ничего обнадеживающего в этом плане.

И это больше, чем просто интуиция. Вдумайтесь в следующий факт. *С начала космической эры (это 65 лет) было осуществлено более 6000 запусков ИСЗ, и только 10 из них породили одну треть каталога КО. Но самое ужасное в том, что из этой десятки шесть приходится на последние 15 лет. И это несмотря на постоянные призывы учёных ограничить дальнейшее засорение космоса.* Без комментариев!

С 1960 г. число каталогизированных КО возрастало почти линейно со средним темпом 220 объектов в год. Так продолжалось до 2007 и 2009 гг., когда произошли два драматических события — испытание китайского ASAT на высоте 850 км и столкновение КА «Иридиум-33» и «Космос-2251», в результате которых каталог КО пополнился сразу 5000 новых объектов. Об этом подробно будет говориться в подразд. 3.2.

Без непрерывно происходящего очищающего действия атмосферы рост популяции КМ был бы ещё более впечатляющим. Баланс между противоположными по результату про-

цессами образования нового КМ и «поглощения» его атмосферой определяет масштабы и распределение будущей популяции КМ. Этот баланс сильно меняется с высотой орбит. На высотах порядка 500 км и менее не стоит ожидать быстрого роста количества КО (однако новые инициативы с размещением гигантских КС (например, Starlink) в близких к этим высотам областях могут поколебать эту уверенность). На пиках 11-летних солнечных циклов убыль каталогизированных КО превышает их прирост. Но это до поры до времени. На больших высотах и некоторых высокоэллиптических орбитах попавшие туда КО могут оставаться там десятки, тысячи и даже миллионы лет, и практически наблюдается только приток КМ.

Учёные скрупулёзно всё здесь поставили на научную основу. В США, России, ЕКА, Японии ещё с 1980-х гг. начали разрабатывать модели для предсказания изменения состояния засорённости околоземного космоса в будущем. Эти модели постоянно совершенствуются, и хотя все они построены при множестве различных допущений (у каждой свои) они, в общем, выполняют схожие операции для предсказания состава и распределения в ОКП будущих популяций. (Подробно о моделях рассказано в подразд. 1.5.) Для каждого высотного диапазона рассчитывается начальная популяция на основе измерений или моделей текущей популяции. Затем орбиты начальной популяции прогнозируются с использованием детерминированных или статистических методов. При этом некоторые КО удаляются из каждой высотной популяции, другие вводятся в неё (как результат действия возмущающих сил).

Как дополнительная возможность изменения состава популяции используется прогноз запуска новых ИСЗ, возможных взрывов и столкновений КО. Если по прогнозу происходит столкновение или взрыв, включается другая модель — соответственно, столкновения или взрыва — с целью оценки последствий. Затем вся процедура повторяется, причём выходные данные первой итерации используются как начальные для второй (т. е. на следующий интервал времени).

Эти модели полезны для прогноза популяции крупного и, в меньшей степени, средне-размерного КМ. Что касается мелкого, то из-за скудности реальных сведений о его количестве и распределении в пространстве чрезвычайно трудно оценить его текущую популяцию и, тем более, будущую. Тем не менее, с определённой уверенностью можно утверждать:

- количество мелких КО, образующихся в результате разрушений, будет увеличиваться с ростом числа столкновений, поскольку в результате последних образуется огромное количество мелких осколков, что показано и теоретически, и в лабораторных тестах [191], и подтверждено результатами наблюдений специализированных РЛС;
- количество очень малых частиц на орбитах (таких как мельчайшие фрагменты разрушений, продукты работы твердотопливных двигателей, возрастной деградации поверхностей КО) может быстро и заметно изменяться под сильным влиянием возмущающих сил, так что их популяция в любой момент времени будет очень сильно зависеть от состава, распределения и фактуры КМ, произведённого за самые последние годы, может быть даже за 1–2 года.

На рис. 2.4.1 [278] показан полученный с помощью модели LEGEND прогноз техногенной засорённости ОКП на ближайшие 100 лет для нескольких сценариев освоения космоса.

Верхняя кривая предсказывает резкое увеличение частоты столкновений в случае, если не предпринимать никаких мер по предотвращению засорения ОКП (сценарий 1). Средняя демонстрирует рост числа столкновений для сценария, в котором 90 % отработавших КА будут принудительно удаляться с рабочих орбит (сценарий 2). Нижняя кривая показывает асимптотически линейный рост числа столкновений при условии полного отказа от дальнейших запусков ИСЗ (сценарий 3). Нелинейный отрезок кривой (сплошной) до 2010 г. — дань накопленному влиянию запусков в предшествующий период. Последняя кривая красноречиво говорит, что даже если человечество сейчас полностью откажется от космической деятельности, ОКП продолжит засоряться вследствие столкновений крупных КО с КМ, причём количество последних продолжит свой рост по крайней мере в ближайшие 100 лет.

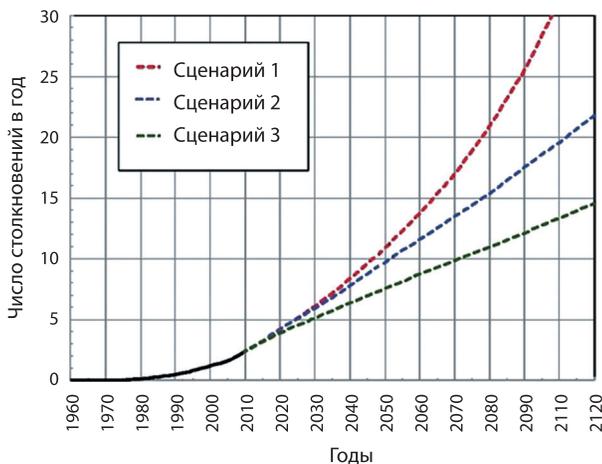


Рис. 2.4.1. Прогноз роста количества столкновений крупных НОКО (крупнее 10 см), усреднённый по 100 прогонам модели НАСА LEGEND

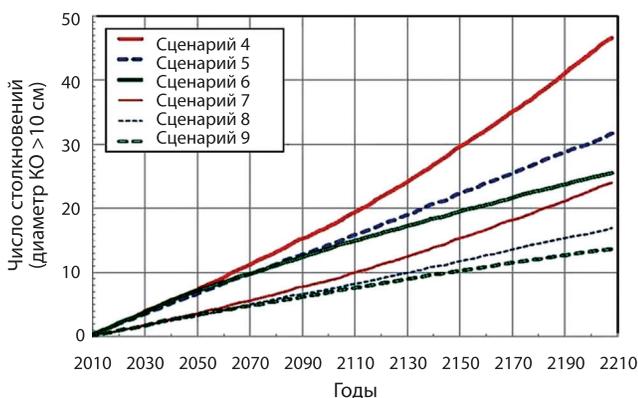


Рис. 2.4.2. Прогноз количества катастрофических столкновений на 200 лет для различных сценариев продолжения освоения космоса

Интересно сравнить представленные на рис. 2.4.2 результаты работы той же модели LEGEND (также усреднённые по 100 прогонам) для трёх других сценариев [292], в которых регулярные запуски продолжатся, но вместе с тем будут предприниматься довольно жёсткие меры по сдерживанию дальнейшего засорения ОКП. Сценарий 4 — на регулярном фоне запусков 90 % отработавших КА штатно уводятся на орбиты захоронения. Сценарий 5 — кроме мер, предусмотренных сценарием 4 начиная с 2020 г. ежегодно по два крупных «мёртвых» КА принудительно удаляются с орбит и «затопляются» в атмосфере. Сценарий 6 — от пятого отличается только тем, что не два, а пять объектов принудительно ежегодно уводятся с орбит. При построении трёх верхних кривых учитывались все столкновения, а три нижние (сценарии 7, 8, 9, соответственно) отражают (для тех же сценариев) только катастрофические столкновения (т.е. когда при столкновении на 1 г массы приходится 40 Дж энергии).

Итак, даже при самом бережном режиме заботы о космосе (принудительно ежегодно удаляются пять крупных отработавших КО) на интервале прогноза произойдёт 14 катастрофических столкновений. Причём при всех сценариях количество столкновений будет только возрастать.

Более поздние расчёты [293], проведённые с помощью модели LEGEND, показали, что даже при практически поголовном удалении отработавших КА с рабочих орбит (95 %)

и соблюдении 25-летнего срока существования их на орбитах захоронения в течение следующих 200 лет ожидается 26 катастрофических (влекущих полное разрушение подвергнувшегося удару КА) и 19 некатастрофических (приводящих лишь к некоторым повреждениям КА и образованию небольшого числа осколков) столкновений.

Модель SPDA (*англ.* Space Debris Prediction and Analysis) [213] даёт следующие результаты при прогнозировании состояния засорённости ОКП и изменения количества столкновений на 200 лет. Сценарий 1 — полное прекращение запусков новых ИСЗ и исключение возможности взрывов в космосе. Для такого сценария модель предсказывает через 200 лет снижение количества КО размером более 20 см в два раза, но число их столкновений в год будет монотонно расти на протяжении этих 200 лет, хотя и с небольшим замедлением за счёт диссипативного эффекта у нижней границы области низких орбит. Число же столкновений объектов размером 10–20 см будет увеличиваться ещё круче. Именно за счёт возрастания числа столкновений будет расти и количество более мелких КО, в частности, количество КО размером от 1 до 2,5 см за 200 лет увеличится почти в пять раз (рис. 2.4.3). А что это, как не каскадный эффект (см. ниже подразд. 3.3) или, по крайней мере, его непосредственный предвестник, причём даже в случае самого оптимистического сценария и даже для крупных КО! Здесь нужно иметь в виду, что каскадный эффект в ОКП отличается от ядерной цепной реакции замедленным масштабом времени, т.е. процесс протекает существенно медленнее, но главные закономерности остаются теми же.

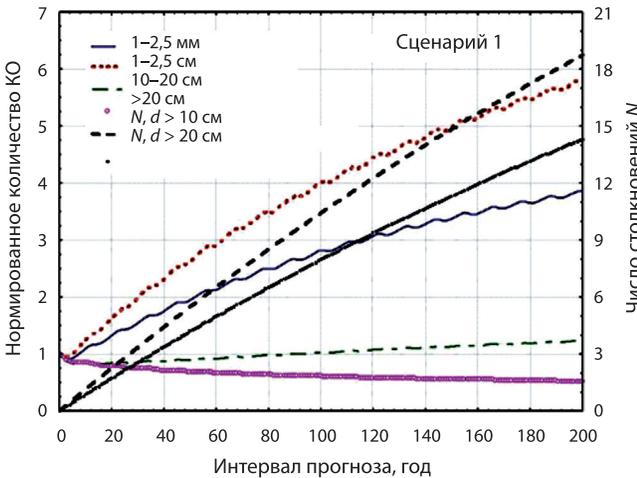


Рис. 2.4.3. Изменение числа КО и количества столкновений для сценария 1

Сценарий 2 — запуски новых ИСЗ продолжают с прежней интенсивностью, взрывы в космосе исключаются. Для этого сценария модель SPDA даёт следующие результаты (рис. 2.4.4). В отличие от первого сценария рост числа крупных КО (>20 см) продолжится. Через 200 лет их будет в полтора раза больше, чем сейчас. Ежегодное число столкновений представлено уже не выпуклой, а вогнутой функцией (т.е. растёт с ускорением). Теперь это экспонента. Через 200 лет количество крупных объектов будет почти в 3,5 раза больше, чем для первого сценария. Количество КО помельче — размером 10–20 см — увеличится более чем в три раза, а мелких КО (<2,5 см) — почти в 20 раз [213].

Итак, анализ результатов работы многих моделей техногенного засорения ОКП подсказывает следующий неутешительный вывод. Если бы единственными добавками к популяции КМ в будущем были запускаемые новые КА и выводящие их на орбиты РН (остающиеся на орбитах по завершении своих миссий), сопутствующий миссиям КМ, продукты деградации поверхности КО и фрагменты взрывов (но не столкновений!), общая популяция КМ продолжила бы в будущем свой приблизительно линейный рост. Введение мер по снижению количества взрывов КА и РН и ограничение количества высвобождаемого в полёте сопутствующего космическим миссиям мусора может привести к замедлению

темпа роста популяции. Но всё же он продолжится, оставаясь линейным. Уплотнение графика запусков ИСЗ приведёт к ускорению темпа роста популяции. Столкновения же КО, если они продолжатся (а они, без сомнения, продолжатся), потенциально опасны значительным, причём экспоненциальным ростом популяции КМ в будущем. Подробнее об этом будет рассказано в подразд. 3.3.

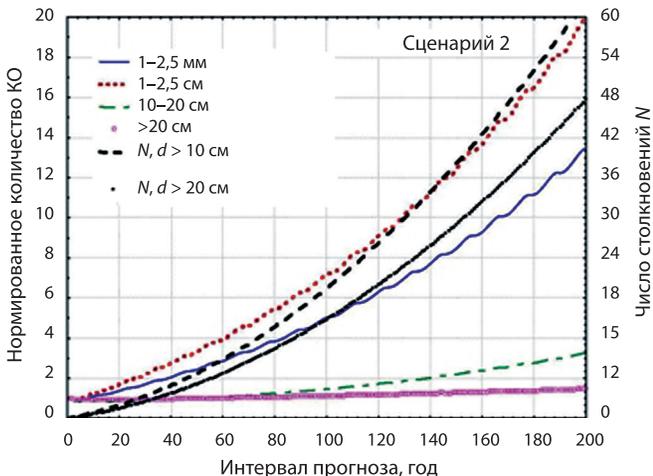


Рис. 2.4.4. Изменение числа КО и количества столкновений для сценария 2

Экспоненциальный характер роста числа столкновений крупных КО и общего количества мелких КО при весьма умеренном росте количества крупных (каталогизированных) КО — это уже признак каскадного эффекта.

Однако всё может измениться в ближайшее время и не в лучшую сторону. Это связано с разворачиваемой компанией SpaceX гигантской глобальной спутниковой системы Starlink (спутниковый интернет) для обеспечения высокоскоростным широкополосным доступом в интернет в местах, где он был ненадёжным, дорогим или полностью недоступным. Ситуация усугубляется и развёртыванием КС OneWeb. Цель, разумеется, благая. Разработка первого проекта началась в 2015 г. Поддержка системы мощная: по состоянию на август 2021 г. число пользователей бета-тестеров Starlink достигло 100 000 в 14 странах мира. Общая сумма инвестиций для реализации проекта оценивается в 10 млрд дол. Собственные двигатели позволяют спутникам поднимать орбиту, маневрировать в космосе и сходить с орбиты в конце полезного срока службы. Масса спутника около 260 кг, форма в виде плоской панели.

Группировка Starlink состоит как минимум из двух отдельных спутниковых сетей. Уже в процессе формирования КС проект постоянно корректируется, особенно в части высот её размещения, количества КА и технологий самой конструкции КА. В апреле 2019 г. Федеральная комиссия по связи (*англ.* Federal Communications Commission — FCC) утвердила запрос SpaceX на снижение высоты орбиты для 1584 спутников с 1150 до 550 км. Спутники будут размещены в 24 орбитальных плоскостях с наклоном орбиты 53°. Согласно заявлению компании, снижение высоты орбиты позволит ускорить процесс выведения спутников и снизить их количество, понизить задержку сигнала до 15 мс, а также снизить вероятность появления космического мусора, поскольку в случае неполадок двигательной установки аппарат сойдёт с орбиты и сгорит в атмосфере значительно быстрее — в течение максимум 5 лет.

Следует признать, что SpaceX постоянно совершенствует свои КА и всю систему. В результате пропускная способность увеличилась на 400 %, удвоено количество генерируемых лучей фазированной антенны, добавлено оборудование Ка-диапазона. Теперь 100 % деталей спутника будут сгорать в атмосфере при сходе с орбиты после завершения его работы (в предыдущей партии было только 95 %). Масса аппарата выросла

до 260 кг. Спутники выводятся на орбиты высотой 280 км, откуда они будут подниматься в свои орбитальные плоскости на 550 км. Компания SpaceX сообщила, что активно работает совместно с ведущими астрономическими организациями для обеспечения того, чтобы работа последних не нарушалась спутниками Starlink. Инженеры компании работают над тем, чтобы сделать основание будущих версий спутников чёрным, чтобы уменьшить их негативный отражательный эффект на астрономические наблюдения.

Несмотря на это, с самого начала разработки проект подвергается резкой критике даже со стороны НАСА. Некоторые астрономы высказали предположение, что множественные спутники проекта Starlink на низких орбитах будут создавать помехи астрономическим наблюдениям неба и удалённых объектов. Международный астрономический союз (МАС, *англ.* Intern. Astronomical Union — IAU) выразил озабоченность и заявил о недостаточном понимании необходимости создания столь крупных спутниковых созвездий. Первые наблюдения подтвердили эти опасения, показав, что спутники Starlink были одними из самых ярких и быстрых объектов на ночном небе. Всего SpaceX планирует увеличить количество функционирующих одновременно на орбите спутников до 12 тыс. ед.

Раздел 3. ПОСЛЕДСТВИЯ ЗАСОРЁННОСТИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Несмотря на то, что некоторые аспекты драматических последствий техногенной засорённости ОКП начали проявляться уже на довольно ранних этапах освоения космоса, у широких кругов общества, включая учёных, осознание этой опасности возникло с большим запозданием. И трудно сказать, в чём больший драматизм (по крайней мере, психологический) — в самих последствиях техногенного засорения космоса или в запоздалой реакции на них общества. Действительно, ведь своевременная организация противодействия пагубному процессу могла бы предотвратить современное практически необратимое состояние засорённости околоземной среды.

3.1. Различные виды последствий техногенного засорения околоземного космического пространства

Ущерб для экологии Земли и ОКП — важнейшего пространства деятельности человека. Прежде всего, нужно помнить, что появление техногенного мусора в ОКП — это принципиальное экологическое изменение околоземной среды, нарушение её сложившейся за миллиарды лет (в течение которых и сформировалась уникальная экология Земли и ОКП) первозданной чистоты. И это нарушение неумолимо прогрессирует. Вследствие накопления мелкой фракции КМ (как мы уже видели, весьма многочисленной) снижается прозрачность околоземной среды, что давно уже заметили астрономы-наблюдатели, столкнувшись с создаваемыми КМ (а теперь уже и действующими КА Starlink, судя по жесткому заявлению Международного астрономического союза) помехами астрономическим наблюдениям, особенно с длительными экспозициями [2, 3, 5, 6, 268].

Неуклонно нарастающая засорённость ОКП постепенно, но всё больше и больше нарушает сложившийся баланс свето- и теплообмена Земли с внешней средой. Подчеркнём, что за это ответственен в наибольшей степени именно мелкий КМ. **Это явление можно считать первым, причём зловеще устремлённым в будущее последствием техногенного засорения ОКП.**

Следует также помнить, что попадающие на поверхность Земли при запусках КА компоненты топлива, например, гептил (горючее жидкостных реактивных двигателей), являются сильнейшим канцерогеном. При неудачных запусках, процент которых до сих пор довольно высок, разливы гептила бывают катастрофическими.

Падение КО и их обломков на Землю. Наиболее популяризированное средствами массовой информации последствие засорения ОКП, также имеющее непосредственное отношение к экологии Земли, — падение на Землю фрагментов КО после их вхождения в плотные слои атмосферы. Ежегодно на Землю падает несколько десятков тонн КМ. Например, в 2007 г. — приблизительно 70 т. Наиболее крупные КО — верхние ступени РН в 2011 г. сходили с орбит в среднем один раз в неделю, а поверхности Земли достигает в среднем не менее двух крупных объектов в год [294, 295].

Такие события случались многократно и вызывали мощный международный резонанс в СМИ. Достаточно вспомнить такие прогремевшие в своё время случаи, как падение на Землю обломков ИСЗ «Космос-954» с радиоактивными материалами на борту в 1978 г.,

американской космической лаборатории Skylab в 1979 г., ИСЗ «Космос-1402» (с бортовым ядерным реактором) в 1983 г., орбитального комплекса «Салют-7» – «Космос-1686» в 1991 г., транспортного корабля «Прогресс М-17» в 1994 г., ИСЗ «Космос-398» в 1995 г., китайской спускаемой капсулы FSW-1 No.5 и российского межпланетного корабля «Марс-96» в 1996 г. Наконец, наделало много шума падение (точнее, «затопление», что, кстати, оказалось очень дорогим удовольствием, а по многим мнениям и вовсе не удовольствием, а неоправданной мерой) огромной орбитальной станции «Мир» в марте 2001 г. В результате аварии в 2012 г. не смогла приступить к выполнению своей миссии и упала в Тихий океан Российская автоматическая межпланетная станция «Фобос-Грунт». И это только наиболее «раскрученные» СМИ события.

Одним из запоминающихся событий этого ряда была трагедия запущенного 16 января 2003 г. американского шаттла «Колумбия», случившаяся 1 февраля за 16 мин до предполагаемой посадки. Первоначальная выдвинутая версия гибели корабля — отклейка теплозащитных плиток с носка левого крыла вследствие удара оторвавшейся при старте от топливного бака пенопластовой плитки.

Однако, по сообщению Associated Press [296], в НАСА в дальнейшем отказались от этого предположения. Руководитель программы шаттлов Рон Диттмор (*англ. Ron Dittmore*) официально заявил прессе, что *«члены комиссии тщательно изучили видеозапись столкновения шаттла с осколком изоляции (весом около 1,1 кг), после чего пришли к выводу, что это происшествие не могло послужить причиной катастрофы корабля. Даже удвоив при расчётах относительную скорость объектов во время удара, инженеры пришли к выводу, что обломок не мог нанести „Колумбии“ сколько-нибудь серьёзных повреждений»*. Диттмор добавил, что *«...теперь специалисты предполагают, что произошло ещё какое-то событие, ставшее роковым для космического челнока»*.

Со своей стороны, добавим, что, если бы повреждение от удара пенопласта было действительно серьёзным, это проявилось бы при наборе «Колумбией» высоты, во всяком случае, датчики сигнализировали бы перегрев.

Что же это за «ещё какое-то событие, ставшее роковым», по мнению авторитетной комиссии? Возможна следующая версия, имеющая хождение в среде специалистов, близких к программе шаттла. За 17 дней полёта в космосе шаттл мог претерпеть столкновение с КМ. Причём толкование этой причины может быть и не банальным: космический обломок (не обязательно крупный) мог повредить теплообшивку задолго до возвращения корабля на Землю. Тогда это была лишь потенциальная опасность, которая реально проявилась только при входе шаттла в плотные слои атмосферы, когда в этом ослабленном месте начала резко повышаться температура, а для катастрофы достаточно одного оголённого места на поверхности корабля.

Одним из первых в истории космической деятельности опаснейшим прецедентом стало падение на Землю ИСЗ морской космической разведки и целеуказания «Космос-954» серии RORSAT с бортовым реактором, запущенного на низкую орбиту 18 сентября 1977 г. Бортовая энергетическая установка предназначалась для электропитания мощного радара, ориентированного на Землю. Высота орбиты регулярно корректировалась (в сторону повышения) для продления активного существования ИСЗ. И, как обычно делалось для спутников этой серии, когда топливо для таких коррекций почти закончилось, было решено отправить реактор на более высокую орбиту захоронения со временем существования 300–1000 лет.

Радиоактивное топливо в реакторе имело период полураспада 70 лет. Однако реактор не отделился, и эта операция не удалась. КА вместе с реактором, содержащим 30 кг обогащённого урана, 24 января 1978 г. вошёл в плотные слои атмосферы. Радиоактивные обломки были разбросаны на огромной (протяжённостью 800 км), к счастью малонаселённой, территории Канады в районе Великих озёр. Радиоактивные бериллиевые контейнеры были обнаружены поисковой командой Канады. Очистка территории от радиоактивного загрязнения обошлась Канаде 14 млн дол. Здесь вступила в силу Конвенция об ответственности 1972 г. Канада требовала возмещения ущерба в сумме шести миллионов долларов. СССР, в конце концов, заплатил три.

104 Вскоре после этой драматической истории внимание общественности сосредоточилось на падении американской летающей лаборатории Skylab, которая прекратила существование над Австралией 11 мая 1979 г. Опять-таки к счастью, область падения обломков оказалась также малонаселённой.

Время и место падения в обоих случаях точно заранее предсказать не удалось [297–299].

На рис. 3.1.1–3.1.7 [281] показаны достигшие поверхности Земли фрагменты сошедших с орбиты космических объектов, найденные в самых разных частях света.



Рис. 3.1.1. Обнаруженные в Таиланде в 2005 г. обломки топливных баков



Рис. 3.1.2. Фрагмент 3-й ступени РН «Дельта» (англ. Delta II) (60 кг, Аргентина, 2004 г.), которая вывела на орбиту американский GPS «Навстар-35». Это титановый кожух твердотопливного двигателя STAR-48B [301]



Рис. 3.1.3. Фрагмент 3-й ступени РН «Дельта» (56 кг, Саудовская Аравия, 2001 г.)



Рис. 3.1.4. 70-килограммовый главный титановый кожух твердотопливного двигателя верхней ступени РН «Дельта», найденный в 240 км от Эль-Рияда [302]



Рис. 3.1.5. Обломки 2-й ступени РН «Дельта» (окрестности Кейптауна, 2000 г.)



Рис. 3.1.6. Баллон для сжатого газа от ступени РН «Зенит», найденный в штате Колорадо в марте 2011 г.



Рис. 3.1.7. Найденный в Австралии кожух твердотопливного двигателя третьей ступени РН «Дельта-2»

Иногда можно слышать увещевание: поскольку три четверти земной поверхности составляет вода, вероятность того, что КО упадёт в океан, равна 0,75. Однако распределения суши и водной поверхности неоднородны и сильно зависят от широты. Соответственно, от широты зависят и вероятность падения КО на сушу (или в океан), и, вместе с тем, плотность населения Земли, площадь полезных или пустынных земель и т.д. Вопрос не так прост, как кажется на первый взгляд. Интересное исследование на эту тему провёл Марк Мэтни (*англ.* M. Matney) [300].

С учётом огромных размеров поверхности мирового океана и наличия множества пустынных областей на суше такая представительная экспозиция обнаруженных обломков КО на Земле весьма наглядно говорит о том, что падение крупных фрагментов КО на Землю не такая уж редкость. В будущем частота таких падений и их опасность для людей только возрастёт. И у нас есть полное основание опасаться за жизнь свою, своих близких и не очень и за свою подвижность и неподвижность.

В январе 2011 г. после успешного испытания новой российской РН «Зенит-3», предназначенной для вывода нового поколения метеорологических КА на ГЕО, две её ступени остались на орбитах: одна на недолговечной низкой парковой орбите, вторая — на высокоэллиптической. Нижняя 9-тонная ступень вошла в атмосферу на высоте 80 км над Лос-Анжелесом 19 марта. На последнем витке траектория обломков прошла над штатами Юта и Колорадо. 22 марта в графстве Моффат сотрудники шерифа обнаружили металлическую сферу диаметром 30 дюймов с маркировкой на русском языке (бак из системы сжатия), внешний вид которой показан на рис. 3.1.6 [303].

22 февраля 2012 г. вблизи деревушки Риашу-дос-Рокос муниципалитете Анапурис бразильского штата Мараньян (*порт.* Anapurus, Maranhão) упал сферический топливный бак французской РН «Ариан-4» (*фр.* Ariane), повредив несколько деревьев. Это часть третьей ступени РН диаметром 1 м [304].

В 2008 г. в Австралии при перегоне скота был найден кожух от твердотопливного реактивного двигателя третьей ступени РН «Дельта-2», использованной в июне 1990 г. для вывода индийского ИСЗ INSAT-1D (*англ.* Indian National Satellite) на геостационарную орбиту (см. рис. 3.1.7). Перед входом в плотные слои атмосферы орбита третьей ступени имела параметры 135 км (H_p), 39750 км (H_a) [305].

Широкий резонанс в обществе вызвало падение на Землю обломков орбитального комплекса «Салют-7»–«Космос-1686» в 1991 г. Этому событию даже был посвящён специальный научный семинар в Центре управления полётами ЕКА в Дармштадте (ESOC) в апреле 1991 г.

Предыстория такова. Орбитальная станция «Салют-7» была запущена 19 апреля 1982 г. На её борту работали, сменяя друг друга, в общей сложности более 20 космонавтов (6 основных экипажей и 5 экспедиций посещения). В феврале 1985 г. был потерян радиоконтакт 20-тонной ОС с Землёй, и она стала неуправляемой. В июне того же года В. Джанибеков и В. Савиных на корабле «Союз Т-13» осуществили рискованную ручную стыковку с медленно вращающейся станцией. Огромную информационную помощь при этом им оказала Российская СККП (кстати, кроме неё больше никто не мог этого сделать), определяя координаты станции и координируя проведение операции. Космонавтам удалось стабилизировать станцию, сориентировать солнечные панели в сторону Солнца и зарядить батареи. По сути, они реанимировали казавшуюся безнадежно погибшей станцию и продлили её функционирование.

В октябре 1985 г. со станцией был состыкован 18-тонный ИСЗ «Космос-1686», образовав орбитальный комплекс. В августе 1986 г. с помощью двигателей обоих аппаратов орбитального комплекса (ОК) был поднят на высоту 490 км с перспективой его длительного функционирования. Однако своенравное изменение солнечной активности (в данном случае непредсказуемое возрастание) с соответствующим влиянием на атмосферу (вызвавшим её «взбучание» и торможение ОК) внесло свои коррективы в планы конструкторов.

Падение 43-тонной конструкции произошло 7 февраля 1991 г. Правительство Аргентины сообщило ООН, что фрагменты ОК найдены на территории Аргентины [306–308].

Из последствий этого типа наиболее опасно падение на Землю радиоактивных материалов (например, фрагментов бортовых энергетических реакторов). К 1995 г. на орбитах было 55 КА с радиоактивными материалами на борту [5].

Про последствия падения ИСЗ «Космос-954» было сказано выше. «Космос-1402» с радиоактивными материалами упал в Атлантический океан.

Опасность подобных событий не только в самих фактах падений, но и в том, что район и время падения предсказываются часто довольно грубо. Внезапность самого последнего этапа — контакта с Землёй — не оставляет шансов для людей и имущества, находящихся точно в этом месте. Виною тому, главным образом, неопределённость упреждающего расчёта параметров атмосферного торможения падающей массы.

Тем не менее, СККП США выпускает официальные предупреждения о предстоящих входах всех КО в плотные слои атмосферы и угрозе падения их обломков на Землю. Эти прогнозы, известные как «слежение за падающими КО» (англ. Tracking and Impact Prediction — TIP), выпускаются ежедневно, начиная за четыре дня до события, и несколько раз в последние 24 ч существования КО на орбите [309].

Чаще всего поверхности Земли достигают топливные баки РН (титановые или из нержавеющей стали). Ввиду их значительной массы и большого объёма они конечно же представляют серьёзную опасность для людей на Земле и их собственности. Если же в них сохранились остатки топлива (часто ядовитые), то при падении они могут ещё и взорваться, загрязняя при этом большие площади. В последнее время рассматриваются возможности предотвращения их падения на Землю с использованием специальной идеологии на этапе проектирования [310].

Но падение обломков КО на Землю — это далеко не самая большая неприятность для человечества. Хотя сейчас трудно себе представить последствия падения крупного обломка, например, на АЭС, на лабораторию разработки или хранилище биологического или химического оружия, даже просто на большой склад вооружения или взрывчатых веществ и т. п. А вероятность этого вовсе не так уж близка к нулю.

Опасность столкновений в космосе и их конструктивные последствия. Создание космической техники, как и вся космическая деятельность, недёшево обходится населению Земли. Космический аппарат — дорогое удовольствие, и его потеря — ощутимый удар по карману налогоплательщика. Поэтому нарастание угрозы действующим КА со стороны

108 КМ должно настораживать не только конструкторов, операторов и отвечающих за космическую деятельность госчиновников, но и всех налогоплательщиков, т.е. все население страны, использующей космическую технику.

Характеристики потока КМ сильно варьируют с изменением высоты и, в меньшей степени, наклона. Поэтому и риск столкновения КА и, в принципе, КО с элементами КМ существенно зависит от параметров орбиты самого КА (КО), его размеров, конфигурации и ориентации. Вероятность столкновения прямо пропорциональна площади поперечного сечения КО, перпендикулярного потоку КМ, и времени экспозиции этого сечения потоку. Ежедневно происходят сотни опасных сближений (ближе, чем на 1 км) между каталогизированными КО [311]. Это уже показатель опасности столкновения, причём вполне определённый, так как каталогизированные КО — самая определённая популяция КМ, о которой мы знаем практически все, в отличие от любой другой популяции.

Но вероятность столкновения — это только половина угрозы. Один и тот же кусок КМ может разрушить один тип КА, а другому нанести сравнительно небольшое повреждение.

Так что одной из задач конструктора космической техники представляется определение степени опасности со стороны КМ для конструируемого КА с учётом всех существенных факторов. Точность предсказания правдоподобного ущерба КА за время его космической миссии зависит от правильности оценки потока КМ на пути следования КА и адекватности используемой модели определения ущерба данной конструкции со стороны КМ в случае столкновения. Другая задача — выбор конструкции КА, минимизирующей такой ущерб.

В связи с этим следует иметь в виду, что в некоторых орбитальных областях (особенно на больших высотах) поток КМ с его основными характеристиками не может быть определён с достаточно высокой точностью из-за скудности измерительной информации при построении текущих оценок популяции КМ в этих областях (прежде всего мелкого и среднеразмерного, динамика которых значительно вариативнее динамики крупного). Точность предсказания ущерба тоже весьма неопределённая. Поскольку оба подлежащие учёту фактора содержат значительные неопределённости, то и результирующее предсказание риска для данной конструкции КА со стороны КМ при выполнении им программы полёта тоже отличается значительной неопределённостью.

Чтобы правильнее оценить опасность столкновения или взрыва в космосе, нужно иметь перед глазами пример шрапнели. Одно дело, если летит один снаряд диаметром, скажем, полметра. И совсем другое дело, когда этот снаряд разбивается на тысячу мелких осколков, которые постепенно охватывают все больший и больший объём пространства, катастрофически увеличивая вероятность столкновений с другими КО. То, что они более мелкие, чем исходный объект, — слабое утешение, так как решающим обстоятельством, определяющим опасность столкновения, выступает космическая скорость осколков и, конечно же, их количество.

Когда скоро столкновение уже произошло, ущерб, причинённый ударом КМ, зависит от размеров, массы и относительной скорости соударяющихся КО, состава материала и конфигурации, угла, под которым КМ ударяется в КА, и, разумеется, от степени уязвимости места (компонента) КА, на которое пришёлся удар.

Орбитальная область, в которой произошло столкновение, тоже влияет на масштаб ущерба хотя бы потому, что от неё зависят средняя и предельная относительные скорости столкновений. И это важно учитывать как при выборе орбиты планируемой миссии (программы полёта), так и конфигурации и защитного покрытия КА. На низких, практически круговых орбитах относительная скорость возможных столкновений изменяется от почти нулевой (для КО, движущегося «вдогон» цели по той же орбите) до более, чем 15 км/с (при столкновении лоб в лоб). Столкновение ВЭКО в окрестности перигея может происходить и при больших скоростях.

Доля высокоскоростных столкновений возрастает для объектов с высокими наклонами. На полусинхронных круговых орбитах орбитальная скорость составляет около

3,9 км/с, так что теоретически максимальная скорость столкновений в этой области составляет около 7,8 км/с (при лобовом столкновении, что маловероятно). На ГЕО орбитальная скорость движения равна приблизительно 3 км/с. Но ввиду того, что КА и РН на ГЕО движутся в одном направлении и имеют малую разницу в наклонениях орбит, средняя относительная скорость столкновений в этой области относительно мала и равна 0,5 км/с. Это много меньше, чем в низкоорбитальной области, но всё же сравнимо со скоростью пули.

В результате столкновения КА с элементом КМ может произойти полное или частичное его разрушение. Удар просто может вывести его из строя, не разрушив, нарушить функционирование одного или нескольких компонент КА, нанести внешние повреждения поверхности КА с образованием мелких осколков, не нарушив его функционирования в целом. Некоторые признанные научным сообществом оценки показывают [312], что полное разрушение происходит в случае, если отношение кинетической энергии атакуемого объекта к массе атакуемого превышает 40 Дж/г. Отдельные части КА отличаются различной степенью уязвимости по отношению к ударам КМ. Например, небольшая болванка даже на небольшой относительной скорости ударившаяся в солнечную панель, скорее всего, разрушит только панель, но не весь КА, хотя и может нарушить его стабилизацию (по крайней мере, временно).

Разрушение КА опасно не только его потерей, но и образованием иногда очень большого количества обломков как крупных, так и мелких. Особенно опасно, как уже говорилось, разрушение КА, несущего на борту радиоактивные материалы. В конце 1990-х гг. таких КА в ОКП было около 60. При высокоэнергетическом столкновении с КМ они могут разрушиться. При наблюдениях с Земли высвободившиеся радиоактивные фрагменты никак себя не проявляют (только действующие реакторы имеют обнаружимый уровень излучения). Но они могут войти в атмосферу раньше, чем этого требуют условия безопасности с учётом периода полураспада, могут достигнуть поверхности Земли (как это уже неоднократно случалось) со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В публикации [5] приводится следующий пример, рассчитанный с помощью модели разрушения. В результате столкновения КА с массой 420 кг и КО с массой 500 г при относительной скорости 13 км/с образуется от 50 до 100 обломков массой более 0,5 кг — достаточной, чтобы вызвать последующие катастрофические разрушения при столкновении с другими КО. Количество образующихся более мелких осколков рассчитать гораздо труднее. Однако известно, что общее количество осколков будет возрастать с уменьшением их размеров (число сантиметровых, не говоря уже о миллиметровых, может исчисляться миллионами). И эти фрагменты будут отделяться от материнского КО с большим разбросом скоростей: чем мельче осколки, тем больше разброс начальных скоростей и, следовательно, тем больший диапазон результирующих орбит. Между прочим, вектор скорости отделения фрагмента в момент столкновения — наиболее трудно предсказуемый параметр для модели разрушения. На рис. 3.1.8 [287] показано распределение максимальных начальных скоростей образующихся осколков в зависимости от их размеров.

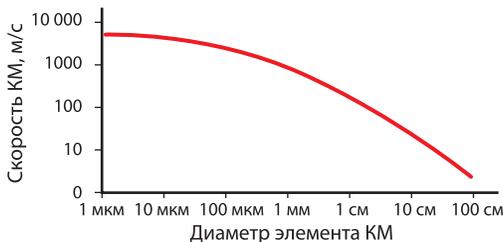


Рис. 3.1.8. Максимальные скорости отделения осколков в функции их размера

Столкновение НОКО со среднеразмерным КМ может привести к значительным разрушительным последствиям. В низкоорбитальной области элемент КМ по массе составляющий всего 0,1 % от массы КА может разнести его на множество фрагментов.

110 На больших высотах, где относительные скорости столкновений заметно меньше, космическому аппарату для полного разрушения потребуется столкнуться со значительно более крупным КО. На ГЕО только самые крупные элементы среднеразмерного КМ могут причинить КА ощутимый ущерб.

В зависимости от многочисленных и разнообразных условий удара и конфигурации КА повреждения могут быть в виде кратеров, сколов, пробоин, трещин, царапин. Даже если ударивший в КА объект и не проникнет сквозь оболочку КА, обратная ударная волна может вызвать сколы на внутренней стенке в месте удара и вызвать серьёзные повреждения внутреннего оснащения КА, что было подтверждено и лабораторными испытаниями, и анализом следов ударов КМ на возвращённых из космоса КА или их элементов.

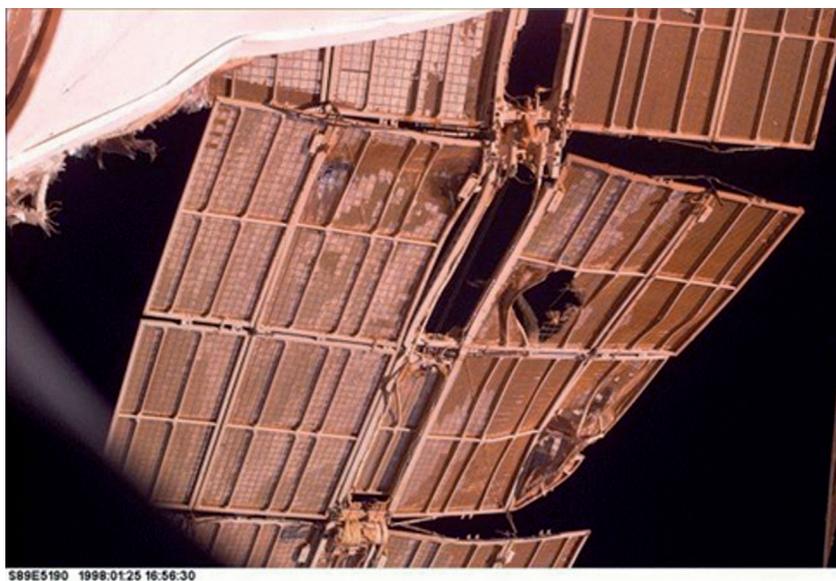
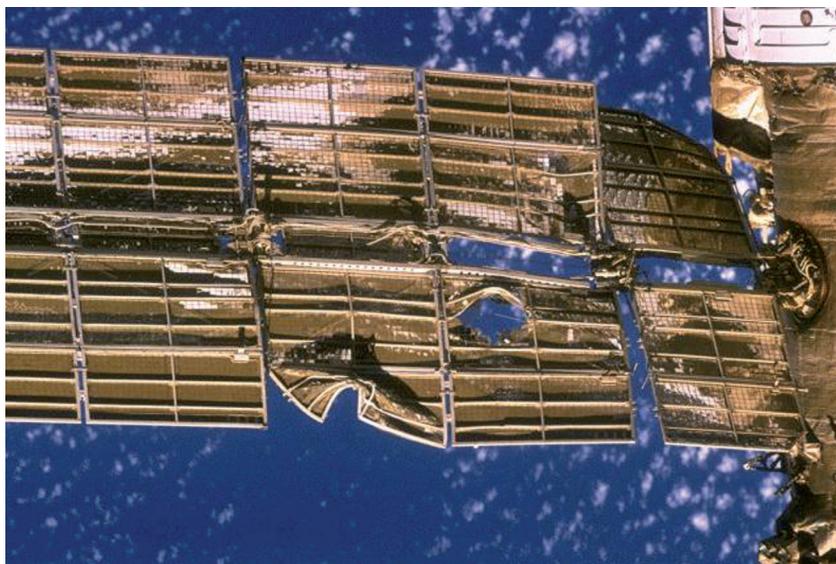


Рис. 3.1.9. Сильные повреждения солнечных панелей модуля «Спектр» ОС «Мир», полученные в июне 1997 г.

Механический момент от удара может вызвать импульсное повреждение типа скручивания или изгибания структурных компонент и передачу энергии ударной волны через различные структуры и компоненты аппарата. Результат воздействия КМ на КА сильно зависит от его конструкции и степени защиты, но некоторые компоненты КА очень трудно защитить эффективно (например, тросы, штанги, оптику, солнечные панели).

О нарастании угрозы столкновений свидетельствует не только неуклонно возрастающая расчётная вероятность столкновений на основе реальных наблюдений и моделей, не только динамика каталога КО, наглядно представленная на рис. 2.2.2 (см. с. 80), но, главное, участвовавшие регистрируемые факты столкновений, которые ещё 10–20 лет назад были большой редкостью, участвовавшие тревоги по поводу сближения МКС с опасными КО. Широкая общественность знакома обычно только с теми фактами, которые наделали много шума в прессе. Кроме публичных событий, существует множество прошедших незаметно, но внесших свой вклад в формирование картины нарастания опасности столкновений в космосе. Достаточно вспомнить следы и пробоины от ударов довольно крупных КО, регулярно обнаруживаемые космонавтами на МКС и экипажем шаттла при осмотре солнечных панелей и прочей внешней оснастки станции, космического телескопа «Хаббл» и иных КА.

На рис. 3.1.9, 3.1.10, 3.1.13, 3.1.17 (см. с. 115 и далее), 3.1.24, 3.1.25, 3.1.30 (см. с. 123 и далее) показаны пробоины и серьёзные повреждения, полученные оборудованием различных КА в результате атак КМ.

В июне 2007 г. во время специального осмотра № 19 экипаж МКС доложил об обнаружении повреждения от удара элемента КМ на блоке радиатора термозащитного покрытия российского модуля «Заря», охарактеризовав его на первый взгляд как похожее на «пулевое отверстие» (см. рис. 3.1.10 и 3.1.11). Размеры разрыва наружного слоя — 6,7×3,3 см, отверстий в нижних слоях многослойного «одеяла» приблизительно 1,0×0,85 см. Последующий лабораторный анализ показал, что подобное повреждение мог нанести КО размером от 0,2 до 0,3 см, атаковавший модуль почти вскользь (~70° от нормали к поверхности покрытия) на скорости менее 6 км/с [313].

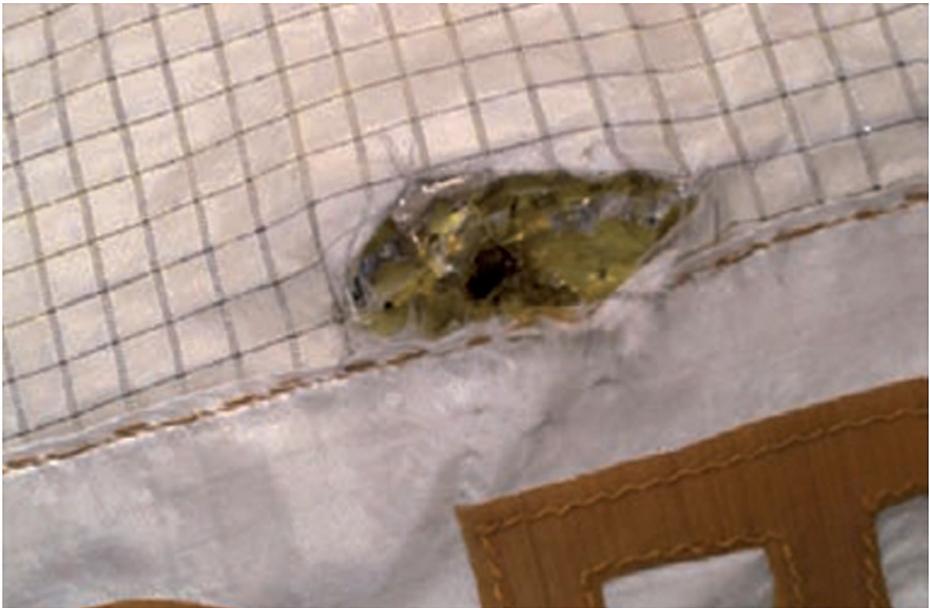


Рис. 3.1.10. Повреждение термозащитного покрытия российского модуля «Заря» на МКС, обнаруженное в июне 2007 г. во время его внешнего осмотра. Разрыв внешнего слоя имеет размеры 6,7×3,3 см, а отверстие в нижних слоях — 1×0,85 см

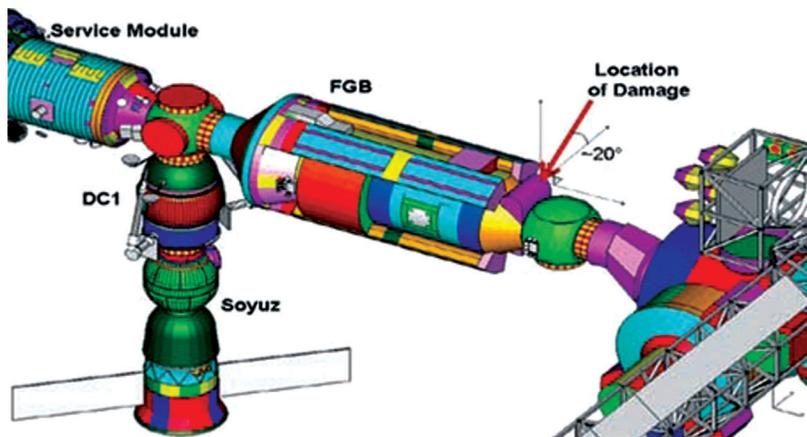


Рис. 3.1.11. Положение российского модуля «Заря» в структуре МКС и локализация повреждения

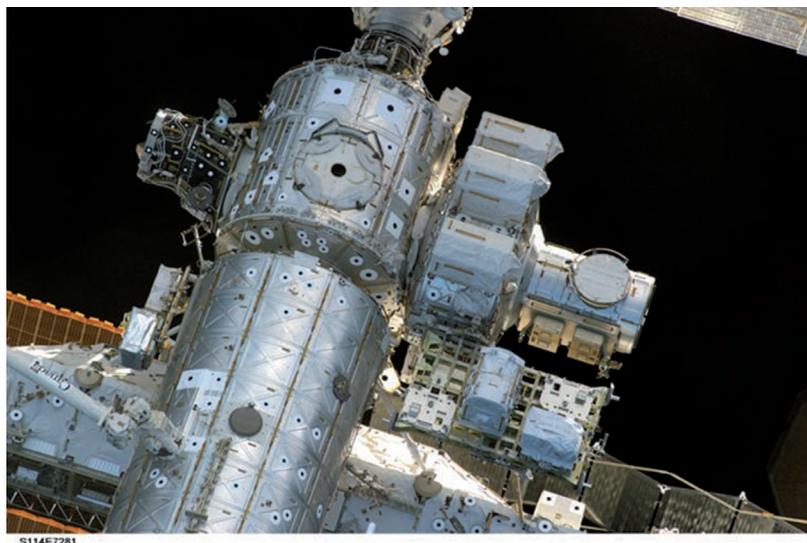


Рис. 3.1.12. Инспектированная командами миссий шаттла STS-122 и STS-123 поверхность МКС

Две команды шаттла миссий STS-122 и STS-123 к МКС при внешнем осмотре станции обнаружили целый ряд повреждений от ударов КМ [314] (рис. 3.1.12).

Одно из повреждений на алюминиевом D-образном поручне (рукоятке) довольно сильное. Это кратер диаметром около 5 мм. Кроме того, обнаружено некоторое искривление элемента, а на противоположной стороне от ударной волны образовался скол. Всё это хорошо видно на рис. 3.1.13 [314].

В апреле 2010 г. экипажем шаттла (миссия STS-131) были доставлены для лабораторного анализа на Землю две защитные алюминиевые панели переходного шлюза МКС после почти девяти лет пребывания в космосе. Размер каждой панели — 1,3×0,84 м, толщина — 0,02 м. На них обнаружено 58 кратеров от ударов КМ (24 на одной и 34 на другой) размером от 0,3 мм и более. Самый большой кратер имеет размер 1,8 мм. В кратерах обнаружены частицы силикагласса и тефлона. Возможно, это были вторичные удары осколков от солнечных панелей, повреждённых КМ.

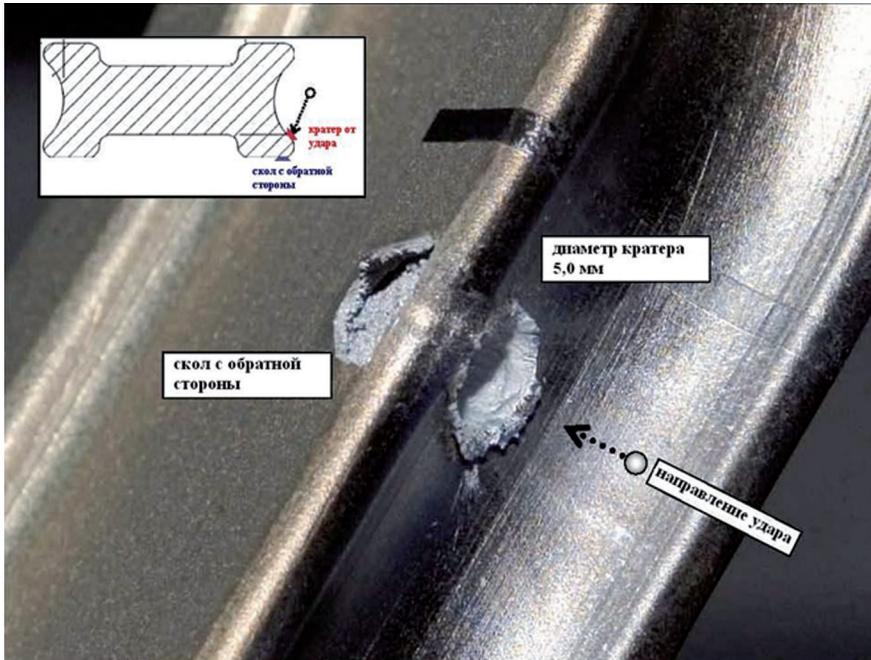


Рис. 3.1.13. Одно из повреждений МКС на поручне D

В последнее время особое внимание уделяется защите не только непосредственно МКС, но и средств доставки на неё космонавтов. Так, по требованию НАСА на бытовом отсеке КК «Союз ТМА-04М», стартовавшего 15 мая 2012 г. к МКС с новой командой, смонтировали дополнительную защиту от метеороидов и КМ, повышающую прочность брони отсека при нахождении в составе МКС. Такую же защиту устанавливают на грузовом корабле «Прогресс М-15М» [275].

В 1990 г. с помощью шаттла «Дискавери» (миссия STS-31) был выведен на околоземную орбиту высотой 570 км телескоп «Хаббл» (Hubble Space Telescope, HTS), предназначенный для внеатмосферного исследования вселенной, в частности, наблюдения электромагнитного излучения, для которого земная атмосфера непрозрачна, в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн (рис. 3.1.14). Конструкция телескопа довольно защищённая. По расчётам Института исследований космоса с помощью космического телескопа (*англ.* Space Telescope Science Institute) (STS'), её столкновения с КМ размером 5 мм и более будут происходить 1 раз в 17 лет, а с более мелким, конечно, гораздо чаще. При этом 40 % конструкции, включая солнечные батареи, скорее всего, получат лишь незначительные повреждения [236].

Интересно следующее. Телескоп «Хаббл», имея такую великую миссию, вовсе не предназначался для наблюдения КМ. Тем не менее, и в изучении техногенного засорения космоса он сыграл значительную роль, но совершенно с неожиданной стороны. Для периодических плановых инспекций, ремонтных работ, замены оборудования и прочих осмотров его многократно посещали бригады «скорой помощи» и других исследователей. При каждом таком посещении они обнаруживали многочисленные повреждения на поверхности КА. Это были следы от ударов в основном КМ. В течение длительного функционирования телескопа он многократно подвергался ударам КМ. Специалисты, скрупулёзно осматривая поверхности КА, за всё время посещений собрали бесценный, предельно конкретный, разнообразный и обширный материал о популяции КМ в области орбиты полёта телескопа «Хаббл», интегрированный за длительное время. Более того, они вернули на Землю с этого КА образцы экспонированных в космосе элементов поверхности, испещрённых кратерами, царапинами и пробинами от ударов КМ. Эти образцы подверглись ещё более тщательному обследованию в лабораторных условиях.

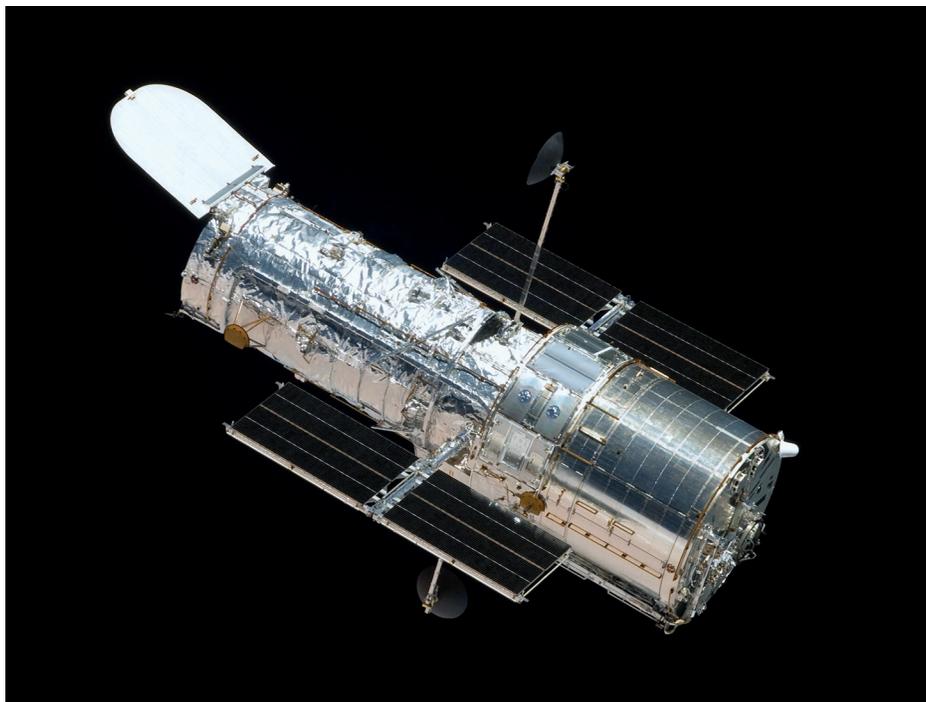


Рис. 3.1.14. Телескоп «Хаббл» космического базирования

Например, бригада космонавтов, прибывшая на межорбитальном корабле для осмотра и ремонта телескопа «Хаббл» через семь лет его полёта, успела насчитать всего 511 следов от ударов частиц КМ размером от 1 мм до 5 см и оценить некоторые повреждения. На рис. 3.1.15 представлена гистограмма распределения количества ударов КМ в обшивку и внешнее оснащение телескопа по размерам столкнувшихся с ним частиц КМ [281]. Из неё видно, что чаще всего случались столкновения телескопа с КМ размером от 1 мм до 1 см. Общий вывод из рассмотрения гистограммы: чем крупнее частицы КМ, тем реже столкновения с ними. **Однако не следует думать, что столкновения с частицами мельче 1 мм происходили так же редко, как может показаться из гистограммы. Просто следы от более мелкого мусора не вошли в зарегистрированную выборку, по которой она строилась. Жёсткий регламент работы команды в космосе не позволил её расширить в сторону более мелких следов ударов.**

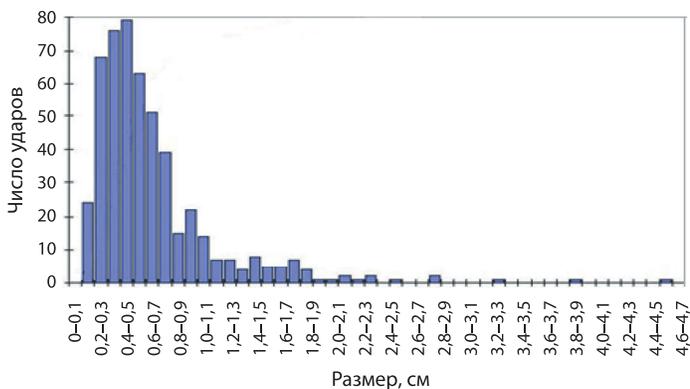


Рис. 3.1.15. Распределение количества ударов элементов КМ в оборудование космического телескопа «Хаббл» по размерам (от 1 мм до 5 см) за 7 лет полёта



Рис. 3.1.16. В центре — радиатор камеры 2, возвращённый на Землю. Снимок сделан из грузового люка шаттла «Атлантис» (англ. Atlantis), пристыкованного к HST

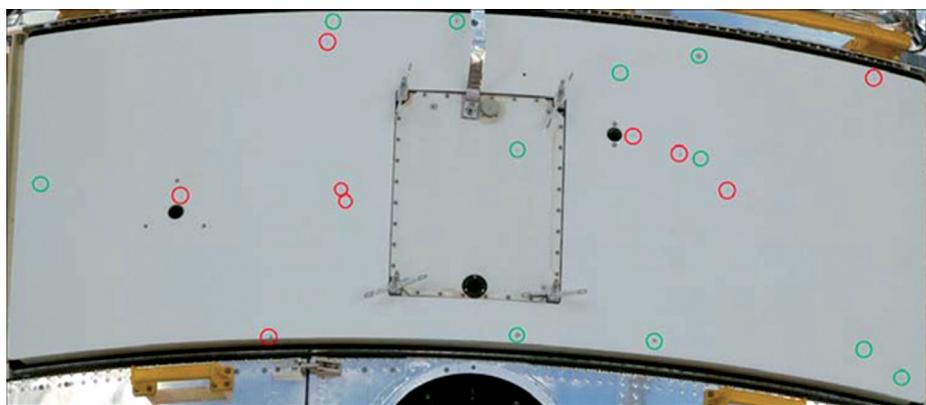


Рис. 3.1.17. Крупный план радиатора

В мае 2009 г. командой астронавтов шаттла «Атлантис» миссии STS-125 с телескопа был демонтирован и возвращён на Землю радиатор (размером 2,2×0,8 м) второй (по спецификации) широкоугольной камеры. Радиатор был экспонирован в космосе с 1993 г. Ввиду относительно большой площади поверхности радиатора и значительного времени экспозиции он может служить уникальным интегральным детектором ударов микрометеоров и КМ в области высот 560–620 км. Послеполётный анализ его поверхности с помощью цифрового микроскопа выявил 685 кратеров от ударов частиц размером 300 мкм и крупнее [241]. Расположение радиатора на космическом телескопе показано на рис. 3.1.16 и 3.1.17 [315]. На рис. 3.1.17 красными кружками помечены повреждения, обнаруженные ещё в инспекционной миссии 2002 г., зелёными — новые кратеры, выявленные в 2009 г. командой «Атлантиса».

После первых 10 лет работы телескопа «Хаббл» во время ремонтной миссии шаттла STS-61 в одной из двух его антенных тарелок **обнаружили дыру размером около 2 см**

116 **от удара КМ.** Тарелка представляет собой сотовую конструкцию толщиной 1 см из композитных материалов, покрытую графитно-эпоксидными лицевыми листами.

Во время миссии шаттла STS-103 в 1999 г. был проведён осмотр поверхности HST с фотографированием отдельных участков. Астронавт Скотт Келли сделал 99 снимков специальной камерой через иллюминатор из кабины корабля. Впоследствии исследователи выбрали для подробного анализа 571 след от ударов КМ и микрометеороидов. Наибольшее отверстие имело размер 2–3 мм, а большинство пробоин — от 1 до 2 мм. Вокруг каждой пробоины образовалась вмятина вдвое большего диаметра пробоины [316, 317].

Примеры таких повреждений показаны на рис. 3.1.18. Наибольшая плотность ударов на обследованной в этой миссии поверхности HST составила 45 ударов на квадратный метр. Это кумулятивный результат за 10 лет полёта HST.

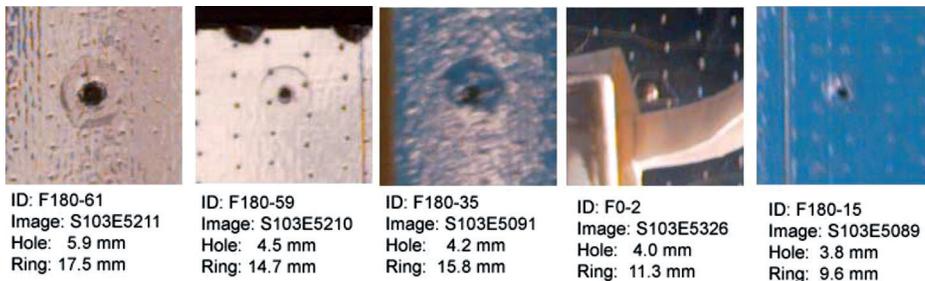


Рис. 3.1.18. Пробоины от ударов мелких частиц на поверхности HST, выявленные с помощью снимков Скотта Келли и измеренные в лаборатории НАСА

Материалы, которые удалось вернуть с HST (и не только с него), обычно тщательно исследуется в наземных лабораториях [318–320].

К настоящему времени телескоп «Хаббл» функционирует на орбите уже 32 года, и за это время с его помощью сделано множество уникальных и даже великих открытий. Но всё стареет. И «Хаббл» тоже. Тем более, на него давно не посылались инспекционные бригады (раньше этим занимались шаттлы). Тем не менее, срок его службы продлён до 2026 г.

3. На смену «Хабблу» (а пока ему в компанию) создан новый и значительно более уникальный космический телескоп «Джеймс Уэбб» (James Webb Space Telescope — JWST). Проект представляет собой результат международного сотрудничества 17 стран, во главе которых стоит НАСА, со значительным вкладом Европейского и Канадского космических агентств. Его начали разрабатывать в 1996 г. с первоначальным бюджетом менее 500 млн дол. Запустить собирались в 2007 г. И после этого запуск неоднократно переносился. Жизнь порушила все плановые сроки. Причина — неимоверная сложность возлагаемых на него задач, кстати, для решения которых ещё не существовало технологий. Их с колоссальным напряжением удалось разработать, но в результате даты запуска все равно приходилось многократно переносить, а бюджет к 2021 г. превысил 10 млрд дол. И учёные считают, что с точки зрения значимости для науки это оправдано. Наконец, тяжёлая РН «Ариан-5» с космической обсерваторией 25 декабря 2021 г. была запущена с французского полигона Куру. «Джеймс Уэбб» выведен на орбиту. По состоянию на 9 января 2022 г. телескоп успешно развернул все свои системы и перешёл в полностью операционное состояние. Во вторую точку Лагранжа телескоп прибыл в конце февраля 2022 г.

По своим главным параметрам, возможностям и качеству решения задач «Джеймс Уэбб» многократно превосходит «Хаббл». Этот телескоп в сборке с общим диаметром сегментированного зеркала 6,5 м будет вести наблюдения в видимом красном и среднем инфракрасном диапазонах частот. Благодаря отсутствию влияния атмосферы разрешающая способность телескопа в 7–10 раз больше, чем у аналогичного телескопа, распо-

ложенного на Земле. Первые научные исследования с помощью нового космического телескопа начались уже летом 2022 г. К сентябрю были получены опубликованные НАСА снимки скоплений галактик, свет от которых был испущен ими более 4,5 млрд лет назад.

Однако что касается проблем КМ в ОКП, «Хаббл» был полезнее. Дело в том, что рабочее место телескопа «Джеймс Уэбб» — гало-орбита в точке Лагранжа L_2 , которая отстоит от центра Земли почти на 1,6 млн км в сторону, противоположную от Солнца. Там повреждать его поверхность смогут только метеороиды, а послать туда инспекционную бригаду нереально. Разве что бортовые детекторы смогут сообщать нам об ударах метеороидов. Кроме того, «Джеймс Уэбб» работает в ИК-диапазоне, а «Хаббл» — в оптическом.

В результате взрыва или столкновения образуется во много раз больше осколков, чем при любом другом событии в космосе. Эти осколки занимают всё более расширяющийся спектр орбит, которые постепенно группируются в тороидальное облако, трансформирующееся тем стремительнее, чем больше разброс начальных векторов скоростей фрагментов. Всё это можно видеть на примере разрушения китайского КА «Фенгюн-1С» (см. подразд. 3.2).

Характерная особенность проблемы засорения ОКП — постоянное увеличение вероятности столкновений КО и катастрофичность столкновения даже с КО небольших размеров (из-за гигантских относительных скоростей КО во время столкновения). **Например, алюминиевый шарик массой в 1 г, движущийся со скоростью 10 км/с, несёт такую же разрушительную силу, что и 160-килограммовый сейф, летящий со скоростью 100 км/ч** [6, 268].

Высокая вероятность столкновения функционирующих КА с элементами КМ вынуждает конструкторов прибегать к весьма дорогостоящей защите — бронированию оболочки КА — и выводить в космос существенно большую массу, чем необходимо для выполнения основной задачи КА. При этом дополнительная масса сама в конце концов становится вкладом в популяцию КМ.

Но бронирование может спасти только от столкновения с мелким КМ ($\ll 1$ см) и то не всегда. Что же касается крупного КМ, то здесь никакая броня не поможет.

На сегодняшний день известны многочисленные факты столкновений в космосе. Некоторые из них привели к уничтожению дорогостоящих **действующих** КА: например, французского CERISE (*фр.* Characterisation de l'Environnement Radio-Electrique par un Instrument Spatial Embarque) (июнь 1996 г.), американского «Иридиум-33» (февраль 2009 г.), российского «Блиц» (январь 2013 г.), китайского Юньхай (*англ.* Yunhai) (март 2021 г.). Это только официально зарегистрированные и раскрученные в СМИ события, в реальности которых не может быть сомнений.

Кстати, бронировать приходится не только КА, но и такие наземные объекты, как атомные станции с учётом возможности падения на них крупных космических обломков.

Вероятность столкновения в космосе — очень растяжимое понятие: оно имеет смысл лишь при задании эпохи, интервала времени, размеров и формы КО, параметров их орбит и т.д. Например, вероятность столкновения КО диаметром 10 м с каталогизированным КО (т.е. размером примерно более 10 см) на высотах 800–1000 км в течение 1997 г. составляла 0,0004, а в течение 2000 г. (всего лишь через три года) — уже 0,01! На высоте 400 км эта вероятность в пять раз меньше.

Вероятность столкновения с КМ сильно меняется с изменением высоты. На рис. 3.1.19 [5] показано изменение потока каталогизированного КМ в области низких орбит в зависимости от высоты. Но при этом не учитывался некаталогизированный КМ, а наблюдения «Хейстека» показали, что распределение КО размером порядка 1 см аналогично распределению крупного КМ в значительной части области низких орбит (см. рис. 2.3.12 на с. 94). Например, на типичной для шаттла и МКС высоте 300–400 км поток как крупного, так и среднеразмержного КМ в 50 раз меньше, чем на высоте 1000 км. Причём на

118 этих высотах вероятность столкновения изменяется более чем в два раза, в зависимости от уровня солнечной активности. Насколько всё изменилось к настоящему времени, видно из рис. 2.3.11 (см. с. 92).

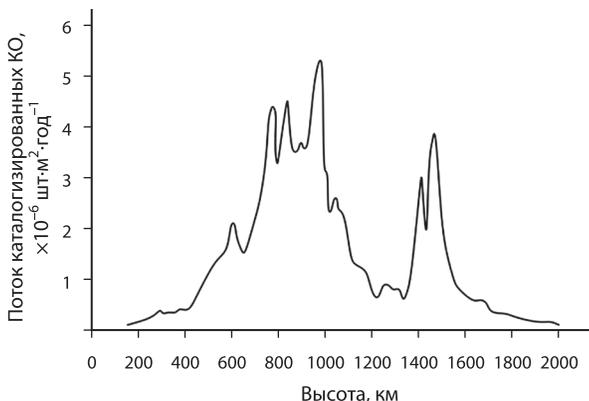


Рис. 3.1.19. Распределение потока НОКО по высоте (по данным Kaman Sciences Corporation)

В значительно меньшей степени, чем от высоты, вероятность столкновений зависит от наклона орбит. Демпфирует эту зависимость тот факт, что две круговые орбиты с одинаковыми высотами пересекаются дважды за виток независимо от их наклонов. Более детальный анализ зависимости вероятности столкновений от наклона [321] указывает на то, что она возрастает до своего максимального значения для объектов, движущихся по орбитам с комплементарными наклонами. Например, КО на орбите с $i = 80^\circ$ имеет большую вероятность столкнуться с объектами на солнечно-синхронных орбитах с наклонами 100° из-за большого количества таких КО. Аналогично, КО с наклоном орбиты 100° имеет наибольший шанс столкнуться с КО на орбите с $i = 80^\circ$. Так как очень мало орбит с наклоном более 120° , то КО с наклоном менее 60° свойственна меньшая вероятность столкновения.

Вероятность столкновения КО, движущихся по высокоэллиптическим орбитам, сильно изменяется вдоль их траектории. ВЭКО типа «Молния» почти не встречают потоков КО на своём пути, и лишь на короткое время погружаются в перигее в густонаселённую область низких орбит. Они никогда не пересекают ГЕО, а из-за значительных изменений высоты перигея все больше погружаются в область низких орбит, что сравнительно быстро приближает время завершения их орбитального существования.

Космические объекты на переходных эллиптических орбитах (GTO) периодически «ныряют» как в область низких орбит (в районе перигея на каждом витке), так и в область ГЕО (в районе апогея, когда прецессия орбиты заставляет их проходить через ГЕО). Последнее происходит гораздо реже, и это хорошо, так как они проходят через ГЕО на скорости около 2 км/с, что много больше типичной скорости столкновений на ГЕО.

Чтобы убедиться, что вероятность столкновений крупных КО прогрессивно растёт, обязательно её рассчитывать. Достаточно взглянуть на рост числа столкновений каталогизированных КО, представленный на рис. 2.4.1 (см. с. 98) сплошной чёрной кривой (до 2011 г.). График построен на основе не расчётных, а уже свершившихся событий.

Как следствие реальности и опасности столкновений и увеличения их частоты, действующим КА всё чаще приходится прибегать к манёврам уклонения от столкновений. Например, в 2009 г. только КА, контролируемым НАСА, пришлось совершить восемь манёвров [322]:

- 27 января: TDRS-3 — уклонение от РН «Протон»,
- 22 марта: МКС — уклонение от обломков РН CZ-4,

- 23 апреля: Cloudsat — уклонение от обломков КА «Космос-2251»,
- 11 мая: EO-1 — уклонение от обломков РН «Зенит»,
- 17 июля: МКС — уклонение от обломков РН «Протон»,
- 10 сентября: Space Shuttle — уклонение от КМ с МКС,
- 29 сентября: Parosol (Франция) — уклонение от обломков КА «Фенгюн-1С»,
- 25 ноября: Aqua — уклонение от обломков КА «Фенгюн-1С»,
- 11 декабря: Landsat-7 — уклонение от «Формсат-3D».

В последующие годы документально подтверждено, что уклонения от столкновений защищаемых КА (включая МКС) происходят с всё большей частотой.

Последствия техногенного засорения ОКП ярко проявились при функционировании запущенной в ноябре 1998 г. Международной космической станции (МКС), которая в 2020 г. отпраздновала 20-летие непрерывного полёта в пилотируемом режиме (рис. 3.1.20, 3.1.21, 3.1.13, см. с. 113).

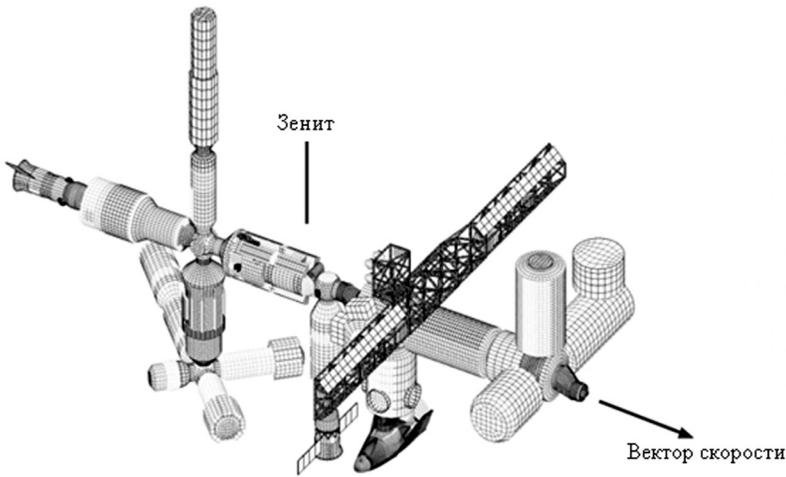


Рис. 3.1.20. Последняя (предстартовая) конфигурация МКС (без солнечных панелей). Всего она содержала 90 000 элементов. Группы элементов образуют модули. Модули формируют полную сборку МКС и определяют геометрию её поверхности [324]

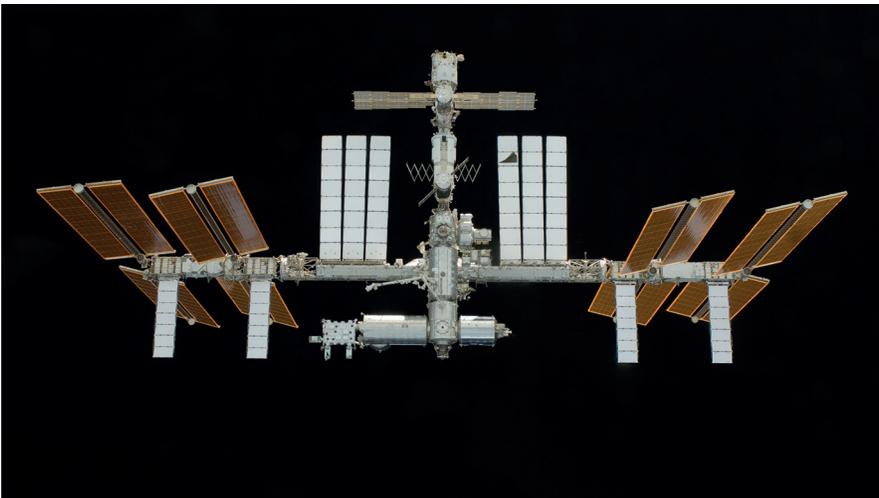


Рис. 3.1.21. Международная космическая станция

Проектные параметры МКС были следующими: общая наружная поверхность 5000 м², рабочая высота полёта 400 км, наклонение орбиты 51,6°, первоначальная масса составляла всего 20 т. К настоящему времени они существенно изменились (см. ниже). Критические узлы защищены с наибольшей вероятностью от КМ размером ≤1,4 см (кстати, это весьма условно), который составляет 99,8 % от всей популяции КМ. Вообще говоря, это некорректное заявление, так как в зависимости от скорости столкновения (а на этой высоте она может составлять от 0 до 15 км/с) опасность столкновения может меняться радикально. Ещё в 1995 г. по расчётам следовало ожидать удара КМ диаметром 1 см один раз в 71 год. Наибольшая вероятность — удар КМ размером с песчинку. Такие удары вызывают деградацию чувствительных поверхностей. Предусмотрено «хирургическое лечение» таких последствий.

Если опасность КМ со временем усилится, предусмотрено дополнительное бронирование МКС во время её функционирования. К 2012 г. масса МКС составляла более 410 т (напомним, при первоначальной 20 т), а к 2022 г. — более 440 т, размах (ширина) более 100 м. В течение первых 12 лет МКС приходилось делать в среднем по одному манёвру уклонения в год. А в течение 12 мес (апрель 2011 – апрель 2012 г.) — четыре манёвра и ещё могли быть совершены два дополнительных, если бы предупреждения были своевременными. В то же время, в 2011 г. 500 каталогизированных КО (не говоря уже о более мелких опасных) пересекли область на высоте МКС, тогда как в 2009 и 2010 гг. только по 300–400 в год [323]. Это красноречивый показатель.

К примеру, только в 2008 г. было зафиксировано 246 опасных сближений МКС с элементами КМ, в том числе 41 — в так называемой «красной зоне» (крайне опасных, т.е. когда вероятность столкновения оценивается выше 0,0001).

Свой первый манёвр ухода от столкновения с КМ станция совершила 26 октября 1999 г. (Напомним, что 3 декабря 2021 г. был осуществлён уже 30-й манёвр уклонения, 16 июня 2022 г. — 31-й, а 24 октября 2022 г. — 32-й манёвр.) В ожидавшемся сближении МКС с отработавшей верхней ступенью РН «Пегас» вероятность столкновения составляла 0,003, что намного выше «красного» предела. Для ухода от столкновения нужно было «поднять» МКС, увеличив её скорость на 1 м/с. Совместными взаимно координируемыми действиями московского и хьюстонского ЦУПов удалось переориентировать станцию. Включением двигателя пристыкованного российского модуля «Заря» на 5 с за 18 ч до максимального сближения её орбита была изменена. В результате вместо рассчитанного промаха в 1 км оба КО прошли один мимо другого на безопасном расстоянии 140 км [325].

Международная космическая станция вынуждена совершать манёвры ухода от столкновений с КМ в среднем уже более одного раза в год. О целесообразности современной стратегии реагирования на опасные сближения поговорим в разд. 5.

Продолжим хронологию манёвров. После взрыва ИСЗ «Космос-2421» в марте 2008 г. орбиты некоторых его осколков стали пересекать траекторию МКС [326]. 27 августа один из фрагментов должен был пролететь в непосредственной близости от станции (расчётный промах — 1,6 км, вероятность столкновения 1/72). В полном соответствии с бортовой инструкцией пришлось совершать манёвр уклонения от столкновения. В это время к МКС был пристыкован европейский автоматический межорбитальный модуль «Жюль Верн» (*англ.* Jules Verne). С его помощью и был совершён манёвр уклонения [327].

26 октября 2010 г. МКС опять была вынуждена «уходить» от столкновения с крупным обломком американского ИСЗ UARS (*англ.* Upper Atmosphere Research Satellite). За 10 дней до входа этого обломка в атмосферу Объединённый центр космических операций Стратегического командования США (*англ.* Joint Space Operations Center — JSpOC) и ЦУП НАСА рассчитали, что 26 октября этот обломок недопустимо близко пройдёт около МКС (может столкнуться с ней с вероятностью выше «красного порога»). За два часа до предельного сближения после подтверждения превышения предельного риска столкновения был осуществлён небольшой манёвр скоростью (+0,4 м/с), выполненный с помощью двигателя транспортного корабля «Прогресс М-07М», в то время пристыкованного к кормовому порту российского модуля МКС «Звезда» [328, 329].

20 апреля 2011 г. уже в пятый раз за последние 2,5 года МКС совершила очередной манёвр ухода от столкновения. На этот раз виновником оказался обломок размером 15–20 см от ИСЗ «Космос-2251», образовавшийся в результате его столкновения с американским КА «Иридиум-33». После того, как за несколько часов до сближения расчётная вероятность его столкновения с МКС превысила «красный порог», был совершён манёвр уклонения с помощью европейского автоматического межорбитального модуля ATV-2 (АММ, *англ.* ATV — Automated Transfer Vehicle), изменившего скорость движения станции на 0,5 м/с. Это был 12-й манёвр уклонения МКС, проведённый с октября 1999 г. До 2008 г. все манёвры имели целью уход от столкновения с целыми КА и ступенями РН. Последние пять манёвров — уклонение от столкновений с фрагментами разрушений [328, 329].

До сих пор МКС удавалось уходить от столкновений, совершая манёвр уклонения. Но в дальнейшем в связи с учащением опасных сближений с КМ на это может не хватить энергетического ресурса станции. Кроме того, невозможно предсказать сближение с малоразмерными, не каталогизированными КО, которые так же крайне опасны для МКС. Уже неоднократно экипажу МКС объявлялась аварийная готовность к экстренной эвакуации ввиду возможного столкновения с КМ.



Рис. 3.1.22. Автор (в центре) на борту МКС в Хьюстоне

Так, 12 марта 2009 г. космонавты вынуждены были (в полном соответствии с бортовой инструкцией) временно переселиться со станции в эвакуационный корабль «Союз ТМА-13» и быть готовыми к быстрой расстыковке с МКС и возвращению на Землю. Причина была в том, что сопутствующая миссии американской 3-й ступени РН «Дельта-2» болванка размером 13 см, двигавшаяся по орбите 145×4230 км, должна была пролететь в крайне опасной близости от станции, находившейся на почти круговой орбите на высоте 355 км. По инструкции, если вероятность столкновения превышает 0,0001, обычно осуществляется манёвр уклонения от столкновения. Но в данном конкретном случае быстро меняющаяся орбита болванки (из-за очень низкого перигея) приводила к большому запаздыванию оценки степени опасности и не оставляла времени на организацию манёвра. При всём этом МКС считается самым защищённым КК из когда-либо созданных.

В конце июня 2011 г. расчётная вероятность столкновения с другим не каталогизированным, но наблюдаемым обломком оказалась равной 0,003 (расчётный промах 725 м). Из-за быстрого изменения параметров эллиптической орбиты обломка было недостаточно времени на расчёт и осуществление манёвра ухода. По тревоге с Земли 28 июня команда МКС переместилась в пристыкованные тогда два транспортных корабля «Союз», которые в случае столкновения должны были отстыковаться и вернуть экипаж на Землю. К счастью, обломок пролетел мимо, не задев МКС (точнее, на расстоянии 335 м), и команда вернулась на борт станции [328, 329].

122 24 марта 2012 г. обломок российского военного спутника связи «Космос-2251» пролетел близко от МКС. Накануне из-за угрозы столкновения было принято решение об эвакуации экипажа, так как времени для осуществления манёвра уклонения было недостаточно. Космонавтов эвакуировали на «Союзы» уже в третий раз в истории МКС.

3 октября 2012 г. американские баллистики сообщили, что обломок японского спутника может опасно сблизиться с МКС и, возможно, потребует манёвра уклонения. Более позднее уточнение расчётов сняло такую необходимость. Однако через четыре дня было объявлено о новом опасном сближении МКС теперь уже с обломком разгонного блока ДМ-5 (с помощью которого в 2002 г. был выведен на орбиту российский разведывательный спутник «Аракс»), что также могло потребовать манёвра уклонения. Обломок пролетел мимо, но драматизм ситуации состоял в том, что в день его максимального сближения с МКС (04:34 МСК 8 октября 2012 г.) был запланирован старт с помощью FH Falcon-9 с мыса Канаверал (*англ.* Cape Canaveral) первого частного космического корабля Dragon для полёта к МКС. В случае манёвра МКС пришлось бы изменить время стыковки Dragon со станцией. К счастью, на этот раз обошлось, и миссия Dragon прошла успешно [330].

За последние годы частота манёвров МКС увеличилась. В декабре 2021 г. Роскосмос сообщил, что за все время эксплуатации с 1999 г. МКС совершила 32 манёвра уклонения от столкновений с КМ (последний 24 октября 2022 г.). Большая опасность для жизни экипажа из-за грозящего столкновения с КМ случилась в конце 2021 г., и на этот раз не только было объявлено предупреждение о возможной эвакуации, но и экипаж был реально перебазирован в пристыкованный модуль.

16 июня 2022 г. МКС совершила 31-й манёвр уклонения от столкновения с фрагментом КА «Космос-1408», разрушенного в результате испытания кинетического оружия 16 ноября 2021 г. [476]. Кстати, 32-й манёвр в октябре 2022 г. уклонил МКС от столкновения также от обломка КА «Космос-1408». Упомянутые манёвры МКС включают уклонения от трёх обломков КА «Фенгюн-1С» и от пяти обломков от столкновения КА «Иридиум-33» и «Космос-2251».

На рис. 3.1.23 представлены история манёвров уклонения МКС от столкновений (по годам), количество каталогизированных КО, пересекающих область орбиты МКС, и значение индекса интенсивности солнечного радиоизлучения F10,7 в функции времени.

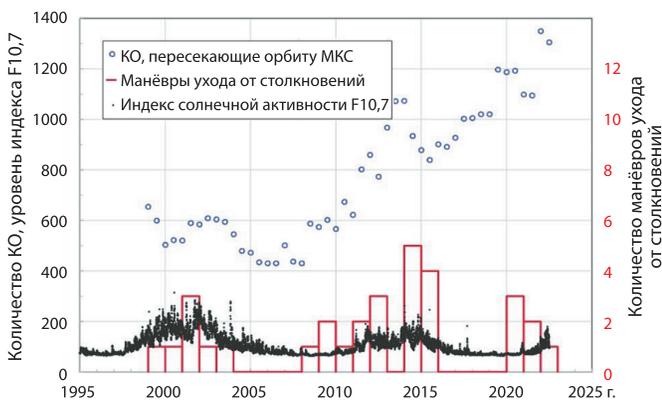


Рис. 3.1.23. История манёвров уклонения МКС, динамика частоты пересечения области траектории полёта МКС космическими объектами. Все эти процессы на фоне изменения интенсивности солнечного радиоизлучения [476]

На графике просматривается явная положительная корреляция между интенсивностью солнечной активности, количеством пересекающих орбиту МКС КО и частотой манёвров уклонения МКС от столкновений. Это естественно. Значительно важнее наблюдать на графике очевидный рост с годами засорённости области орбиты МКС крупными

Спустя десятилетие после запуска МКС специалистами отмечалось, что её конструкция пока что выдержала испытание временем и космическим мусором. От первоначально 20-тонной конструкции она превратилась в 440-тонного гиганта со всеми вытекающими отсюда последствиями. Естественно, ввиду нынешних её размеров она стала более уязвимой мишенью для КМ. Вероятность столкновений — это функция размера КА, высоты орбиты и времени существования. Следовательно, она велика для МКС по всем этим параметрам.

Конечно же, поверхность МКС никогда не была обследована полностью. Тем не менее, в результате проведённых осмотров уже зарегистрирован большой объём повреждений от сверхскоростных ударов КМ. Кроме обычных и типичных следов ударов на больших по площади солнечных панелях, обнаружено множество кратеров, царапин, эрозий на иллюминаторах, поручнях, термопокрытиях, радиаторах, стыковочных портах и т.д. Члены экипажа МКС при плановой проверке обнаружили 12 мая 2021 г. пробоину от КМ в роботизированной руке МКС.

Да и сама МКС не такая уж безобидная овечка. За время своего существования она породила множество сопутствующего КМ (в том числе и крупного), из которого около 70 фрагментов были каталогизированы. Это и потерянные камеры, стаканы, сумка с инструментами, а также намеренно выброшенные за ненадобностью оборудование, инструменты, старые комплекты и другие предметы — в среднем 10 объектов в год. Это не считая более мелкого КМ. К счастью, весь этот мусор продолжал существовать на орбитах не более 15 мес [331, 332].

Сами американские шаттлы, находясь на орбите, по команде НАСА совершали до 2008 г., по крайней мере, восемь раз манёвр уклонения от столкновения с крупным КМ [281]. Причём ещё в конце ноября 1991 г., когда на угрозы со стороны КМ мало кто обращал внимание, шаттл миссии STS-44 настолько приблизился к опасному коридору полёта советской отработавшей ступени РН, что вынужден был совершить манёвр уклонения, запустив сразу два маневровых двигателя на 7 с.

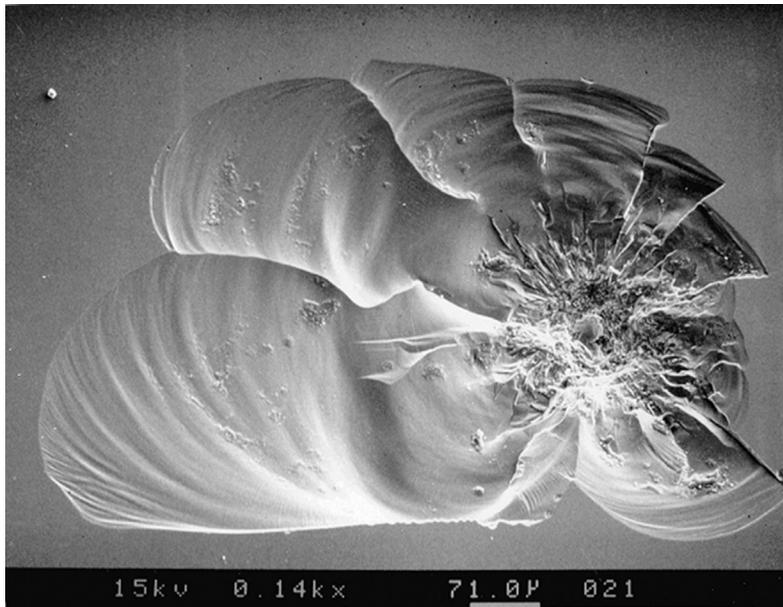


Рис. 3.1.24. Кратер на иллюминаторе шаттла (миссия STS-50) от удара частицы Al_2O_3 , выброшенной из сопла твердотопливного двигателя

Шаттлы неоднократно подвергались ударам частиц размером более 1 мм. В первых 33 полётах они получали повреждения черепичного покрытия снизу. Несколько термозащитных иллюминаторов пришлось заменить из-за повреждений. В 1983 г. во время миссии шаттла STS-7 удар всего лишь кусочка краски размером 0,2 мм при относительной скорости 3–6 км/с привёл к образованию 4-миллиметрового кратера в иллюминаторе корабля, и его также пришлось заменить.

При осмотре иллюминатора № 6 миссии STS-50 был обнаружен кратер диаметром 1 мм от удара частицы размером 100–150 мкм (рис. 3.1.24). Химический и спектральный анализы показали, что этот след был оставлен продуктом работы твердотопливного двигателя состава Al_2O_3 [333].

В июне 1999 г. шаттл «Дискавери» (миссия STS-96) осуществлял первую стыковку с МКС. Послеполётная инспекция выявила множество повреждений на поверхности шаттла, 64 из которых были исследованы очень тщательно специальными методами. Размер кратеров колебался от 0,125 до 4,0 мм. На иллюминаторе командного отсека было выявлено 50 повреждений. Материал КМ, вызвавшего эти повреждения, включал кусочки краски (50 %), алюминий (40 %) и нержавеющую сталь (10 %). На панелях радиатора и гибком изоляционном поверхностном слое было обнаружено 12 следов от ударов КМ и метеороидов. В кратерах было выявлено присутствие частиц краски и алюминия [334].

После полёта шаттла следующей миссии STS-97 на иллюминаторе кабины экипажа, кроме мелких, оказалось довольно сильное повреждение от удара частицы из нержавеющей стали (рис. 3.1.25).

Послеполётное обследование шаттла «Дискавери» (миссия STS-114) выявило 41 след от ударов микрометеороидов или КМ. 14 ударов пришлось на лобовые иллюминаторы модуля экипажа. Повреждёнными оказались пять окон из восьми. Самый крупный кратер обнаружен на окне № 4. Его размер — 6,6×5,8 мм. Он был вызван ударом частицы диаметром 0,22 мм. Окно пришлось заменить.

Радиаторы дверей отсека полезного груза выдержали 19 ударов КМ. Один из ударов вызвал перфорацию диаметром 0,61 мм в лицевом щите. Размер частицы, виновной в этом, оценён в 0,4 мм (предел материала щита составляет 0,5 мм). На внешнем покрытии двери обнаружено повреждение размером 5,8×4,5 мм [336].

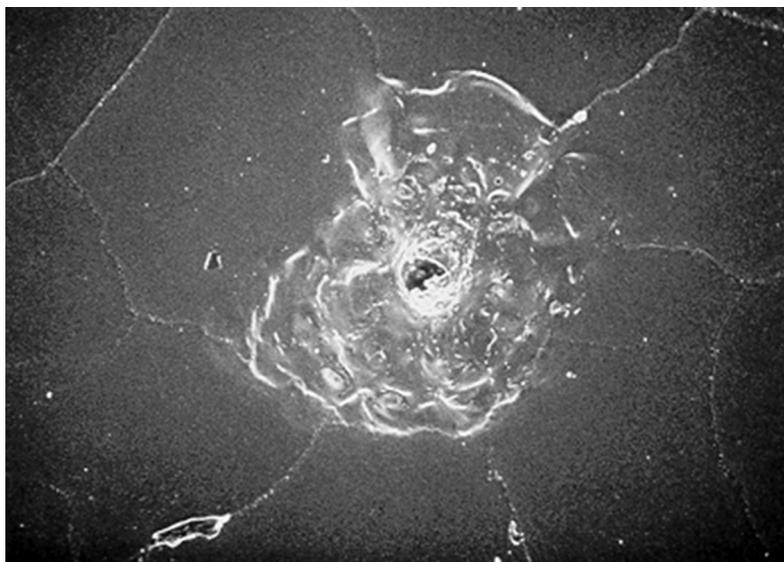


Рис. 3.1.25. Повреждение на иллюминаторе кабины шаттла (миссия STS-97) от удара частицы из нержавеющей стали [335]

После возвращения из полёта шаттла STS-115 в 2007 г. в Космическом центре имени Джона Фицджеральда Кеннеди (*англ.* John Fitzgerald Kennedy Space Center) при обследовании правого борта была обнаружена крупная пробоина на 4-й панели радиатора двери грузового отсека [337]. Диаметр пробоины — 2,74 мм. Рядом с пробоиной оказалась трещина длиной 6,8 мм (рис. 3.1.26). Надо отметить, что после каждого возвращения шаттла НАСА проводила тщательный лабораторный анализ повреждений, полученных от ударов КМ [338].

В августе 2007 г. во время полёта шаттла «Эндевор» (*англ.* Endeavour) миссии STS-118 к МКС были пробиты насквозь задняя левосторонняя панель радиатора системы охлаждения и лежащее под ней термозащитное покрытие. Толщина панели радиатора 12,7 мм. Размер входного отверстия от удара — 7,4×5,3 мм (рис. 3.1.27). Столкнувшийся с панелью КО разрушился при ударе, и его осколки нанесли множественные повреждения вокруг основного отверстия. Пробившие панель частицы повредили затем и термозащитное одеяло (рис. 3.1.28). Послеполётный анализ показал, что столкнувшийся с шаттлом элемент КМ состоял из титанового сплава со следами цинка и имел размер от 1,5 до 2 мм [339].



Рис. 3.1.26. Пробоина и трещина на панели радиатора шаттла миссии STS-115

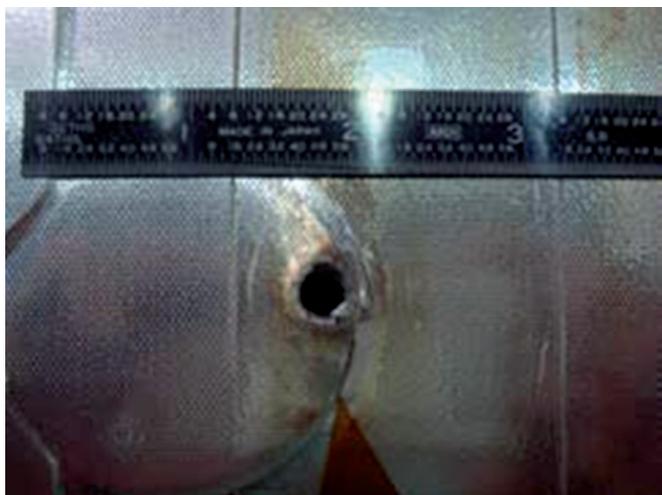


Рис. 3.1.27. Повреждение панели радиатора шаттла «Эндевор» миссии STS-118 к МКС



Рис. 3.1.28. Повреждения термозащитного одеяла под панелью радиатора

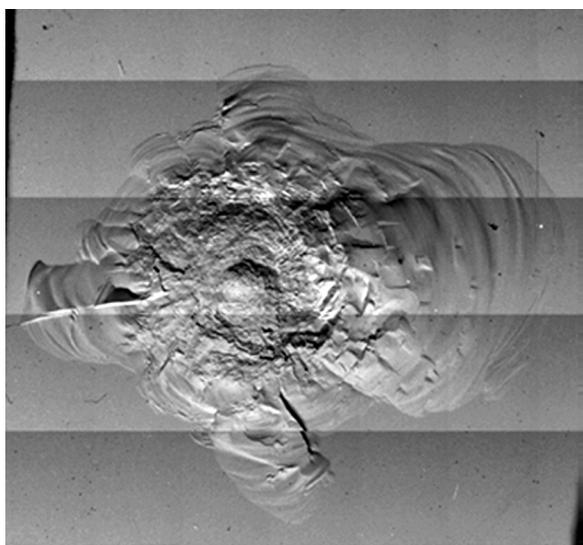


Рис. 3.2.29. Крупный кратер на иллюминаторе шаттла «Эндевор» миссии STS-126

В ноябре 2008 г. во время полёта шаттла «Эндевор» миссии STS-126 к МКС от удара частицы КМ на иллюминаторе образовался кратер размером $12,4 \times 10,3$ мм глубиной 0,63 мм. Это был наибольший кратер из всех, обнаруженных на иллюминаторах шаттлов (рис. 3.1.29) [340].

В результате послеполётной инспекции шаттла «Дискавери» миссии STS-128 было обнаружено 14 следов ударов на иллюминаторах кабины команды, 16 следов на переднем срезе крыла и носовой поверхности и 21 на панели радиаторов контура охлаждения. Среди них был кратер, представляющий особый интерес. Хотя он был и не самым крупным, но оказался в стратегически важной точке — прямо на алюминиевой защитной пластине, непосредственно прикрывающей трубы контура охлаждения электронного оборудования. Если бы не эта пластина, была бы пробита труба и произошла утечка фреона. В этом случае по полётным правилам шаттл должен был бы прервать миссию, вернуться и приземлиться в течение 24 ч. Иными словами, миссия была бы сорвана. Кстати, последующее моделирование подтвердило, что без защитной пластины контур охлаждения был бы пробит [341, 342] (рис. 3.1.30, 3.1.31). Подробно история поврежденных поверхностей шаттлов с 1992 по 2000 г. изложена в публикации [349].

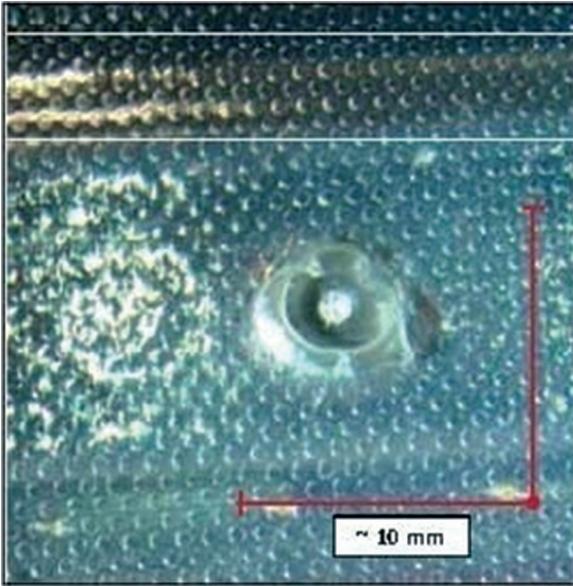


Рис. 3.1.30. Кратер от удара КМ в защитную пластину контура охлаждения (шаттл «Дискавери», *англ.* Discovery, миссия STS-128)

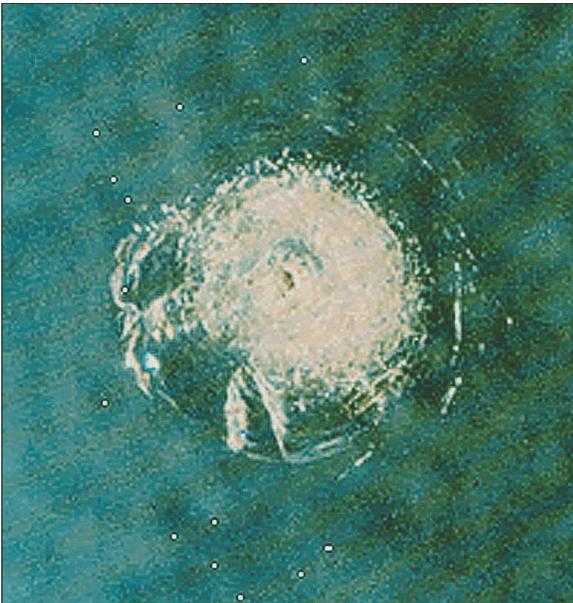


Рис. 3.1.31. 4-миллиметровый кратер от удара 0,2 мм кусочка краски в иллюминатор шаттла «Дискавери»

Есть и военные аспекты последствий техногенной засорённости ОКП. Во-первых, в результате столкновений с КМ КА военного назначения уже несут ощутимый ущерб, как это было, например, с очень дорогим экспериментальным КА Минобороны Франции CERISE в 1996 г. Довольно часто происходят сбои в работе военных КА, причины которых операторы часто затрудняются объяснить. В конце концов, большинство экспертов склоняется к версии столкновения с КМ. (Многие такие столкновения не регистрируются.)

Во-вторых, незарегистрированное (недоказанное, «неофициальное») столкновение военного КА с элементом КМ, приведшее к внезапному прекращению его функционирования или к выходу из строя хотя бы части его аппаратуры, может быть воспринято государством-владельцем (горячие головы всегда найдутся) как нападение со стороны другого государства и спровоцировать военный конфликт. **А это уже серьёзное военно-политическое последствие.**

В-третьих, можно сформулировать и обобщённое системное последствие военного характера. **С военной точки зрения, популяция КМ представляет собой мощную неуправляемую независимую орбитальную группировку, которая уже сейчас представляет значительную опасность для функционирования не только отечественных и иностранных космических аппаратов, но и наземных объектов военного назначения** [2]. Эта группировка не принадлежит никому, поскольку не имеет своего оператора («кроме Ньютона и Кеплера», точнее, их законов). Известны случаи, когда элементами КМ был нанесён непоправимый ущерб космическим аппаратам военного назначения различных государств. Известно также много примеров, когда действительную причину ущерба установить не удалось.

С другой стороны, человечество под этим (причём прогрессивно нарастающим) гнетом КМ стало разрабатывать способы борьбы с ним. Однако принципиально эти способы могут применяться оператором не только к КМ, но и к действующим КА. В отличие от КМ, они являются активными и имеют своих конкретных операторов, представляющих конкретные государства и при определённых намерениях своих операторов, тоже могут рассматриваться как космическое оружие. Это ещё одна опасность (как бы сбоку и как бы во благо!).

Из сказанного следует, что исследование проблем, связанных как с крупным, так и с мелким КМ, представляется весьма актуальной и ответственной задачей мирового научного сообщества.

3.2. История взрывов и столкновений в космосе

Самое первое разрушение, причиной которого стал взрыв на орбите, произошло 29 июня 1961 г. [343]. Верхняя ступень американской РН «Топ-Эйблстар» (англ. Thor-Ablestar) взорвалась примерно через час после того, как вывела на орбиту КА «Транзит-4А» (англ. Transit) вместе с двумя другими научными спутниками «Инджун-1» (англ. Injun) и «Солрад-3» (сокр. от «солнечное излучение», англ. SOLar RADiation), с образованием приблизительно 300 обломков. А вся официальная орбитальная популяция в то время составляла всего 54 КО (!). Тогда ещё не существовало систем ККП, обнаружение и сопровождение космических объектов осуществлялось практически эпизодически отдельными СН или операторами нескольких действующих КА. Это событие выступило зародышем главного механизма последующего стремительного засорения космического пространства.

На середину 2019 г. официально было зарегистрировано более чем 250 разрушений космических объектов. С 1984 г. НАСА регулярно публикует историю разрушений КО на орбитах, которую можно найти в формате Adobe PDF на веб-сайте программного подразделения НАСА по проблемам техногенного засорения космического пространства [344].

К 1995 г. уже было известно о 120 взрывах на орбитах (серьёзных столкновений КО тогда ещё не было зарегистрировано), которые привели к образованию более 8000 каталогизированных (т.е. крупных) фрагментов. К 2006 г. их было зафиксировано уже 190, а к 2011 — более 200. (Кстати, в 2011 г. исполнилось 50 лет со времени первого зарегистрированного взрыва техногенного КО.) Одних только зарегистрированных преднамеренных взрывов КА и верхних ступеней РН с 1964 г. произошло 56 и 2, соответственно [345]. На самом деле их (и взрывов, и фрагментов) было гораздо больше. Многие не удалось зарегистрировать.

До разрушений КА «Фенгюн-1С», «Иридиум-33» и «Космос-2251» фрагменты разрушений КО составляли около 40 % от объёма всего каталога КО. После дефрагментации указанных спутников доля фрагментов в каталоге подскочила до 57 % и продолжает расти в результате обнаружения все новых и новых осколков. Только драматические разрушения КА и РН 2007–2009 г. добавили в ОКП (и в каталог КО) более 5000 крупных КО (размером более 10 см). А из не каталогизированных, но сопровождаемых СККП США КО размером более 1 см подавляющее большинство (приблизительно 95 %) составляют осколки от разрушений КО. Исследования показывают, что такая же доля приходится на фрагменты разрушений и среди всей совокупности КО размером более 1 см (т.е. не только среди сопровождаемых СККП). Более 4 % всех космических миссий в той или иной степени сопровождались разрушениями КА или РН [346].

Здесь мы остановимся только на официально зарегистрированных, самых ярких и имевших серьёзные последствия событиях такого рода.

С 1963 по 1982 г. СССР провёл 23 испытания противоспутникового оружия, из которых семь завершились успешным перехватом. В результате образовалось 736 каталогизированных осколков, из которых до сих пор на орбитах остаются более 30 % [7, 239, 347, 348, 350].

С 1964 г. произошла целая серия катастроф КА, имевших радионуклеиды на борту, которые в результате достигли земной поверхности.

Закончился аварией РН запуск американского космического аппарата Transit VBN-3 в апреле 1964 г. После разрушения аппарата на высоте 80 км около 100 г плутония было рассеяно в атмосфере.

Для сравнения заметим, что в мае 1968 г. во время неудачного запуска американского экспериментального метеоспутника Nimbus-B (*англ.* Nimbus) два плутониевых генератора упали в Атлантический океан. Однако их достали со дна и (это вовсе не шутка) использовали повторно на следующем аппарате этой серии.

В феврале 1969 г. в результате аварии РН «Протон-К» при попытке запуска первого советского лунохода Е-8 радиоизотопный генератор на полонии-210 упал в районе полигона Байконур. Как рассказывает В.П. Долгополов — бывший сотрудник Научно-производственного объединения (НПО) им. С.А. Лавочкина, генератор нашли солдаты и обогревались им в казарме.

В апреле 1970 г. при возвращении модуля Aquarius лунной экспедиции Apollo-13 контейнеры с плутонием упали в Тихий океан восточнее Новой Зеландии.

В январе 1978 г. потерпел аварию советский спутник морской космической разведки серии РОРСАТ «Космос-954» с бортовой ядерной энергетической установкой, что привело к радиоактивному загрязнению обширного района на севере Канады. Об этом подробно было рассказано в подразд. 3.1.

Подобная катастрофа произошла в феврале 1983 г. со спутником той же серии «Космос-1402». Но на этот раз «повезло» в том смысле, что остатки активной зоны реактора упали не на землю, а в Атлантический океан.

США начали разрабатывать обитаемую космическую лабораторию Skylab в 1973 г. Это была весьма массивная конструкция массой 77 т, длиной 24,6 м, с максимальным диаметром 6,6 м и внутренним объёмом 352,4 м³. Лаборатория была запущена 14 мая 1973 г. для проведения технологических, астрофизических, биолого-медицинских исследований, а также для наблюдения земной поверхности. С мая 1973 г. по февраль 1974 г. на борту станции работали три экспедиции. Полная стоимость программы Skylab составила 3 млрд дол. в ценах того времени. 11 июля 1979 г. Центр управления полётами сориентировал ОС для входа в атмосферу с точкой затопления в 1300 км южнее Кейптауна. Но ошибка в расчётах в пределах 4 % и непредусмотренное более медленное разрушение станции привели к смещению точки падения. Часть обломков упала и была обнаружена

130 в Австралии. С тех пор австралийское руководство очень болезненно реагирует на падение космических обломков на его территорию [351, 352, 236].

Советский военный навигационный ИСЗ «Космос-1275» массой 700 кг вскоре после запуска неожиданно взорвался в июле 1981 г. на высоте 977 км. Взрыв породил более 300 каталогизированных фрагментов и множество мелких. Характер распределения осколков и их скоростей указывал на столкновение с КМ как наиболее вероятную причину [353, 191] (официальная версия — взрыв аккумуляторной батареи).

В июне 1983 г. шаттл «Челленджер» (*англ.* Challenger) (миссия STS-7) столкнулся с кусочком обогащённой титаном краски размером 0,2 мм при относительной скорости 5 км/с. В результате на иллюминаторе образовался кратер диаметром 4 мм. Команда шаттла заметила повреждение во время полёта и сразу же сообщила в ЦУП.

13 ноября 1986 г. третья ступень РН «Ариан V-16» взрывается над восточной Африкой и образует облако осколков, которое тут же зарегистрировал американский радар в Турции. В феврале 1987 г. было каталогизировано 465 фрагментов этого взрыва. Они образовали вокруг Земли кольцо шириной 30°, наклонённое к экватору под 98,7°, с диапазоном высот от 500 до 1400 км. Кольцо расширялось на 10° в месяц. К этому времени уже стало очевидным, что данный взрыв РН «Ариан-V-16» оказался самым «урожайным» на осколки разрушением в предшествующей истории взрывов. Несколько позднее директор Центра астрофизики и космической астрономии (*англ.* Center for Astrophysics and Space Astronomy, CASA) в Колорадо Роберт Мартин Калп (*англ.* Robert Martin Culp) заявил, что в результате этого взрыва образовалось более 500 каталогизированных фрагментов и 5000 более мелких осколков, способных причинить существенный ущерб действующим КА [354, 236].

Но этот рекорд продержался недолго. Спустя несколько месяцев взрыв советского КА «Космос-1813» породил 850 каталогизированных обломков.

В мае 1991 г. произошёл взрыв второй ступени американской РН «Дельта-2910» (выведшей в своё время на орбиту КА «Нимбус-6») с образованием 237 каталогизированных обломков.

21 февраля 1992 г. на почти геосинхронной орбите взорвалась ступень Транстэйдж (*англ.* Transtage) американской РН «Титан IIIС», образовав облако более чем из 500 осколков размером более 2 см [230].

В июне 1996 г. взорвался вспомогательный разгонный блок (топливо — гидразин) американской РН «Пегас». В результате образовалось 713 крупных осколков. С помощью радаров «Хейстек» и «Голдстоун» удалось зафиксировать ещё порядка 300 000 осколков размером более 4 мм [355]. С 1961 г. по 2006 г. это был один из самых «урожайных» на осколки взрывов в космосе. Блок имел сухую массу всего 97 кг, и образование такого большого количества наблюдаемых СККП США осколков стало некой загадкой, поскольку шло вразрез с предсказаниями всех имевшихся моделей разрушений. Положительным следствием этого события было решение корпорации OSC (*англ.* Orbital Sciences Corporation) существенно переработать проект вспомогательного гидразинного разгонного блока РН «Пегас», чтобы исключить повторение подобных взрывов.

Самым знаковым событием 1996 г. в космосе было столкновение 24 июля очень дорогого французского (британской конструкции) военного экспериментального микроспутника (масса 50 кг) радиоэлектронной разведки CERISE с фрагментом РН ЕКА «Ариан». Это было первым официально зарегистрированным столкновением двух каталогизированных космических объектов. Фрагмент перебил 6-метровую штангу с гравитационным датчиком, после чего нормальное функционирование космического аппарата стало невозможным. Столкновение произошло на высоте примерно 660 км при относительной скорости 14,8 км/с (около 50 000 км/ч) [356]. Происшествие не закончилось международным скандалом только потому, что оба столкнувшиеся КО имели французское происхождение.

16 ноября 1996 г. с помощью трёхступенчатой РН «Протон-К» был запущен КА «Марс-96» с разгонным блоком. Если бы все пошло по программе, автоматическая межпланетная станция (таков был статус «Марс-96») должна была выйти на гелиоцентрическую орбиту с большой полуосью 185 759 млн км, эксцентриситетом 0,2, наклоном 2,11°, периодом 505 сут. Продолжительность полёта к Марсу составила бы 300 сут. Но... Включение разгонного блока 17 ноября прошло нештатно. Перевод КА на высокоэллиптическую орбиту выполнен не был. Космический аппарат и разгонный блок разделились и остались на низких орбитах. По данным Российской СККП, КА «Марс-96» сошёл с орбиты 17 ноября, разгонный блок — на сутки позже, его обломки упали в южной части Тихого океана южнее Новой Зеландии. А вот с местом падения КА существует большая неопределённость. По данным разных расчётных групп, вход аппарата в атмосферу произошёл либо над Тихим океаном, либо над Южной Америкой (Чили, Французская Гвиана), либо над Атлантикой. Вот такая иногда бывает баснословная неопределённость при расчётах места и времени падения крупных КО (это к вопросу о моделях). Вторая ступень РН упала в Горном Алтае и при этом убила корову [357, 358]. Это пока единственная зарегистрированная информация об убийстве живого существа прилетевшим из космоса техногенным объектом.

В средствах массовой информации широко освещалось столкновение орбитальной станции «Мир» с КА «Прогресс М-34» 25 июня 1997 г. Орбитальная станция получила при этом значительные повреждения, и возникла определённая угроза безопасности её экипажа. Удар пришёлся и на солнечные батареи модуля «Спектр», в которых при визуальном осмотре была найдена большая дыра. Образовались и фрагменты, один из которых был вскоре обнаружен СККП США. Однако оставалось неясным, принадлежал ли он ОС «Мир» или КА «Прогресс М-34» [359].

Российский «Космос-2313» массой 3 т выполнил манёвр завершения миссии 22–23 апреля 1997 г. и пребывал в состоянии естественного погружения в атмосферу, как вдруг 26 июня на высоте 285 км было зафиксировано его разрушение. Вскоре было обнаружено 90 фрагментов, большинство которых сгорело в атмосфере к 30 июня [236, 359]. Причины разрушения не были установлены.

Российский разведывательный спутник «Космос-2343» массой 6,5 т завершил свою четырёхмесячную миссию, и 16 сентября 1997 г. был осуществлён его самоподрыв на высоте 230 км над Камчаткой. Три из пяти предыдущих ИСЗ этой серии («Космос-2101, -2163 и -2225») были подорваны приблизительно в том же районе. В течение 48 ч СККП США удалось каталогизировать 32 фрагмента КА «Космос-2343». Некоторые из них имели апогей орбиты около 900 км, что указывает на скорость отделения при взрыве порядка 200 м/с. Часть обломков вскоре сгорела. СККП США все же каталогизировала 180 фрагментов. Была произведена оценка угрозы с их стороны для ОС «Мир». Расчёт и моделирование показали, что ни один из опасных фрагментов не попал в «брус риска» размером 4×10×4 км с центром в ОС «Мир», хотя некоторые обломки пролетели на расстоянии 20 км от станции [360].

В феврале 1998 г. в течение одной недели взорвались подряд три верхних ступени РН. Почти полутонная третья ступень РН «Циклон», летавшая в космосе около 10 лет, взорвалась 15 февраля и образовала более 80 фрагментов. 17 февраля пришёл черед взорваться девятилетней третьей (верхней) ступени РН «Ариан-4» массой 1200 кг (эту серию тогда не пассивировали). Наконец, 21 февраля произошёл взрыв верхней ступени японской РН COMETS H-II, которая так и не смогла выйти на заданную программой переходную высокоэллиптическую орбиту. Причина — неполадки в работе двигателя [361].

Самым первым взрывом 2000 г. был мощный взрыв 1000-килограммовой третьей ступени китайской РН «Великий поход 4» (*англ.* Changzheng, Чанчжэн сы хао цзя, CZ-4, или LM-3 (*англ.* Long March)). Он породил 300 крупных обломков, которые были каталогизированы [362].

Но на этом его история не закончилась. Один из обломков от этого взрыва через пять лет, т.е. в январе 2005 г. столкнулся с последней ступенью американской РН «Тор-2А»

132 (англ. PGM-17 Thor) [311]. (Итак, имеем типичный пример каскада.) Корпус РН (верхняя часть последней ступени «Тора») был сравнительно небольшим: в поперечном сечении — 1 м^2 (рис. 3.2.1, 3.2.2).

А фрагмент китайской РН был и того меньше — $0,06 \text{ м}^2$.

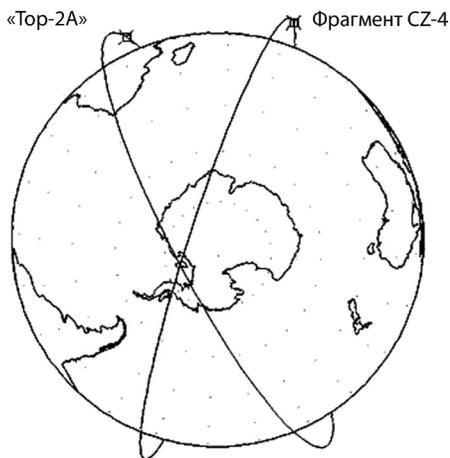


Рис. 3.2.1. Случайное столкновение двух КО произошло в Южном полушарии на высоте 885 км

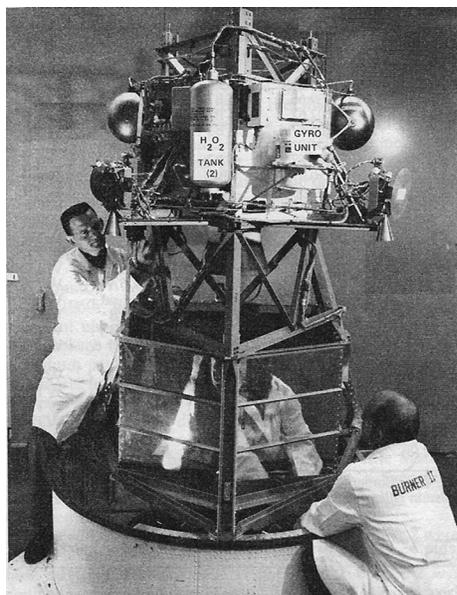


Рис. 3.2.2. На стенде: верхняя часть последней ступени РН «Тор 2А», участвовавшая в столкновении

По аэродинамическим причинам в перигее орбит происходили взрывы российских КА серий «Молния-3» и «Око» в 2000 и 2001 гг.

23 марта 2001 г. после 15 лет исторического полёта и плодотворного функционирования 135-тонная российская ОС «Мир» была успешно затоплена в Тихом океане.

21 ноября 2001 г. российский КА «Космос-2367» массой 3 т испытал значительное разрушение всего 30 километрами выше орбиты МКС с образованием 200 крупных обломков, которые были каталогизированы, и ещё более 100 мелких, наблюдавшихся специальными средствами; 40 % фрагментов оказались на орбитах, пересекавших орбиту МКС. НАСА пришлось оценивать риски не только для МКС, но и для предстоящего через несколько дней полёта шаттла миссии STS-108. При этом учитывалось, что шаттл не так хорошо защищён от мелких осколков, как МКС. К счастью, на этот раз всё обошлось. Тогда это был уже 20-й КА данной серии, испытавший разрушение.

Спустя две недели в окрестности перигея своей орбиты взорвалась «Молния-3-35», образовав более 20 обломков.

19 декабря взорвалась четвертая ступень индийского спутника PSLV (англ. Polar Satellite Launch Vehicle) с образованием более 300 обломков. Это было первое официально зарегистрированное разрушение индийского КО. Причина взрыва неизвестна, но по предположению — это остатки топлива в баках или сжатый газ. Всего в 2001 г. было зафиксировано девять разрушений КО [363].

Регулярно происходили взрывы двигателей осадки топлива с российских РН серии «Протон». Уже к 2001 г. насчитывалось 25 таких взрывов. А к 2022 г. их суммарное количество приближается к 60.

В 2002 г. ряд СН зафиксировал неожиданное заметное изменение орбиты недействующего 30-летнего ИСЗ «Космос-539» и отделение от него фрагмента размером 20–50 см, который был каталогизирован. Отделение произошло со скоростью 19 м/с. Наиболее правдоподобное объяснение, с которым согласилось большинство специалистов, — столкновение ИСЗ с небольшим КО [364].

В феврале 2002 г. наблюдалось разрушение верхней ступени ракеты-носителя «Ариан-4» на высокоэллиптической орбите 250×26550 км с образованием, по крайней мере, девяти фрагментов. Это было шестое известное разрушение третьей ступени РН «Ариан-4» [365].

В 2003 г. наблюдалось шесть разрушений. В трёх случаях взорвались двигатели осадки топлива ДМ системы обеспечения запуска (СОЗ) РН «Протон». В результате столкновения с КМ отделились фрагменты от космического телескопа «Хаббл», французского КА SARah (по-видимому, фрагмент его антенны) и американского КА NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) [366].

Известен факт внезапной разгерметизации 10 августа 2003 г. приборного контейнера на КА «Космос-2392» в результате пробоя радиатора посторонним неустановленным предметом.

В феврале 2004 г. произошло разрушение российского «Космос-2383». Обнаружено 50 фрагментов, из которых 13 было каталогизировано. Многие из обломков пересекли орбиту МКС, что вызвало серьёзное беспокойство у операторов [367].

Первое значительное разрушение 2006 г. случилось 4 мая. Неожиданно взорвалась после 20 лет космического полёта третья ступень советской РН «Циклон» (сухая масса 1360 кг), много лет пребывавшая в «дремлющем» состоянии. Образовалось более 50 фрагментов (размером более 5 см), из которых 49 было официально каталогизировано. Примерно через месяц (точнее, 10 июня) взорвался после 17 лет полёта двигатель осадки топлива 4-й ступени (разгонного блока) РН «Протон». Взрыв породил более 70 обломков. Это было 34-е событие такого рода с 1988 г. В обоих случаях наиболее вероятной причиной взрыва оказались остатки топлива в баках.

В феврале произошло менее заметное событие — разрушение старейшего (пятого по счёту) ИСЗ «Авангард-3», соединённого с третьей ступенью РН, с общей массой всего 45 кг. От него отделился только один фрагмент. Главными возможными причинами разрушения были признаны 1) возрастная деградация материала поверхности сборки и 2) удар мелкого метеороида или частицы КМ [368].

29 марта 2006 г. была зафиксирована серьёзная авария на российском телекоммуникационном КА «Экспресс-AM11» в точке стояния 96,5° в.д. на геостационарной орбите. В результате в 17 субъектах Федерации с 15 млн жителей прекратилась трансляция общероссийских и коммерческих телепрограмм, частично нарушилась междугородная телефонная и мобильная связь и доступ в интернет. Аппарат был создан в НПО прикладной механики им. М.Ф. Решетнева (НПО ПМ) совместно с французской компанией Alcatel и введён в эксплуатацию 1 июля 2004 г. Ожидалось, что «Экспресс-AM11» без проблем проработает на орбите как минимум 12 лет.

Внезапная гибель новейшего спутника связи — случай уникальный, хотя и не единственный. Из НПО ПМ пришло следующее сообщение с явным указанием на столкновение с КМ как на вероятную, причём убедительно обоснованную причину аварии (редкий случай для ГЕО): «Телеметрическая информация свидетельствует о том, что в результате внезапного внешнего воздействия произошла мгновенная разгерметизация жидкостного контура системы терморегулирования, приведшая к резкому выбросу теплоносителя. Это привело к возникновению значительного возмущающего момента и, как следствие, потере ориентации и вращению космического аппарата». В пользу версии столкновения с КМ, помимо характера развития аварии, указывали ещё и другие обстоятельства и баллистические расчёты. Атаковать «Экспресс» могли фрагменты, сопровождающие КА «Радуга» или «Горизонт» [369, 370].

Всплеск взрывов наблюдался во второй половине 2006 г. (с 1993 г. ничего подобного не было). 17 ноября, после 64 дней функционирования взорвался с образованием множества фрагментов, из которых 28 были сразу каталогизированы, российский ИСЗ наблюдения поверхности Земли «Космос-2423» (восьмой из этой серии). У него была нормальная короткая штатная программа полёта. Но особенностью спутников этой серии было то, что они взрывались в конце своей миссии. Т.е. этот взрыв был ожидаем, чего не скажешь про взрыв второй ступени американской РН «Дельта-IV».

После успешного вывода полезного груза на 850-километровую солнечно-синхронную орбиту и разделения вторая ступень совершала программный управляемый вход в атмосферу, но в процессе этого вдруг было обнаружено множество фрагментов, выброшенных в направлении, обратном движению ступени, из которых каталогизировано 60. Природа взрыва непонятна. Также неожиданным был взрыв второй ступени РН «Дельта-II» после 17-летнего пассивного полёта, причём в конце своего функционирования она была пассивирована (!), т.е. на борту не осталось энергии для провокации взрыва.

В 2006 г. было ещё несколько взрывов, в том числе разрушение второй ступени японской РН Н-2А. Ранее в августе и сентябре того же года произошли взрывы такой же второй ступени, вспомогательного двигателя РН «Протон» (это был уже 35-й взрыв такого типа двигателей) и верхней ступени РН КА «Молния» [371, 372].

19 февраля 2007 г. взорвалась верхняя ступень (разгонный блок) «Бриз-М» РН «Протон». Перед этим ей не удалось вывести спутник связи «Арабсат-4А» на геостационарную орбиту, и она почти с полным баком топлива осталась на орбите 495×14750 км с наклоном $51,5^\circ$ [373]. После взрыва образовалось более 1000 осколков.

В 2007 г. было восемь взрывов.

11 января 2007 г. в результате испытания китайского кинетического противоспутникового оружия была атакована и взорвана мишень — метеорологический китайский ИСЗ «Фенгюн-1С» (международный номер 1999-025А) массой почти 960 кг на почти круговой солнечно-синхронной орбите высотой ~ 850 км с наклоном $98,8^\circ$ (рис. 3.2.3). В результате кинетического удара с относительной скоростью ~ 9 км/с *в интенсивно используемой области орбит* образовалось облако осколков, из которых в течение первой недели было обнаружено более 600. К 11 июля 2007 г. было каталогизировано уже 2347 осколков, а к середине сентября 2010 г. их было в каталоге 3037 [238]. По данным публикаций [374–376], радар «Хейстек» ещё зарегистрировал более 150 000 не каталогизированных осколков от взрыва этого КА размером до 1 см.

Интересно, что реальное общее количество фрагментов разрушения КА «Фенгюн-1С» (обнаруженных СККП США и радаром «Хейстек») превысило предсказанное стандартной моделью разрушения от столкновения, используемой НАСА [377].

Это событие расценивается специалистами как самое драматическое в истории «размножения» КМ, что наглядно демонстрируется резким скачком его количества на диаграмме рис. 2.2.2а (см. с. 80) над абсциссой 2007 г. Количество каталогизированного КМ, который накапливался в течение 50 лет, в одно мгновение подскочило более чем на одну треть, а количество фрагментов разрушений увеличилось сразу на 75 % [378]. До этого момента ничего подобного за всю историю освоения космоса не наблюдалось, тем более что это произошло в значительно заселённой действующими КА орбитальной области.



Рис. 3.2.3. КА «Фенгюн-1С» до разрушения

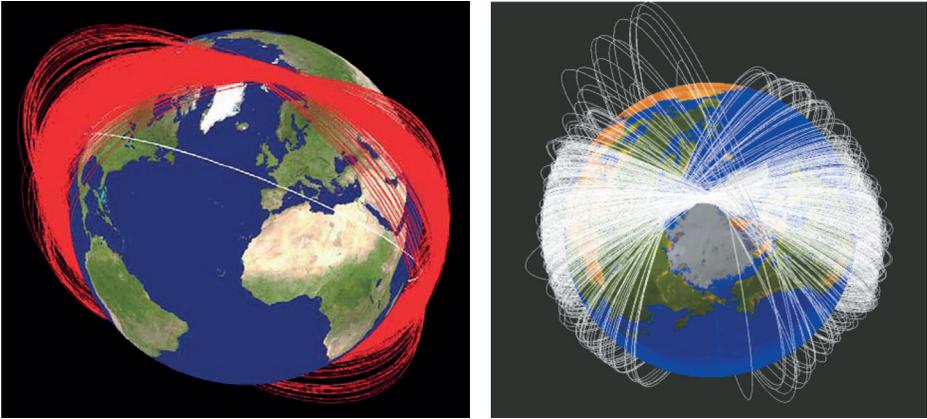


Рис. 3.2.4. Расплывающийся тороидальный пучок орбит осколков от разрушения ИСЗ «Фенгюн-1С» с интервалом шесть месяцев

Произошедшее особенно усугубляется ещё и тем, что по оценке специалистов [239, 238] основная масса образовавшихся осколков (~95 %) продолжит своё орбитальное существование в течение по крайней мере нескольких десятков лет, а часть из них — сотни лет [7]. К июлю 2007 г. сгорело только 13 из каталогизированных обломков, а к середине сентября 97 % всех обнаруженных и каталогизированных на этот момент обломков от взрыва (а именно, от 3067) все ещё оставались на орбитах [238].

И это всё происходит в области орбит, насыщенной действующими КА, в частности, метеорологическими, океанической разведки: российские «Метеор-1», «Метеор-2», американские NOAA, DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program), китайские той же серии «Фенгюн» и многие др.

Образовавшихся обломки представляют очень высокий риск столкновений с действующими КА. Из-за огромного их числа и большого разброса векторов их начальных скоростей уже в первые шесть месяцев после взрыва некоторым действующим защищаемым КА пришлось совершить манёвры ухода от столкновения с ними. Например, КА НАСА «Тегга», движущемуся по почти круговой орбите со средней высотой 705 км, 22 июня была дана команда на манёвр ухода от 35-сантиметрового обломка КА «Фенгюн-1С» (расчётное сближение составило 19 м). Спустя несколько дней МКС приготовилась к подобному манёвру, который был отменён перед самым включением двигателя после того, как уточнённое значение промаха оказалось приемлемым.

Сразу после разрушения КА «Фенгюн-1С» орбиты образовавшихся осколков были ограничены достаточно узким диапазоном наклонений и прямых восхождений. Однако различные скорости прецессии орбит привели со временем к существенному расширению этого диапазона. На рис. 3.2.4 показана эволюция всего пучка орбит фрагментов за шесть месяцев. Облако осколков охватило диапазон по высоте от 200 до 4000 км [378–380].

С этим событием имеет смысл сравнить другое аналогичное событие — испытание противоспутникового оружия ASAT в США 21 февраля 2008 г., в результате которого ракетой SV-3 был разрушен ИСЗ USA-193 [381]. Эксперимент был построен в высшей степени рационально. Спутник-мишень вышел из строя сразу после вывода на околоземную орбиту. Его топливный бак остался заполненным не использованным гидразином, а тщательно проведённый анализ выживаемости показал, что он вполне может достичь поверхности Земли и там такое большое количество гидразина может создать серьёзные проблемы в зависимости от того, куда бак упадёт.

Таким образом, кинетический удар по спутнику и его разрушение на орбите убивали сразу двух зайцев: с одной стороны, проводилось испытание кинетического оружия,

с другой, устранялась угроза падения на Землю бака, заполненного гидразином. 21 февраля спутник был разрушен на множество мелких осколков (360 было обнаружено и сопровождалось до их входа в атмосферу), большая часть которых упала на Землю или сгорела в атмосфере в течение одного часа после удара ракеты. К концу марта на орбитах оставалось всего несколько фрагментов, а последний сгорел летом того же года [382].

Организаторы этого испытания продемонстрировали высокую ответственность при выборе сценария испытания. Эксперимент, проводившийся начиная с высоты 250 км и ниже (что гораздо меньше, чем в первом испытании ASAT и, тем более чем в китайском испытании), был построен таким образом, что **99 %** образовавшихся осколков **сгорели в атмосфере в течение недели**.

Американская сторона настаивает на другой версии этого события 2008 г. Она отрицает, что это было запланированное испытание ASAT, что довольно убедительно обосновано в недавней (предсмертной) статье Н. Джонсона (*англ.* N. Johnson) (непосредственного участника этой операции) [383]. В статье показано, что главной задачей было немедленное уничтожение аварийного, сразу после запуска утратившего связь с оператором сверхсекретного спутника USA-193, титановый топливный бак которого к тому же был полностью заполнен 1000 фунтами (454 кг) гидразина (тем более замороженного). По расчётам, он вполне мог неповреждённым пройти плотную атмосферу и достичь поверхности Земли с очевидными последствиями. Откладывать было нельзя: высота составляла уже менее 180 км (165 миль). В пользу этой версии говорит и то, что оружие уничтожения (ракету SV-3) никак нельзя назвать удачным для испытания ASAT. Это было то, что попало под руку в данный момент почти без возможности выбора.

Здесь стоит вспомнить также первое испытание ASAT 13 сентября 1985 г. Противоспутник запустили с борта самолёта F-15 и разрушили ИСЗ Solwind на орбите 545×515 км. Образовалось 285 фрагментов разрушения цели, многие из которых просуществовали более 15 лет. Некоторые из них прошли на расстоянии 1,3 км от МКС. Последний из осколков сгорел в феврале 2004 г. [384, 385].

Эти два последних примера весьма показательны: даже специалистам, заинтересованным в создании благоприятных условий для космической деятельности, потребовалось 23 года, чтобы сделать самые серьёзные выводы из происходящего в ОКП. Как дорого обходится человеку его легкомыслие! Точнее, всем нам.

Спустя всего месяц после разрушения китайского «Фенгюн-1С» произошло ещё четыре взрыва — двух китайских КА и двух российских компонентов запуска: Beidou-2A, CBERS-1 (*англ.* China-Brazil Earth Resources Satellite), двигатель осадки топлива 4-й ступени российской РН «Протон» и разгонный блок «Бриз-М» (рис. 3.2.5).

Последний взрыв заслуживает особого внимания. В феврале 2006 г. 4-я ступень РН «Бриз-М» РН «Протон» была использована для вывода ИСЗ «Арабсат-4А» на низкую парковочную орбиту. Через 50 мин после вывода двигатель «Бриз-М» снова был включён (второе включение из четырёх запланированных). Однако из-за возникшей неисправности двигатель заглох раньше времени и отказывался включаться снова. КА, который в результате не мог быть выведен на штатную операционную орбиту, был отделён от РН, и позже отдана команда на его управляемый вход в атмосферу. 19 февраля 2007 г. (почти в годовщину запуска) двухтонная конструкция «Бриза-М» взорвалась и разлетелась на более чем 1000 различных с Земли обломков, находясь на орбите 495×14705 км с наклонением 51,5°.

По счастливой случайности, этот взрыв наблюдался, по крайней мере, тремя астрономами в разных частях Австралии и был сфотографирован. На нескольких снимках ясно видно распространение облака обломков малой яркости. Причина взрыва — скорее всего остаток топлива на борту разгонного блока.

Хотя все четыре взрыва и были непреднамеренными, по крайней мере, три из них можно было предотвратить. Как рекомендовано во многих национальных и интернацио-

нальных руководства по снижению засорённости ОКП, КА и ступени РН в конце своего активного существования должны быть пассивированы (например, путём сброса остатков топлива) [373].



Рис. 3.2.5. Ракета-носитель «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М»

10 ноября 2007 г. случился довольно загадочный инцидент. Спутник НАСА для исследования верхней атмосферы UARS, после весьма успешного и плодотворного выполнения своей 14-летней миссии в 2005 г. был пассивирован (топливные баки опустошены и аккумуляторы разряжены) и переведён на более низкую орбиту захоронения с целью сокращения срока его существования. В течение последующих двух лет его высота постепенно снижалась, как вдруг 10 ноября 2007 г. от 5,7-тонной конструкции неожиданно для всех отделилось, по крайней мере, четыре фрагмента (с умеренной скоростью). Два из них упали на Землю в конце ноября, а остальные оставались на орбите до конца года. По мнению оператора, взорваться спутник не мог, поскольку был полностью пассивирован (если не считать мизерного количества сжатого газа в баллончике). Единственной объяснимой причиной разрушения могло быть столкновение с небольшим ненаблюдаемым элементом КМ [386].

Через день после этого инцидента США провели в 2007 г первый пуск РН «Дельта-IV». Предыдущий полёт РН этой серии в 2006 г. закончился незапланированным разрушением второй ступени с образованием 60 фрагментов. На этот раз вторая ступень РН также произвела две дюжины обломков размером более 10 см. Как и в предыдущем случае, образование фрагментов не помешало РН успешно выполнить свою функцию — вывести полезный груз на запланированную орбиту.

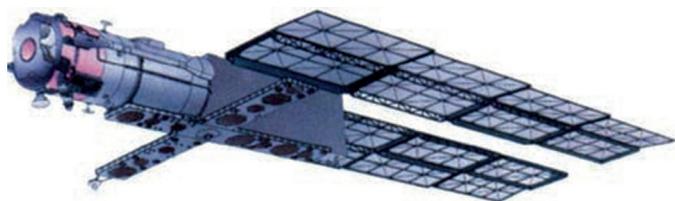


Рис. 3.2.6. КА «Космос-2421»

138 В марте 2008 г. по неизвестной причине взорвался российский КА «Космос-2421» (точнее, в марте – июне этот КА испытал три последовательных взрыва — 14 марта, 28 апреля и 9 июня [327, 326]) с образованием 506 фрагментов, 90 % которых имели размеры от 5 до 20 см. Примечательно, что взрыв произошёл всего лишь в 60 км над МКС. К счастью, основная масса осколков уже сгорела в атмосфере к началу 2009 г. (рис. 3.2.6).

В течение нескольких месяцев многочисленные обломки и осколки от разрушения КА «Космос-2421» проходили близко от МКС, и каждый раз приходилось планировать манёвры ухода от столкновений, которые отменялись лишь тогда, когда уточнённая вероятность столкновений опускалась ниже «красного» порога 0,0001. И всё же 27 августа пришлось совершить один манёвр при расчётной вероятности столкновения 0,014 (расчётный промах 1,6 км). Его осуществили с помощью пристыкованного в то время к МКС европейского АММ «Жюль Верн». За два часа до предполагаемого столкновения включили двигатели АММ с целью замедления движения МКС (на 1 м/с), чтобы чуть-чуть снизить среднюю высоту орбиты станции, предварительно повернув МКС на 180° относительно её первоначальной «нормальной» ориентации.

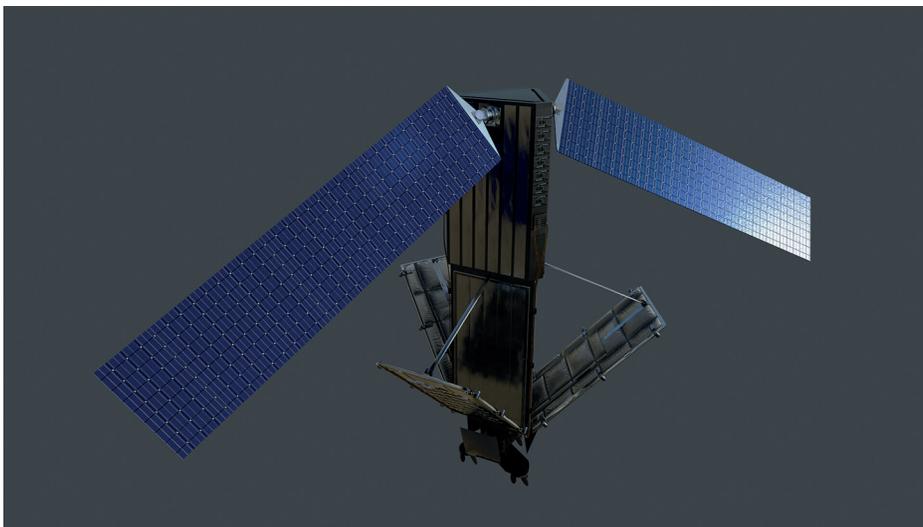


Рис. 3.2.7. КА «Иридиум-33»

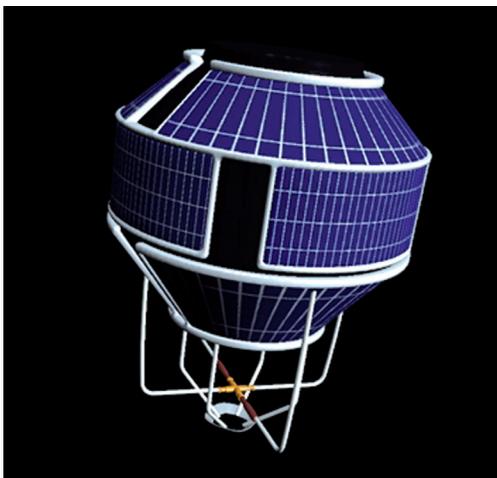


Рис. 3.2.8. КА «Космос-2251»

Это был к тому времени восьмой манёвр за всю полётную программу МКС [327, 387, 326, 388]. (А в 2022 г. МКС был совершён уже 32-й манёвр уклонения от столкновения, начиная с 1999 г.)

В начале июля 2008 г. 21-летний «Космос-1818» с законсервированным ядерным реактором на борту стал источником облака КМ, 30 элементов которого были обнаружены СККП США и ещё множество небольших металлических сфер — с помощью специальных СН. Это был первый из двух однотипных спутников, испытывавших новую ядерную энергетическую установку. Причина взрыва до сих пор остаётся невыясненной (вполне возможно, произошло столкновение с КМ). По мнению некоторых экспертов, образовавшиеся металлические сферы могли быть каплями натрий-калиевого охладителя, который использовался как в данной, так и предыдущей версиях реактора [389, 390].

Неожиданное даже для операторов столкновение американского «Иридиума-33» (рис. 3.2.7) с российским «Космос-2251» (рис. 3.2.8), так же как и, в своё время, столкновение французского CERISE с обломком ракеты Ariane, нанесло удар по скептикам, утверждавшим, что, мол, вероятность серьёзного столкновения мала, и апеллировавшим к факту редких гарантированных регистраций столкновений. Вместе с тем, известный специалист Пулковской обсерватории Главной астрономической обсерватории РАН А. С. Сочилина, исследуя орбитальное поведение КА на ГЕО, показала, что, по крайней мере, 40 из них испытали столкновение с относительно крупными КО [36]. Эксперты говорят, что непрогнозируемые возмущения в движении нефункционирующих геостационарных КА за последние годы участились. Это может говорить о росте количества их столкновений с фрагментами разрушений, в результате чего появляется множество новых фрагментов.

Итак, 10 февраля 2009 г. действующий КА обеспечения глобальной спутниковой связью объектов США «Иридиум-33» (всего их 70 спутников в космической системе «Иридиум», действующих на этой рабочей высоте) столкнулся с уже нефункционирующим российским ИСЗ «Космос-2251» (спутник класса «Стрела-2М», диаметр 2,05 м, гравитационная штанга длиной 18 м, масса 900 кг). При запуске в 1997 г. «Иридиум-33» стоил около 50 миллионов долларов. Представитель Министерства обороны США признал ошибку в расчётах траектории американского спутника и что его столкновение с российским стало для Пентагона неожиданностью [391].

Габаритные размеры ИСЗ «Иридиум-33» оцениваются как 2×1 м, масса 560 кг. Столкновение произошло над районом крайнего севера Сибири на высоте около 790 км при относительной скорости 11,646 км/с с образованием большого числа обломков. Наклонения орбит спутников составляли 86,4 и 74,0°, соответственно. Плоскости орбит в момент столкновения пересекались почти под прямым углом (рис. 3.2.9).

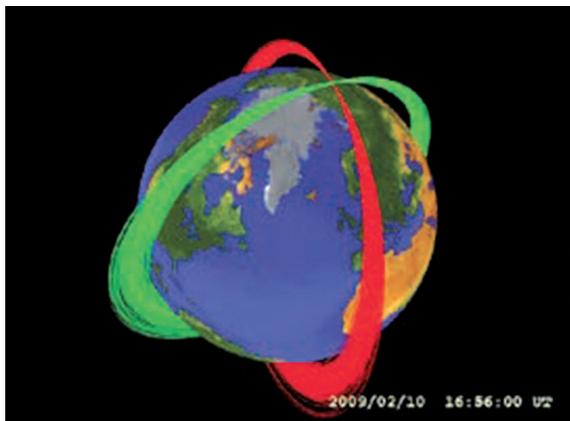


Рис. 3.2.9. Положение орбитальных плоскостей аппаратов «Иридиум-33» и «Космос-2251» в момент столкновения [243]

140 Летом 2010 г. СККП США было зарегистрировано более 2100 фрагментов от обоих аппаратов. Представитель NASA Николас Джонсон заявил, что фрагменты спутников, разлетевшихся на высоты от 500 до 1300 км, скорее могут представлять опасность для космического телескопа «Хаббл», который находится на высоте 565 км, чем для МКС, находящейся ниже.

Количество фрагментов, образовавшихся в результате разрушения ИСЗ «Космос-2251», более чем вдвое превысило таковое от разрушения «Иридиум-33», что приблизительно соответствует соотношению масс исходных объектов. После столкновения этих объектов объём каталога КО СККП США увеличился на 15,6 % (конкретно, на 2347 КО), а количество не каталогизированных, но сопровождаемых средствами наблюдения, возросло на 6000 КО [8].

Более детальный анализ столкновения КА «Иридиум-33» и «Космос-2251» можно найти в исследованиях [392, 114, 393–395, 243].

Суммарное количество мелких фрагментов (размером около 1 см) от ИСЗ «Фенгюн-1С», «Иридиум-33» и «Космос-2251» по данным радиолокаторов «Хейстек» и НАХ составляет более 250 000, а крупных (крупнее 10 см) — более 5500 [396]. Только в результате этих двух катастрофических событий объём каталога КО скачком увеличился на 70 % (см. рис. 2.2.2а на с. 80)!

Но это не всё. В результате прецессии орбит обломков столкнувшихся аппаратов из-за значительного разброса векторов полученных ими импульсов после столкновения охваченные ими области вокруг Земли стали постепенно расширяться (рис. 3.2.10).

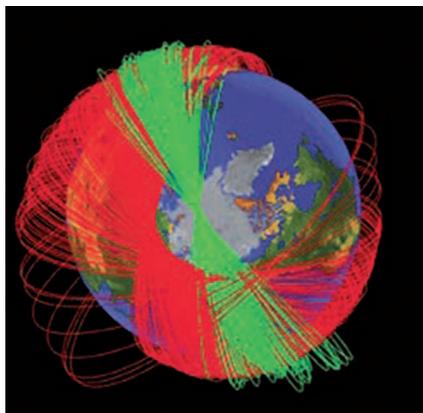
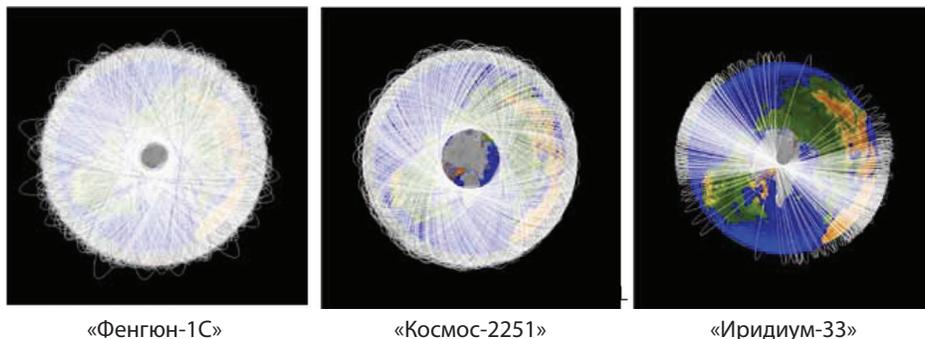


Рис. 3.2.10. Эволюция орбит фрагментов разрушения ИСЗ «Иридиум-33» и «Космос-2251» через шесть месяцев после столкновения



«Фенгюн-1С»

«Космос-2251»

«Иридиум-33»

Рис. 3.2.11. Результат эволюции облаков обломков трёх КА к 1 июля 2012 г.

К 1 июля 2012 г. официально каталогизировано более 5500 фрагментов от этих «трёх великих разрушений», 90 % из которых остаются на орбитах (не говоря уже о мелких осколках). Они составляют 36 % от всех КО, образующих популяцию LEO (до 2000 км) или пересекающих эту область. При этом продолжилось расширение областей их орбит. Как видно из рис. 3.2.11, орбиты обломков КА «Фенгюн-1С» и «Космос-2251» полностью окутали Землю. Расширение облака обломков «Иридиума-33» происходит медленнее. Это объясняется тем, что орбита КА была близка к полярной (наклонение $86,4^\circ$) и поэтому орбитальные плоскости его фрагментов прецессируют медленнее [397].

Насколько серьёзно было воспринято событие столкновения КА «Иридиум-33» и «Космос-2251» научной и административной общественностью, можно судить по тому факту, что уже в апреле 2009 г. были проведены слушания в Конгрессе США под девизом «Сохранение космической среды для гражданского и коммерческого использования». Перед Комитетом Палаты представителей по науке, космосу и технологиям (*англ.* United States House Committee on Science, Space, and Technology) (Подкомитет США по космосу и аэронавтике по науке — United States House Science Subcommittee on Space and Aeronautics) выступили генерал-лейтенант Ларри Д. Джеймс (*англ.* Larry D. James) от Стратегического командования США (*англ.* Strategic Air Command), Николас Джонсон (*англ.* Nicholas Johnson) — руководитель подразделения НАСА по проблемам техногенного засорения космоса, Ричард Дарбелло (*англ.* Richard DalBello) от Генеральной корпорации Интелсат (Intelsat, *англ.* The Intern. Telecommunications Satellite Organization) и Скотт Пейс (*англ.* Scott Pace) от Института космической политики Университета им. Джорджа Вашингтона (*англ.* Space Policy Institute, The George Washington University) (рис. 3.2.12) [398].



Рис. 3.2.12. Слева направо: генерал-лейтенант Ларри Джеймс, Николас Джонсон, Ричард Дарбелло, Скотт Пейс

В июне 2009 г. в Вене на своём ежегодном собрании Комитет ООН по мирному использованию космоса (COPUOS) заслушал ряд докладов, инициированных столкновением «Иридиума» и «Космоса». Бригадный генерал Сьюзен Хелмс (*англ.* Susan Helms) (астронавт) объявила, что Стратегическое командование США изыскивает возможности проведения оценки опасных сближений для большего числа действующих КА. Николас Джонсон сообщил последние данные о природе облака осколков от столкновения спутников и его возможной эволюции [399].

Единственная «польза» от историй, происшедших с КА «Фенгюн-1С», «Иридиум-33» и «Космос-2251», только в том, что они помогают понять процесс фрагментации крупных объектов в космосе при столкновениях и предоставляют редкую возможность для проверки и калибровки моделей фрагментации по реальным данным. А идеологическая разница между этими двумя событиями лишь в том, что разрушение КА «Фенгюн-1С» было намеренным, а столкновение КА «Иридиум-33» и «Космос-2251» — чисто случайным.

18 августа и 17 ноября 2011 г. наблюдались очередные взрывы двигателей осадки топлива массой примерно 55 кг блоков серии ДМ РН «Протон», использовавшихся для вывода навигационных ИСЗ «Космос-2434, -2436» в декабре 2007 г. и ИСЗ «Космос-2079, -2081» в мае 1990 г., соответственно. Это были, соответственно, 38-е и 39-е события такого рода [400].

142 5 сентября 2011 г. перигей орбиты списанного и пассивированного КА GOES-10 (англ. Geostationary Operational Environmental Satellite) скачком снизился на 20 км, что эксперты смогли объяснить только столкновением с небольшим фрагментом КМ [401]. Иных объяснений не выдвигалось.

Российская автоматическая межпланетная станция (АМС) «Фобос-Грунт» была запущена 9 ноября 2011 г. и предназначалась для доставки образцов грунта с естественного спутника Марса Фобоса на Землю (рис. 3.2.13, 3.2.14), определения физико-химических характеристик грунта, исследований происхождения спутников Марса, процессов взаимодействия его атмосферы и поверхности, взаимодействия малых тел Солнечной системы с солнечным ветром. Однако в результате нештатной ситуации не произошло расчётного срабатывания маршевой двигательной установки перелётного модуля. АМС не смогла покинуть окрестность Земли и осталась на низкой опорной орбите. После неудачных попыток оживить АМС она 15 января 2012 г. вошла в плотные слои атмосферы, а её несгоревшие обломки упали в 21:45 МСК в Тихий океан [402].

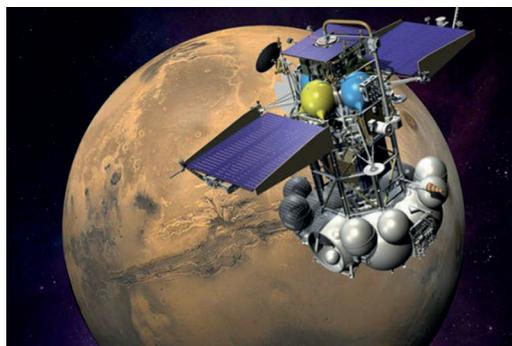
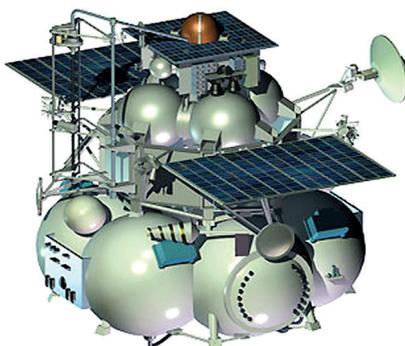


Рис. 3.2.13. КА «Фобос-Грунт» в сборке и в полёте [403]



Рис. 3.2.14. Спутник Марса Фобос



Рис. 3.2.15. Центральный бак ступени «Бриз-М» и главный двигатель, вставляемый во вспомогательный топливный бак [404]

26 февраля 2012 г. в четвёртый раз за пять лет третья ступень китайской РН Long March 3 (CZ-3) взорвалась вскоре после доставки полезного груза на высокоэллиптическую геосинхронную переходную орбиту. Это произошло через два дня после успешного вывода (24 февраля) навигационного спутника Beidou-G5 на орбиту $200 \times 36\,000$ км с наклоном 21° . Третья ступень массой 3 т длиной 12,4 м и диаметром 3 м осталась на ГТО. СККП США обнаружила несколько десятков обломков, свидетельствующих о катастрофическом разрушении РН. После двух подобных взрывов Китай в 2005 г. принял решение о стравливании остатков топлива из ступеней после отделения полезного груза. Такая пассивация была осуществлена на РН серий LM2 и LM4. Введение подобной процедуры на ступенях РН серии LM3 (работающих на жидком водороде и кислороде) в 2011 г. ещё не было завершено.

17 октября 2012 г. взорвалась верхняя ступень РН «Бриз-М» ракеты «Протон» (аналогично тому, как это случилось в 2007 и 2010 гг.), которая из-за неисправности не смогла вывести на орбиты два спутника «Телком-3» и «Экспресс-МД2» 6 августа того же года. После неудачи при запуске она осталась на орбите с наклоном $49,9^\circ$, перигеем 265 км и апогеем 5015 км. Оба спутника вскоре автономно освободились от ступени. Последняя включала центральный топливный бак с 5,2 т горючего и вспомогательный бак, первоначально вмещающий 14,6 т топлива. Диаметр ступени составлял 4 м, а длина — 2,65 м (см. рис. 3.2.15).

К 19 октября 2012 г. СККП США отслеживала более 700 обломков от разрушения этой ступени.

Известны катастрофические последствия столкновений действующих КА с мелкими, почти пылевидными частицами КМ. Российский спутник «Блиц» в январе 2013 г. был разрушен на высоте 825 км при столкновении с микрочастицей массой $\sim 0,035$ г при относительной скорости столкновения $\sim 12,3$ км/с. Есть и другие зарегистрированные подобные события [443, 484–486].

Шквал разрушений КО в первой половине 2014 г. С конца марта 2014 г. было зафиксировано семь разрушений КО на низких орбитах (предполагаемых и подтверждённых). Первым был «Космос-1867», ИСЗ класса «Плазма-А», запущенный бывшим СССР для испытания новой бортовой ядерной энергетической установки. Родственный ему «Космос-1818» в июле 2008 г. образовал аналогичное облако фрагментов (рис. 3.2.16). Как и в том случае, точная причина разрушения неизвестна, а шесть новых КО иденти-

144 фицированы как «охладитель» и внесены в каталог СККП США. По всей видимости, это фрагменты застывшего Na-K-охладителя, вытекшего из контура охлаждения в результате утечки, образовавшейся либо от сверхскоростного удара небольшого элемента КМ, либо термического воздействия на трубы контура.

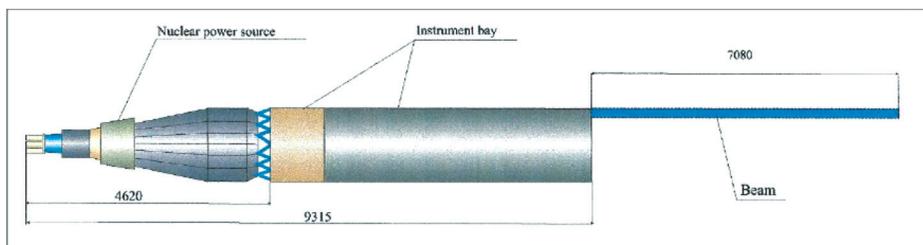


Рис. 3.2.16. Упрощённый внешний вид ИСЗ «Космос-1818 и -1867».

Размеры приведены в миллиметрах

Корпус второй ступени РН «Дельта-2» испытал разрушение 30 апреля, в результате чего образовалось дополнительно шесть КО, включённых в каталог СККП США. РН была выведена в космос в 1999 г., но после выполнения своих функций полностью пассивирована, так что причиной разрушения вероятнее всего было столкновение с небольшим элементом КМ.

10 мая 2014 г. претерпел разрушение запущенный в июне 2007 г. ИСЗ электронной разведки «Космос-2428» (класса «Целина-2»), образовав 15–17 дополнительных КО, четыре из которых были включены в каталог КО СККП США. Несмотря на сравнительно высокую орбиту (845×860 км), многие из образовавшихся фрагментов уже вошли в плотную атмосферу и сгорели (включая 2 из 4 каталогизированных).

Особенностью этих трёх разрушений состоит в том, что они произошли в регионе ОКП, наиболее заселённом КО (на высотах от 750 до 850 км). И хотя гарантированно назвать причины разрушений нельзя, выявленные признаки подтверждают гипотезу о столкновении с КМ.

В первой половине мая произошло ещё три разрушения. Объектами двух из них выступают двигатели осадки топлива блока ДМ четырёх ступеней РН «Протон». Это были 40-й и 41-й взрывы подобного типа с 1984 г. СККП обнаружила 15 и 7 фрагментов, соответственно. Обе РН были использованы для вывода спутников системы ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система).

Следующей из этой серии разрушений была фрагментация обломка, сгоревшего 29 мая 2014 г. ИСЗ «Космос-869», которая породила ещё два обломка и была вызвана аэродинамическими силами в окрестности перигея (орбита 110×14990 км).

Наконец, 4 июня 2014 г. случилось разрушение РН Titan-3C Transtage через 45 лет после вывода в космос. Орбита близкая к геосинхронной 35970×37130 км с наклоном 8,7°. Это четвёртое разрушение ИСЗ данного класса.

Более полный обзор событий в космосе, происшедших с самого начала космической эры, можно найти в выпускаемых НАСА сериях Chronology и Orbital Debris Quarterly News [311, 405, 406, 232, 298, 236, 407 и др.] и последующих.

В третьем квартале произошло ещё три разрушения. 6 июля от китайского метеоспутника Хайянг-2А (на круговой орбите высотой 965 км) отделилось четыре фрагмента, ни один из которых не был каталогизирован. Ещё два разрушения были связаны с вспомогательными двигателями системы обеспечения запуска четырёх ступеней РН «Протон». Они явились соответственно 42-м и 43-м взрывами этого класса (и третьим и четвёртым в 2014 г.).

В 2014 г. произошли два загадочных события с ИСЗ серии «Иридиум», проиллюстрировавших, что ещё многие явления, связанные с ИСЗ, не поддаются логичному объяснению. 7 июня 2014 г. от ИСЗ «Иридиум-47» отделилось 10 фрагментов, которые были каталогизированы Объединённым центром космических операций (*англ.* Combined Space Operations Center — CSpOC) и до сих пор сопровождаются СККП США. Некоторые из них имели значительное приращение скорости (в одном случае оно превысило 80 м/с). В то же время, по утверждению оператора КС «Иридиум», материнский спутник продолжает нормально функционировать и его орбита не претерпела никаких изменений во время разрушения.

Второе разрушение произошло с ИСЗ «Иридиум-91», запущенным 11 февраля 2002 г. 30 ноября 2014 г. от него отделилось два фрагмента, также каталогизированные и до сих пор сопровождаемые. Как и в случае с ИСЗ «Иридиум-47», операторы подтверждают отсутствие сбоев в функционировании КА и каких-либо очевидных изменений параметров орбиты. В отличие от предыдущего случая, здесь оба фрагмента получили минимальное приращение скорости и остаются вблизи материнского ИСЗ.

В качестве причины разрушения в обоих случаях можно лишь предположить столкновение спутников с элементами малоразмерного КМ, а сами фрагменты — это отвалившиеся черепицы изоляционного покрытия КА. Однако в случае с «Иридиум-47» это было высокоэнергетическое столкновение и не с единственным элементом космического мусора.

В конце ноября 2015 г. метеоспутник США NOAA-16 разрушился на орбите 841×857 км с образованием облака осколков (на 21 января 2016 г. каталогизировано 136 шт.). ИСЗ сухой массой 1475 кг был запущен 21 сентября 2000 г. на солнечно-синхронную орбиту с наклоном 98,9°. Он работал до 2005 г., когда был законсервирован. После внезапной потери связи с ним был списан в июне 2014 г. Как и в случае взрывов ИСЗ серии NOAA, множество обломков остаётся на этой и без того переполненной орбите на много десятилетий. Причиной разрушения, скорее всего, послужил взрыв аккумуляторной батареи.

История разрушений КА серии NOAA

Она специфическая, поэтому заслуживает внимания.

Управление НАСА по исследованию проблем техногенного засорения космоса различает несколько типов разрушений космических аппаратов серии NOAA. Они включают стандартные разрушения и аномальные события. Обычно это полное разрушение КА с высокими скоростями отделения обломков. Аномальное событие — это «несанкционированное» отделение одного и более объектов обычно с низкой скоростью, по существу, от цельного КА, что можно рассматривать как следствие воздействия на материнский КА внешней среды. NOAA-6...-8, -10...-12, -14 испытали аномальные разрушения в процессе их функционирования и в полёте после завершения миссии. NOAA-8, кроме того, испытал полное разрушение 30 декабря 1985 г. в результате, как полагают, взрыва аккумулятора. Но ни одно из этих событий не было столь драматичным, как ноябрьский взрыв NOAA-16 в 2015 г.

Верхняя ступень «Бриз-М», использованная при запуске ИСЗ «Космос-2513», фрагментировалась 16 января 2016 г. на высоте около 34 866 км. Объект представляет собой центральную часть верхней ступени «Бриз-М», причём отделяемый вспомогательный топливный бак был оставлен ещё на переходной эллиптической орбите. Цилиндрическая центральная часть имеет 2,49 м в диаметре и 2,654 м в длину, включая крепление полезного груза, и массу 1220 кг. Было обнаружено (но не каталогизировано) 10 фрагментов. (СККП США испытывает трудности в обнаружении, слежении и каталогизации КМ в глубоком космосе.) Однако потенциально могли образоваться ещё сотни элементов КМ. Поскольку фрагментация на ГЕО — это довольно редкое событие, Управление НАСА по исследованию проблем техногенного засорения космоса мобилизовало свои средства наблюдения для отслеживания облака образовавшегося КМ на ранней стадии его эволюции.

Верхняя ступень «Бриз-М», использованная при запуске канадского спутника связи Nimiq-6, фрагментировалась 23 декабря 2015 г. Объект представляет собой центральную часть верхней ступени «Бриз-М», причём отделяемый вспомогательный топливный бак был оставлен ещё ранее в процессе вывода. К этому времени объект 3,6 года находился на орбите 34592x10408 км с наклоном 12°. На 3 апреля 2016 г. официально каталогизировано восемь фрагментов, кроме материнского объекта. Кроме них могли образоваться ещё сотни фрагментов.

Блок СОЗ двигателя осадки топлива (ДОТ) блока ДМ 4-й ступени Протон взорвался 26 марта 2016 г. на высокоэллиптической орбите 18840x682 км с наклоном 65,36°. У этих двигателей богатая история взрывов. На этот раз произошёл 44-й взрыв. ДОТ используется для осадки топлива перед запуском двигателя и обычно сбрасывается с борта после того, как блок ДМ запускается последний раз. Он также обеспечивает трёхосную стабилизацию блока ДМ во время спуска. Этот СОЗ (также обычно именуемый вспомогательным двигателем SL-12) использовался при запуске ИСЗ «Космос-2447-2449 навигационной системы ГЛОНАСС. Его взрыв привёл к образованию, по крайней мере, 21 обломка. На самом деле их может быть гораздо больше, если учесть трудности отслеживания КО на высокоэллиптических орбитах.

Ещё два разрушения российских КА в 2016 г.

Разрушился очередной двигатель осадки топлива (SL-12) блока ДМ 4-й ступени РН Протон. Это был 45-й взрыв. Двигатели осадки топлива используются для контроля положением по трём осям блока ДМ во время инерциального полёта РН и для осадки (стабилизации перемещения) топлива перед перезапуском реактивного двигателя. Он обычно сбрасывается после последнего запуска блока ДМ. Событие произошло на высокоэллиптической орбите 18786x709 км с наклоном 65,27° 1 июня 2016 г. Однако ввиду трудностей слежения за КО на высокоэллиптических орбитах можно только предполагать образование множества обломков.

Второе событие — это аэродинамическое разрушение КА «Молния 1-93» 16 апреля 2016 г. на орбите 2145x77 км с наклоном 62,96° в приперигейной области. СККП США обнаружила 13 фрагментов, но ни один не был каталогизирован. В виду низкого перигея КА они довольно быстро сгорели в плотной атмосфере.

Японская высокоэнергетическая космическая астрофизическая обсерватория Astro-H (Hitomi) с рентгеновским телескопом была разрушена в результате операционной ошибки 26 марта 2016 г. после месячного функционирования на орбите 578x536 км с наклоном 31,0°. Система контроля собственного положения КА неожиданно выдала ложный сигнал о том, что КА вращается. На самом деле КА был пространственно стабилизирован. В результате автоматической реакции системы стабилизации корректирующие двигатели придали КА компенсирующее вращение. Результирующая скорость КА превысила проектное значение, и некоторые крупные компоненты КА (солнечные панели (SAP), выдвижная станина для оптики (EOB) и др.) отделились от него, выведя его из строя (точнее, разрушив). Корпус КА продолжил быстрое вращение, а батареи разрядились. На 8 сентября 2016 г. было каталогизировано 10 фрагментов, из них 8 оставались на орбитах, близких к материнской.

Двигатель осадки топлива СОЗ (системы обеспечения запуска), или вспомогательный двигатель SL-12, с блока ДМ 4-й ступени РН «Протон» разрушился 27 июля 2016 г. на высокоэллиптической орбите 19 088x426 км с наклоном 64,8°. Это было уже 46-е разрушение данного типа. Всего с 1970 по 2012 г. было каталогизировано 380 космических объектов SL-12, из которых 64 до сих пор находятся на орбитах. Из 64 только 38 не разрушены.

Навигационный китайский КА второго поколения Бейду-G2 (BD) (по каталогу SSN (англ. Space Surveillance Network) No. 34779) разрушился 29 июня 2016 г. с образованием по крайней мере пяти фрагментов. Разрушение произошло на ГЕО 36137x35384 км с наклоном 4,7°. С середины мая 2010 г. КА неуправляемый по наклону (которое с тех пор изменяется от 0 до 15° с периодом 53 года). В настоящее время спутник совер-

шает колебательные движения около восточного геопотенциального «колодца» с восточной долготой 75° .

Индийский ИСЗ построения радиолокационных изображений RISAT-1 (англ. Radar Imaging Satellite) извёдал разрушение 30 сентября 2016 г. по неизвестной причине. ИСЗ в течение 4,4 лет функционировал на орбите, в конце активного существования имевшей следующие значения параметров: $H_a = 543$ км, $H_p = 539$ км, $i = 97,6^\circ$. Спутник имел на борту микроволновый (С-диапазон) радар с синтезированной апертурой. Первоначально с борта МКС наблюдалось 12 фрагментов разрушения. Но каталогизирован был лишь один, который сгорел в октябре 2016 г., как и все остальные. Событие категоризовано как аномальное образование множества фрагментов с большим отношением площади поверхности к массе.

Два аномальных события на ГЕО

Они случились летом 2017 г., но до 26 декабря 2017 г. никакие обломки в результате этих событий не были каталогизированы. 17 июня 2017 г. КА АМС-9 (GE-12) после 14 лет работы на орбите испытал некое энергетическое воздействие, в результате которого КА начал дрейфовать в геостационарном поясе в западном направлении. В окрестности КА была замечена фрагментация. Оператору удалось восстановить контроль над КА, и он перевёл его на орбиту захоронения выше пояса ГЕО.

В августе 2017 г. был разрушен по неустановленной причине индонезийский ИСЗ Telcom-1 с образованием множества обломков. Их динамика указывает на то, что это было высокоэнергетическое столкновение с КМ.

Третья ступень китайского КА Long March-4С (LM-4С или CZ-4С) размером $5 \times 2,9$ м и сухой массой 1,7 т (в которой оставалось 200–300 кг топлива) разрушилась 17 августа 2018 г. после 4,74-летнего пребывания на орбите (перед этим было ещё два разрушения этой модели). В момент разрушения она была на орбите 1205×997 км с наклоном $100,5^\circ$. Вскоре после разрушения отслеживалось шесть фрагментов.

Взрыв блока ДМ СОЗ, предсказанный и наблюдаемый в мае 2018 г.

Двигатель осадки топлива блока ДМ 4-й ступени РН Протон разрушился 22 мая 2018 г. Это был 48-й взрыв данного типа двигателей. Всего с 1970 по 2012 г. каталогизировано 380 КО этой серии, 64 из которых остаются на орбитах на 8 августа 2018 г., а 35 из них неповреждённые. Последний взорвавшийся блок СОЗ связан с выводом КА «Космос-2459, -2461» навигационной системы ГЛОНАСС. Двигатель находился на высокоэллиптической орбите $18\,929 \times 602$ км с наклоном $65,1^\circ$, а взрыв произошёл на высоте 13 745,8 км. Образовалось более 60 обломков, но с учётом трудности обнаружения КО на подобных орбитах их реально могло быть значительно больше.

Второй квартал подряд взрывается вспомогательный двигатель осадки топлива SL-12 блока ДМ 4-й ступени РН «Протон». Это произошло 24 августа 2018 г. после пребывания на орбите около 13 лет. Это был 49-й взрыв подобного типа. С 1970 г. по 2012 г. было каталогизировано 380 таких двигателей, из которых 64 оставались на орбитах на 10 октября 2018 г. 35 из них невредимые.

Третье разрушение в августе 2018 г. — разрушение ускорителя «Центавр» верхней ступени РН «Атлас-V» 31 августа после четырёх лет пребывания на орбите. Сначала отслеживался 71 образовавшийся фрагмент. Затем их число превысило 550.

6 февраля 2019 г. произошло два отдельных разрушения, связанных с японской РН Н-IIА (вариант 202): сама РН испытала разрушение через 100 дней полёта (обнаружено семь фрагментов), и от связанного с этой миссией элемента КМ (это вероятно конический «адаптер») отделилось несколько фрагментов (обнаружено пять).

Индийский КА Microsat-R, запущенный 24 января 2019 г., массой 740 кг был намеренно разрушен на орбите 294×265 км с наклоном $96,63^\circ$ при испытании системы проти-

148 воспутникового оружия суборбитального перехвата 27 марта 2019 г. При этом был каталогизирован 101 фрагмент, из которых больше половины сгорело к 15 июля. А всего СККП США первоначально отслеживала более 400 фрагментов.

Вторая ступень (разгонный блок) «Центавр» ракеты-носителя Atlas-V (разновидность «Центавра» с одним двигателем) разрушилась 6 апреля 2019 г. на орбите 35 092×852 км с наклоном 12,2°. Образовавшиеся обломки могут существовать на этой орбите многие десятилетия.

Разрушения трёх отработавших РН наблюдались: одно в мае и два в августе 2019 г. РН «Титан-IIIС Транстейдж» № 30 после 43 лет орбитального существования (наклонение 16,4°, высота орбиты 36 889×35 793 км, сухая масса 1640 кг) разрушилась 7 мая 2019 г. Она имела систему управления ориентацией на гидразине.

13 августа 2019 г. разрушилась 3-я ступень РН «Ариан-42Р» (на момент разрушения наклонение 66°, высота орбиты 1404×1296 км, сухая масса 1720 кг). В конце миссии ступень была пассивирована, в связи с этим механизм её разрушения до сих пор непонятен. Кроме РН, дополнительно каталогизировано восемь обломков.

19 августа 2019 г. разрушился двигатель осадки топлива (вспомогательный двигатель SL-12) блока ДМ СОЗ 4-й ступени РН «Протон». Это было 50-е разрушение данного типа КО в истории. Всего между 1970 и 2012 г. было каталогизировано 380 двигателей SL-12, из которых 64 остаются на орбитах на 1 октября 2019 г. А 34 из них — целые (не разрушенные). Остальные 30 разрушены и остаются на орбитах.

Очередное разрушение вспомогательного двигателя осадки топлива SL-2 произошло 23 октября 2019 г. на высокоэллиптической орбите 19 189×294 км с наклоном 64,5°. Из образовавшихся осколков наблюдались 10 (кроме материнского тела).

Последним известным в 2019 г. было разрушение ИСЗ «Космос-2491» 23 декабря после 6-летнего пребывания на орбите 1517×1485 км с наклоном 82,5°. Причина разрушения неизвестна. В каталог КО внесено два новых фрагмента.

52-е разрушение двигателя осадки топлива СОЗ SL-12 блока ДМ (4-й ступени РН Протон) в конце декабря 2019 г. на орбите 18 980×512 км с наклоном 64,7°. Обнаружено 25 фрагментов разрушения, из которых семь каталогизировано. Реально их значительно больше ввиду сложности обнаружения КО на высокоэллиптических орбитах. Причина — трещина в топливной системе и наличие остатков топлива и окислителя.

Второе событие — разрушение КА «Космос-2535» 5 марта 2020 г. после полугодового полёта. Это был запуск четырёх КА «Космос-2535, -2538», два из них продемонстрировали хорошую манёвренную способность, два других не маневрировали. Орбита разрушения — 645×607 км, наклонение 97,9°. Образовалось 17 фрагментов. Причина разрушения неизвестна.

Третье событие — разрушение верхней ступени SL-14 «Циклон-3» 12 февраля 2020 г. после 28 лет на орбите. Орбита разрушения 1206×1186 км и наклонение 82,56°. Образовалось более 60 обломков. Причина разрушения неизвестна. Ранее уже были пять разрушений этой РН с образованием в общей сумме 266 каталогизированных фрагментов.

Космический объект, связанный с запуском российского радиоастрономического спутника Spectr-R, претерпел разрушение 8 мая 2020 г. Этот объект ещё раньше испытал разрушение по неизвестной причине, а именно в августе 2015 г. Использованная при запуске модель ступени РН Fregat-SB Опытного завода АО «НПО Лавочкина» основана на прежней модели верхней ступени Fregat с добавлением тороидального топливно-окислительного бака (SBB). Вся конструкция имеет название сбрасываемый блок топливных баков. В мае 2020 г. орбита SBB была 3606×422 км с наклоном 51,5°. Блок находился на орбите около четырёх лет до первого разрушения и около девяти лет до второго. В результате первого разрушения образовалось 24 каталогизированных фрагмента,

в результате второго — 65 отслеживаемых, из которых 36 (включая материнское тело) каталогизированы.

12 июля 2020 г. разрушилась полуцилиндрическая крышка обтекателя верхней ступени японской РН Н-2А (была запущена в октябре 2018 г.). Во время разрушения орбита имела высоту 643×595 км, наклонение 97,89°. Масса крышки обтекателя составляла более 100 кг. Он имел сотовую конструкцию из алюминиевого сплава с покрытием, усиленным углеродными волокнами. В октябре было обнаружено и каталогизировано 74 дополнительных фрагмента, девять из них сгорели менее чем через три месяца. Поскольку у материнского КО не было источников энергии, взрыв как причина разрушения исключён, и единственное объяснение разрушения — столкновение с КМ.

Второе разрушение произошло 27 августа 2020 г. с отработавшим российским КА «Ресурс-О1». Почти 2-тонный КА был запущен в 1994 г. как ИСЗ наблюдения Земли. Во время разрушения его орбита была на высоте 660×633 км с наклонением 97,92°. К концу сентября было каталогизировано девять новых фрагментов. «Ресурс-О1» реализован на платформе «Метеор-2». Фрагментация сопровождалась образованием множества мелких частиц (имеющих высокое отношение площади поверхности к массе) с низкой скоростью отделения, что характерно для разрушения КА, построенных на платформе «Метеор-2». Однако в данном случае наблюдались фрагменты, отделявшиеся и с высокими скоростями, что говорит о довольно энергетической причине разрушения.

Один из фрагментов разрушения крышки обтекателя Н-2А в сентябре достиг операционной высоты МКС и обусловил высокий риск столкновения с МКС. Для уклонения от столкновения 22 сентября был совершён манёвр. Это был третий манёвр МКС в 2020 г. и 28-й с 1999 г. А этот обломок продолжал снижаться и сгорел в атмосфере 27 сентября.

Столкновение спутника YunHai-1-02 с обломком ракеты «Зенит-2» произошло 18 марта 2021 г. на высоте 780 км при относительной скорости 13,26 км/с. Большинство объектов находятся на высоких орбитах, но у пары есть перигей, близкие к высоте МКС. 37 объектов космического мусора были каталогизированы далеко от столкновения — вероятно, их будет больше. Похоже, это первое крупное подтверждённое столкновение на орбите за десятилетие.

27 декабря 2021 г. на полигоне Плесецк был проведён третий тестовый пуск тяжёлой РН «Ангара-А5» с разгонным блоком «Персей» и с габаритно-массовым макетом полезной нагрузки (массой 2400 кг). Однако разгонный блок из-за проблем со вторым включением двигателя остался на орбите ниже 200 км, причём от него отделилось три фрагмента.

15 ноября 2021 г. Россия провела испытание противоспутникового оружия прямого вывода. В качестве цели был выбран КА «Космос-1408» массой 1750 кг, движущийся по орбите 490×465 км. По данным СККП США и НАСА [475], результатом стало катастрофическое разрушение цели. На середину марта было каталогизировано 1604 фрагмента. Высота апогея некоторых фрагментов достигает 1440 км. Значительная часть фрагментов оказалась на высотах от 200 до 400 км и довольно скоро сгорит. На рис. 3.2.17 показан прогноз времени существования облака фрагментов КА «Космос-1408».

К наблюдениям были привлечены хейстекковский сверхширокодиапазонный радар построения радиоизображений ИСЗ HUSIR миллиметрового диапазона (подвергшийся существенной модернизации в последние годы) — «Хусир» и сантиметровый радар «Голдстоун».

Кроме этого, в 4-м квартале 2021 г. случились ещё три разрушения. 23 октября 2021 г. разрушился КА «Космос-2499» на орбите 1507×1152 км с наклонением 82,44° с образованием 21 фрагмента, кроме родительского тела.

18 ноября 2021 г. разрушился низкоорбитальный спутник связи Orbcomm FM-5 на более низкой орбите 771×758 км с наклонением 45°. Сразу было каталогизировано восемь фрагментов, но в январе 2022 г. СККП США сопровождала уже 15.

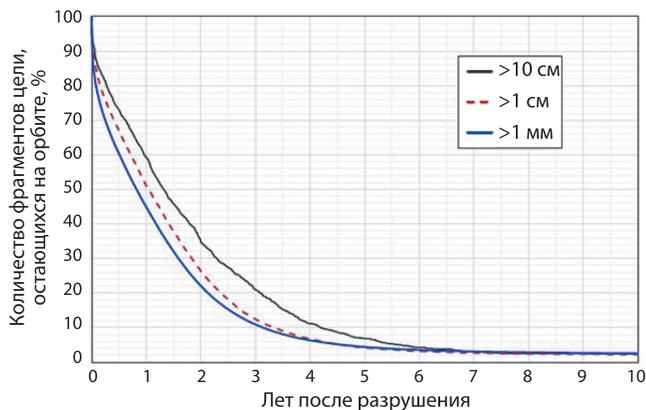


Рис. 3.2.17. Предсказываемое моделью время существования облака фрагментов КА «Космос-1408». Три кривые (сверху вниз) соответствуют размерам фрагментов 10 см, 1 см и 1 мм

26 ноября 2021 г. СККП США зарегистрировала разрушение 4-й ступени РН Minotaur-IV на орбите 580×567 км с наклоном 53,98° с образованием 21 фрагмента в дополнение к родительскому телу.

53-е разрушение двигателя осадки топлива системы обеспечения запуска двигателя 4-й ступени РН Протон произошло 15 апреля 2022 г. на высокоэллиптической орбите 19068×400 км с наклоном 64,8°. К 27 апреля обнаружено 19 фрагментов. Однако ввиду сложности обнаружения КО на высокоэллиптических орбитах их реально может быть значительно больше. К этому времени из общего числа 380 оказавшихся на орбитах двигателей СОЗ 318 сгорели в атмосфере (включая и 18 разрушенных), а 62 ещё остаются на орбитах (из которых 35 разрушенные).

3 июля 2022 г. произошло разрушение цилиндрической обшивки верхней ступени японской РН Н-2А на орбите 615×579 км с наклоном 98°. К концу июля обнаружено и отслеживалось 52 фрагмента разрушения. В июле 2020 г. произошло аналогичное разрушение кожуха обтекателя такой же японской РН с образованием 74 обломков. И что интересно. На обшивках не было никаких источников энергии, а СККП США не зафиксировала никаких сближений с ними каталогизированных КО. Так что единственной причиной этих разрушений могло быть только столкновение с мелкими, неконтролируемыми СККП США элементами КМ.

Из анализа приведённой истории разрушений КО можно сделать следующий вывод. **В значительном числе случаев наиболее вероятной причиной разрушений является столкновение с КМ.**

3.3. Каскадный эффект (синдром Кесслера)

В ОКП идёт самопроизвольный процесс повышения энтропии вследствие взрывов, столкновений, деградации поверхностей КО (под воздействием агрессивной среды).

Пока столкновения в космосе не затрагивали крупных КО и не выводили из строя дорогостоящих и выполняющих важные государственные, социальные, экономические и даже стратегические функции КА, они оставались незамеченными как в прямом, так и в переносном смысле. Но после гибели французского КА CERISE, американского «Иридиума-33», российского «Блиц», китайского YunHai-1-02 проблема опасности столкновений и их предотвращения стала выходить на передний план как в кабинетах менеджеров, конструкторов и исследователей космической техники, так и на страницах прессы.

Столкновения, как и взрывы, особенно опасны своими последствиями — образованием множества осколков и расширением занимаемой ими орбитальной области вследствие разброса векторов начальных скоростей образовавшихся фрагментов и их различия по параметру отношение массы к площади поверхности КО. И это расширение начинается сразу после разрушения взорвавшегося (или столкнувшихся) КО. Но этим дело не ограничивается. Дональд Кесслер из Джонсоновского космического центра НАСА первым обратил внимание, что при достижении определённой критической плотности мусора в космосе или некоторых орбитальных областях в результате всё возрастающего числа столкновений может начаться стремительно расширяющийся цепной процесс образования вторичных осколков, т.е. так называемый «каскадный эффект», или «синдром Кесслера». В этой, самой трагической фазе процесса засорения ОКП **космический мусор приобретает уже некий агрессивный характер**, которому уже мало что можно противопоставить. Это как пожар: легче предотвратить, чем тушить. Кстати, пожар — это тоже нечто вроде цепной реакции.

Впервые свою гипотезу Дональд Кесслер опубликовал в 1978 г. [205], когда многие специалисты даже не задумывались о проблеме КМ. Первые исследования каскадного эффекта были проведены в исследованиях [408, 409, 205, 191], а одни из последних в работах [213, 252].

Вероятность столкновений в любой орбитальной области растёт приблизительно пропорционально квадрату количества КО в этой области. При этом каждая орбитальная область имеет свою «критическую плотность» КО. Кроме того, временной масштаб протекания процесса для каждой области свой. Другими словами, в орбитальной области должно присутствовать достаточное количество объектов с большей массой для обеспечения в результате столкновений прироста фрагментов, превышающего убыль КО в результате схода с орбиты (например, под действием атмосферного торможения или принудительного снятия КО с орбит). Как только эта критическая плотность будет достигнута, образовавшиеся в результате столкновений фрагменты становятся главной причиной все возрастающей частоты новых столкновений, хотя временной масштаб событий может быть растянут здесь на десятки и сотни лет. Сравнение с ядерной цепной реакцией здесь лишь принципиальное (по характеру протекания процесса).

В 1990-х гг. уже существовали орбитальные районы, в которых пространственная плотность КМ превышала критический уровень. На рис. 3.3.1 показано, как изменяется с высотой критическая плотность КМ в низкоорбитальной области, зависящая от таких факторов, как сопротивление атмосферы, размеры КО, распределение наклонений орбит и др. [409]. Орбитальные области, в которых реальная плотность КМ превышает критическую, заштрихованы (это районы от 900 до 1000 км и около 1500 км). В них популяция КМ будет увеличиваться количественно, даже если не будет притока новых КО извне. При этом ввиду наличия синдрома Кесслера количество фрагментов от столкновений растёт экспоненциально. Это видно из сравнения распределений каталогизированных КО по высоте по состоянию на 1999 и 2010 гг. (см. рис. 2.3.5 и 2.3.6 на с. 90).

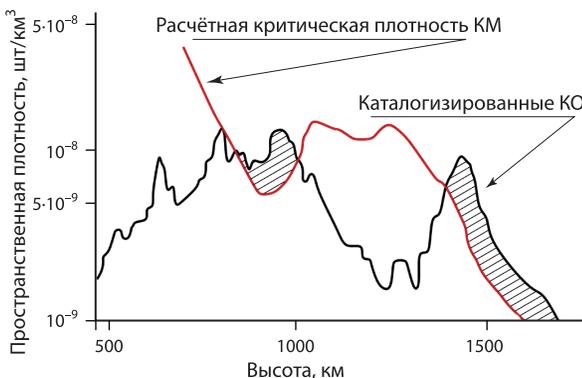


Рис. 3.3.1. Критическая плотность в низкоорбитальной области

152 Для среднеразмерного и мелкого КМ эта разница была бы ещё более впечатляющей, так как в результате столкновений КО мелких осколков образуется значительно больше, чем крупных, и ещё больше, чем при взрыве (см., например, рис. 2.1.1 на с. 75).

Конечно, запуски новых КО (вместе с их РН и сопутствующим КМ) и взрывные разрушения также вносят вклад в рост популяции КМ в этих орбитальных районах, тем более что эти районы наиболее привлекательны для функционирования многих типов КА и поэтому пользуются повышенным спросом. Соответственно «оптимизация» условий возникновения каскадного процесса столкновений КО там будет поддерживаться постоянно.

В низкоорбитальных районах ОКП, в которых ещё не достигнута критическая плотность КО, она может повыситься за счёт фрагментов от столкновений в соседних. Ранее уже говорилось о том, что многие фрагменты, образовавшиеся в результате столкновений, отделяются с очень высокими скоростями, и их орбиты распределяются довольно широко в пространстве. За счёт этого явления, а также из-за того, что фрагменты от столкновений в верхних районах низкоорбитальной области будут постепенно снижаться ввиду сопротивления атмосферы, в прилегающих районах, в которых критическая плотность ещё не достигнута, реальная плотность будет повышаться. Кроме того, фрагменты от столкновений ВЭКО с НОКО будут пересекать низкоорбитальные районы на очень высоких скоростях, создавать дополнительную угрозу столкновений и провоцировать каскадный эффект.

Высокие орбитальные районы (объём которых увеличивается с ростом высоты) обычно менее засорены, чем низкие. И скорости столкновений там ниже, что обуславливает образование меньшего числа фрагментов при столкновениях. При этом осколки распространяются там шире, чем на низких орбитах (см. подразд. 1.1 и рис. 1.1.3 на с. 16), что снижает вероятность новых столкновений в исходном орбитальном районе. Эти факторы не способствуют быстрому развитию каскадного эффекта на высоких орбитах.

На ГЕО, в окрестности которой, как мы видели, скорость столкновений мала и векторы скоростей КО при их сближении в большинстве близки к коллинеарным, даже если столкновение случится, осколки распространятся в гораздо большем объёме, чем на более низких орбитах, и каскадного эффекта придётся ждать, возможно, тысячи и десятки тысяч лет [176].

Так что в отличие от низкоорбитальных областей на ГЕО популяция КМ будет расти в основном за счёт взрывов и продолжающихся запусков новых КА, а не столкновений. И хотя геосинхронной области и, в частности, окрестности ГЕО не грозит каскадный эффект (по крайней мере, в обозримом будущем) и опасность КМ в этой области довольно мала, тем не менее, эта опасность будет сохраняться и только возрастать в течение тысячелетий. КМ там будет только накапливаться ввиду отсутствия практически факторов торможения КО в этой области.

Начало цепной ядерной реакции трудно не заметить (простите автору эту иронию). Она развивается стремительно, в ничтожные доли секунды. С синдромом Кесслера дело обстоит иначе именно из-за другого масштаба времени. В космической ситуации, оказывается, не так просто понять, начался цепной процесс или нет. Ввиду растянутого масштаба времени судить приходится и по косвенным признакам. Именно поэтому нет единодушного мнения среди учёных на этот счёт. Трудность осмысления этого явления двойная: нельзя точно предсказать начало процесса и нужно уяснить временной масштаб его развития. И то, и другое сильно зависят от многочисленных исходных неопределённостей. Последние доставляют большие трудности при моделировании соответствующих процессов, снижая достоверность его результатов.

Многие независимые модели будущей популяции КМ подтверждают, что каскадные столкновения уже происходят на околоземных орбитах [213, 409, 205, 410, 252, 191, 212, 411–413 и др.].

Эти модели в своей основе имеют различные методологии и отличаются одна от другой ключевыми исходными данными и параметрами, такими как начальная популяция, ко-

личество и распределение осколков, образующихся при взрыве и столкновении, и т.д. Однако их прогнозы дают схожие результаты. Все они предсказывают «более (круче) чем линейный» (скажем прямо, экспоненциальный) рост популяции КМ в области низких орбит на следующее столетие.

Ещё в 1993 г. Э. Поттер (*англ.* A. Potter) [191] привёл свидетельства уже начавшегося каскадного процесса в некоторых областях орбит, в частности, на высотах между 900 и 1000 км. Результаты наблюдений, анализа, расчёта и моделирования указывают на значительный рост частоты столкновений в этом диапазоне высот. На рис. 3.3.2 в логарифмическом масштабе дано сравнение количества столкновений в год с частицами размером от 1 мм до 1 см в 1990 и 2020 гг.

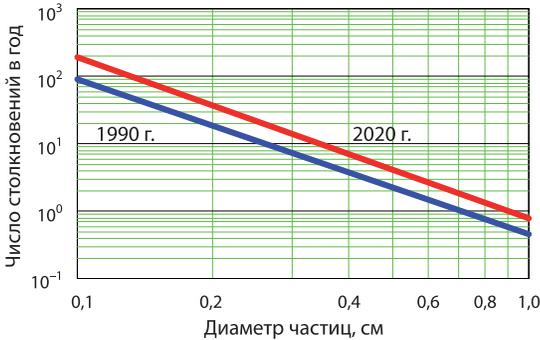


Рис. 3.3.2. Частота столкновений с частицами различных размеров на высотах 900–1000 км

По мнению некоторых экспертов [213], каскадный эффект уже начался для малоразмерной фракции КМ и не только для малоразмерной [191]. Для крупных КО этот процесс, по мнению ряда учёных, ещё явно не наблюдается, но конструкторы уже давно вынуждены бронировать КА. Достаточно взглянуть на возвращённые на Землю экспонированные в космосе поверхности, посмотреть историю зарегистрированных столкновений (а последние характеризуют лишь долю реальных столкновений), результаты прогнозирования засорённости на сотню лет вперёд, и эти опасения становятся убедительными.

Практически в каждом номере периодического (ежеквартального) журнала НАСА “Orbital Debris Quarterly News” публикуются сообщения об очередных официально зарегистрированных столкновениях в космосе, иногда о нескольких столкновениях в квартал.

Каскадный процесс столкновений не обязательно будет охватывать полностью все ОКП, тем более одновременно. Орбитальная область, в которой он начнётся, должна отвечать следующим требованиям:

- достаточно высокая плотность КО,
- не очень сильные атмосферные возмущения,
- достаточно высокие скорости столкновений.

Смысл второго требования — количество выбывающих из данной области КО не должно снижать плотности потока КМ в ней.

Перечисленные условия обеспечивают весьма значительное число высокоэнергетических столкновений — основу быстрого развития каскадного процесса.

Коль скоро каскадный процесс столкновений начался, его нельзя остановить снижением частоты запусков новых КА и даже их прекращением, поскольку этот процесс независим, самодостаточен и поддерживает сам себя. Если в данную орбитальную область, в которой начался цепной процесс столкновений, прекратить приток новых масс извне,

154 количество столкновений, в конце концов, начнёт снижаться, но не ранее, чем через сотни и тысячи лет, так как большинство крупных КО будет продолжать разрушаться на мелкие обломки и осколки. Эти последние послужат причиной дальнейших, вторичных столкновений. В этом есть аналогия и с обычной ядерной цепной реакцией. Из-за резко возросшего количества вторичных КО вероятность столкновений действующих КА с КМ может оказаться очень высокой.

После начала каскадного процесса при достижении некоторой критической плотности засорённости ОКП его развитие поддерживается тремя главными факторами: 1) большим количеством образующихся при столкновении КО осколков (из-за высокой энергии столкновений даже при небольшой массе одного из участвующих в нём КО), 2) высокой скоростью КО, которая не только квадратически усиливает энергию столкновений, но и позволяет КО за короткое время «пронизывать» гигантские области космоса, тем самым увеличивая шансы столкновения и в более отдалённых областях, 3) орбитальной замкнутостью КМ в ОКП, из-за которой продукты разрушения (т.е. «размножившийся» КМ) в основной своей массе остаются в ОКП, увеличивая вероятность дальнейших столкновений.

Некоторые продукты разрушения из-за большого разброса начальных орбитальных параметров могут покинуть окрестность Земли, но эта возможность нарушает замкнутость ОКП лишь теоретически и не может считаться определяющей в рассматриваемом процессе. Тем более что пока эти частицы будут избавляться от земного притяжения, они по пути смогут ещё успеть столкнуться с КМ или с действующими КА.



Рис. 3.3.3. Патриарху исследований техногенной засорённости ОКП, «автору» каскадного эффекта Дональду Кесслеру вручают награду имени Джерома Ледерера «Пионер космической безопасности» 2008 г. Международной ассоциации оценки достижений в области космической безопасности [413]

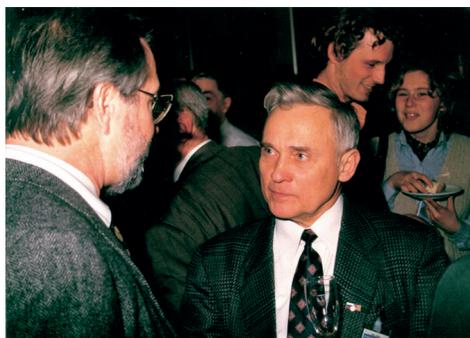


Рис. 3.3.4. Автор беседует с создателем теории каскадного эффекта Дональдом Кесслером

Итак, главной потенциальной опасностью со стороны КМ представляется мрачная перспектива развития каскадного эффекта, который приведёт к практической невозможности использования ОКП в научных, исследовательских, социальных, хозяйственных, коммерческих, военных и других целях. При этом может сильно пострадать и уже страдает экологическая обстановка на Земле и в ОКП. А, возможно, это уже не перспектива, а реальность, и катастрофические столкновения действующих КА CERISE в 1996 г., «Иридиума-33» с «Космосом-2251» в 2009 г., «Блиц» в 2013 г. сигнализируют о начале «синдрома Кесслера» [292] (рис. 3.3.3, 3.3.4).

3.4. Столкновения с мелким космическим мусором

Для корректной оценки роли мелкого КМ в воздействии среды на КО нужно прежде всего избавиться от порочного убеждения, что, якобы, крупные КО представляют действительно серьёзную угрозу для действующих КА, а мелкий КМ их якобы только поцарапает.

Во-первых, если крупный КО способен полностью разрушить КА, то мелкий КМ может вывести из строя его некоторые важные внешние устройства, узлы и блоки КА. Во-вторых, мелкая частица при столкновении с КА с относительной скоростью 14–15 км/с и более может нанести ему ущерб более ощутимый, чем крупный осколок, столкнувшийся с КА при меньшей относительной скорости. В-третьих, у КА есть крайне уязвимые, чувствительные места, как, например, оптические поверхности, различные датчики с поверхностным рабочим слоем, солнечные панели и т.п., для которых нежелательна встреча даже с очень мелким КМ, так как и лёгкая царапина обернётся для них ощутимым повреждением, а то и утратой функциональности.

Результат удара сантиметровой алюминиевой сферы в полусантиметровую оболочку КА на скорости 10 км/с — типичный пример повреждения от КМ. По данным американских исследователей [5], такой удар может полностью расплавить и, по крайней мере, частично испарить саму ударившую частицу и сделать пробоину в стенке КА с входным отверстием диаметром 3,3 см и выходным — 2,7 см. Сила удара, вызванная расширяющимся расплавом частицы КМ и материала стенки, распространяясь на компоненты КА, расположенные в 2,5 см позади пробитой стенки, может превысить допустимую нагрузку для большинства материалов внутренних структур КА. В 15 см позади стенки она будет все ещё близка к нагрузке, допустимой для обычно используемых алюминиевых сплавов.

Удары мелкого КМ в хрупких материалах могут создавать трещины, распространяющиеся далеко за пределы кратеров и пробоин (см. рис. 3.1.25, 3.1.26 на с. 124, 125 [337]). Они могут приводить к локальным образованиям плазмы, которая может вызывать разряды, замыкания и другие нарушения в электронном оборудовании, солнечных панелях и т.д. Повреждения от ударов КМ зачастую сочетаются с другими видами воздействий внешней агрессивной среды (атомарный кислород, ультрафиолетовое излучение) и вызывают совместно в итоге большие повреждения, чем сумма индивидуальных повреждений от каждого фактора в отдельности — супераддитивная функция композиции.

И очень мелкие частицы способны вызвать серьёзные повреждения. Например, частица диаметром 0,75 мм, ударяющаяся в полусантиметровое алюминиевое внешнее покрытие двигателя ориентации солнечных панелей, приведёт к образованию осколков внутренней стенки покрытия и повредит двигатель. Частица диаметром 1 мм на относительной скорости 10 км/с может пробить радиатор с тонкостенными трубами охлаждения (какие используются в космических реакторах. Если в контуре охлаждения не предусмотрено автоматическое перекрытие или «отсечка» пробитых труб радиатора, может произойти даже полная утечка охладителя.

А в случае, если удары мелкого КМ не вызывают серьёзных структурных повреждений, создаваемые ими сколы, кратеры, пробоины, царапины, мелкие трещины приводят к постепенной деградации поверхности КА, ослабляя её и делая более уязвимой для последующего воздействия агрессивной внешней среды.

156 Не удивительно, что в настоящее время значительное внимание исследователей воздействия КМ на КА обращено именно на мелкий КМ. Этим объясняется и большой объём соответствующих публикаций, причём значительно возросший в последнее время.

Мелкие частицы сталкиваются с подобными себе и крупными гораздо чаще, чем крупные КО между собой. При этом генерируются обширные потоки мелких частиц, часть которых покидает окрестности Земли, но большинство после недолговременной концентрации в области столкновения остаётся на долгоживущих высокоэллиптических орбитах. Это подтверждается и измерениями с LDEF. Например, тыльная поверхность этого КА испытала столкновения с малоразмерным КМ, следы которых можно объяснить только высокой эллиптичностью орбит оставивших их частиц [414]. Большинство из этих частиц — чешуйки отслоившейся краски и частицы окиси алюминия. В то же время, во многих кратерах на тыльной поверхности LDEF были обнаружены медь, серебро, никель, нержавеющей сталь, которые могли быть оставлены фрагментами конструктивных или электрических компонент неизвестных КА [415].

Эксперимент с LDEF засвидетельствовал наличие довольно интенсивных долгоживущих потоков мелкого КМ, происхождение которых можно объяснить их точечным источником — столкновением или взрывом КО [190].

Вероятность столкновения КА с частицами диаметром не более 1 мм в полёте даже сравнительно небольшой продолжительности практически равна единице. Сомнения в этом тут же исчезают при первом взгляде на поверхность возвращённого из космоса КО. Поверхности КА Euresca, LDEF, Solar Max, Palara и др., возвращённых на Землю после нескольких лет пребывания в космосе, оказались испещрёнными множеством изъянов самого разного характера, оставленных частицами КМ.

Ещё к 1995 г. после 70 полётов шаттла было заменено 60 иллюминаторов из-за повреждений от ударов КМ. Повреждения были вызваны ударами частиц размерами с крупинки соли, движущимися со скоростью 8–10 км/с. По данным NASA на март 1997 г., в течение последних 16 мес эксплуатации шаттлов КМ настолько серьёзно повредил их иллюминаторы, что 18 окон пришлось заменить, а каждое стоило тогда более 50 тыс. дол. Иллюминаторы шаттла состоят из трёх бронестёкол — двух внутренних (компресс-окна), обеспечивающих нужное давление в кабине экипажа, и одного наружного, защищающего два внутренних от ударов КМ. В среднем после каждых двух полётов у шаттла приходилось заменять все иллюминаторы (!). Это было приблизительно один раз в год. **И всё это последствия столкновений именно с мелким КМ.**

Наиболее уязвимыми у КА оказались солнечные панели. На некоторых аппаратах они уже через три месяца полёта оказывались выведенными из строя. Повреждение обшивки КА, иллюминаторов, солнечных батарей, антенн, топливных и газовых баллонов, других навесных элементов если и не выводит их преждевременно из строя, то, во всяком случае, сокращает срок их службы. А это всё — удорожание освоения космоса, эксплуатации космической техники и космической деятельности вообще, снижение её надёжности и безопасности, а также сильная нагрузка на бюджет, т.е. на карман налогоплательщика (повод для внимания всех категорий населения к рассматриваемой проблеме).

Наконец, уже официально зарегистрирован ряд катастрофических столкновений действующих КА с мельчайшими частицами КМ. В 2013 г. российский метрологический спутник ретрорефлектор «Блиц» (шар диаметром 17 см и массой 7,8 кг) был разрушен на высоте 825 км при столкновении с микрочастицей массой ~ 0,035 г размером около 3 мм при относительной скорости столкновения ~12,3 км/с [416, 417].

По сообщению ЕКА, в августе 2016 г. КА построения радиолокационных изображений EKA Sentinel-1A столкнулся с частицей миллиметрового размера массой около 0,2 г и поулчил вмятину диаметром 40 см (это зафиксировали бортовые камеры), изменил орбиту, поменял ориентацию, снизилась также мощность его солнечных батарей [418].

Ещё есть сведения, что французский спутник Telesat-1A был выведен из строя микрометеороидом — на этот раз естественным, но все равно мусором.

Из-за трудностей обнаружения КО размером меньше 1 м на ГЕО и даже регистрации самих разрушений, порождающих малые осколки, статистика и характеристики столкновений на ГЕО и их последствия плохо изучены. Измерительные данные об объектах на ГЕО (в отличие от НОКО) мы получаем лишь эпизодически.

Единственно, что известно наверняка, столкновения на ГЕО ввиду сравнительно низких относительных скоростей, почти коллинеарности и сонаправленности векторов скоростей КО в среднем менее опасны и повреждения от них гораздо менее вероятны и не так катастрофичны, как в низкоорбитальной области. Поэтому на ГЕО КА защищают преимущественно только от микрометеороидов, но не от техногенного КМ. Причём эти знания получены теоретически. Тем не менее, очень важно лучше понять истинное состояние среды в области ГЕО, особенно характеристики потоков средне- и малоразмерного КМ, так как в этой орбитальной области работают наиболее дорогостоящие КА. ГЕО — это крайне ограниченный по ёмкости и весьма ценный ресурс для размещения там новых аппаратов, а время существования КО на ГЕО — десятки, сотни тысяч и миллионы лет [6].

Большим белым пятном в наших представлениях о мелком КМ представляются источники его образования и его эволюция. Характеристики популяции мелкого КМ сильно зависят от времени, и прогноз долгосрочной её эволюции — крайне важный, но почти не тронутый пласт для исследований.

3.5. Возможности и средства оценки повреждений космических аппаратов от ударов космического мусора

Во-первых, осмотр и первичный анализ повреждений от ударов КМ возможен непосредственно в космосе силами космонавтов. Так было и на МКС, и на телескопе «Хаббл», и ещё ранее на советских орбитальных станциях и комплексах (хотя в то время эта проблема не стояла так остро). Известно также множество случаев возвращения на Землю экспонированных в космосе поверхностей и самого тщательного их анализа в лабораторных условиях [289]. Очень много полезной и необходимой информации для исследований воздействия КМ и проектирования КА дают наземные лабораторные испытания материалов и техники с применением сверхскоростных ударов. В качестве вспомогательного средства используется компьютерное (аналитическое и цифровое) моделирование.

В наземных лабораториях исследуются

- непосредственные результаты ударов КМ или его имитаций;
- воздействие ударов КМ на функциональные характеристики КА и его компонент, их надёжность, живучесть;
- эффективность методов противодействия повреждениям от ударов КМ (защитные покрытия, их материалы, конструкция, компоновка);
- воспроизведение разрушений КО (КА, РН, крупного КМ) в результате взрывов и столкновений, образование и разлёт осколков.

При этом основной метод моделирования — экспериментальный сверхскоростной удар, а главная цель — выяснить, как КА или его компоненты смогут перенести столкновение в космосе с КМ. Вторая цель — уточнить влияние этих явлений на процесс засорения околоземного космического пространства. Поскольку практически нереально и экономически накладно построить целый КА для последующего разрушения в лаборатории, испытания в основном проводятся на отдельных компонентах КА, их сборках (топливные баки, связки проводов, изоляционные материалы, структурные блоки) и сравнительно недорогих макетах. Подробнее об этом см. в публикациях [419, 420, 5, 421, 422].

В рамках сотрудничества японского университета Кюсю (*англ.* Kyushu University) и подразделения НАСА по проблемам техногенного засорения космоса недавно было проведено

семь уже натуральных ударных тестов, где целями служили реальные КА — микроспутники размерами от 15×15×15 до 20×20×20 см. Масса этих аппаратов составляла до 1,5 кг. Каждая цель была полностью оборудована функциональной электроникой (включая контуры, батареи, приёмники, передатчики). В двух последних тестах на спутниках были смонтированы солнечные панели и многослойное защитное покрытие корпуса. Все мишени были обстреляны снарядами различных размеров, форм и при разных скоростях ударов. Образовавшиеся фрагменты размерами до 2 мм были собраны, изучены и каталогизированы. Результаты тестов использованы для улучшения модели разрушений НАСА [432, 424].

Многие аналитические теории предсказания повреждений от ударов КМ основаны с целью упрощения вывода математических зависимостей на предположении сферичности формы КМ. Однако реальный КМ характеризуется большим разнообразием форм. Удар несферического тела может причинить значительно большее повреждение во многих ситуациях. Например, глубина проникновения и объём кратера от удара в толстую плоскую мишень сильно зависят от длины снаряда вдоль его оси полёта в момент удара [425]. Плоские снаряды в виде пластинок приводят к большим повреждениям, чем сферические той же массы и при той же скорости [426].

Экономически нереально испытывать все компоненты при всех возможных условиях ударов КМ. Поэтому критические компоненты подвергают испытаниям в номинальных условиях, а затем обращаются к компьютерному моделированию с целью распространения полученных результатов на другие компоненты и космический аппарат в целом, а также на другие условия внешней среды.

Компьютерное моделирование служит связывающим звеном между результатами обследования поверхностей, реально подвергшихся воздействию мусора в космосе, и предположениями учёных, проверяет и калибрует эти последние. Модели также позволяют экстраполировать данные, полученные в лаборатории в ограниченном диапазоне условий, на широкий их спектр, что практически невозможно воспроизвести в лаборатории.

При проверке надёжности броневых покрытий также прибегают к сочетанию натуральных экспериментов и компьютерного моделирования. И вообще, сочетание сверхскоростных тестов и компьютерного моделирования показало себя довольно мощным инструментом оценки выживаемости КА и КС в условиях ударов КМ.

Ударные испытания применяются и для исследования механизма образования осколков разрушения, образующихся при сверхскоростном столкновении в космосе. Знать это очень важно для прогнозирования эволюции популяции КМ. Однако такие эксперименты очень дороги и их проведено немного. Конечно, полученные в них результаты можно экстраполировать с помощью компьютерных моделей, но со значительной степенью неопределённости ввиду ограниченности имеющихся данных.

Существует множество экспериментальных средств для моделирования и изучения ударов космического мусора, с помощью которых можно воспроизвести испытания с довольно крупными снарядами, разгоняемыми до больших скоростей. Однако есть определённые границы возможностей и в этом направлении. Всё разнообразие форм, размеров и состава КМ пока не может быть испытано во всех диапазонах скоростей. Бывают трудности с разгоном крупных снарядов до типичных скоростей столкновений в низкоорбитальной области ОКП. Эти ограничения затрудняют проектирование защитных покрытий, адекватных действительной космической среде, снижают точность предсказания ущерба от столкновения со среднеразмерными КО, добавляют неопределённость в прогнозирование будущей популяции засорённости околоземного космического пространства.

При испытании броневых покрытий КА в лабораторных условиях обычно используются ударные частицы размером от 1 мм до 1 см и массой до нескольких грамм. Однако вполне возможно провести тест и со значительно более крупными снарядами, разгоняемыми до типичных скоростей столкновений на высоких орбитах.

Стандартная лабораторная двухступенчатая газовая пушка на лёгком газе может разгонять объекты размером до 50 мм до скоростей около 8 км/с, а некоторые пушки ускоряют, правда более мелкие объекты, до 10 км/с и выше. Стандартный снаряд — сфера, но возможны и другие формы — тонкие пластинки, длинные стержни, цилиндры [427].

Поскольку легкогазовая пушка не может разгонять снаряд до скоростей, типичных для столкновения НОКО (10–15 км/с), были созданы ультрасверхскоростные пушки с расширенным диапазоном скоростей специально для изучения воздействия КМ на КА, например, способные разгонять небольшие титановые пластинки до 15,8 км/с [428]. В России существуют крупные камеры, в которых можно квазинатурно моделировать экспериментальные орбитальные взрывы и столкновения в контролируемой среде [429].

Конструкторы защитных покрытий используют в работе (как вспомогательный инструмент исследований) аналитические методы, включающие уравнения «баллистического предела» [430–432]. С их помощью рассчитываются размеры частицы, останавливаемой данным конкретным щитом, в функции скорости и угла удара, плотности атакующей частицы, размеров щита [433]. Цель — получение номинальных оценок толщины щита и промежутков между слоями для защиты от КМ данных размеров, допустимых скоростей и углов удара. Есть и аналитические модели для предсказания повреждений от ударов и их последствий, но они несколько сложнее.

К сожалению, не хватает моделей стандартизированных оценок рисков для определения вероятности выхода из строя компонент КА вследствие удара КМ и стандартизированных моделей ухудшения рабочих характеристик компонент КА. Из-за этого последствия ударов КМ для космического аппарата и его выживаемость приходится оценивать косвенно, прибегая к рискованной экстраполяции [5].

Следует иметь в виду, что диапазон возможностей разгона частиц нужной массы, размеров и формы при моделировании ударов КМ пока ограничен. Эти ограничения затрудняют проектирование броневых покрытий КА, адекватного действительной космической среде, снижают точность прогнозирования ущерба от столкновения с сантиметровыми и миллиметровыми КО, добавляют неопределённость в предсказание будущей популяции КМ.

Другим слабым звеном в конструкциях щитов от КМ часто бывает предположение, что крупный КМ состоит из алюминия, а мелкий из окиси алюминия. В реальности же некоторые КО состоят из материалов более высокой плотности. При обследовании поверхности КА LDEF, как уже говорилось выше, обнаружены следы ударов частиц из нержавеющей стали, серебра, меди [434]. Щит, готовый выдержать удары алюминиевого КМ, может оказаться неспособным противостоять ударам более плотных тел.

Конечно, практически нереально испытывать щиты и другие компоненты КА против ударов КМ всех возможных размеров, масс, форм, составов во всех диапазонах космических скоростей. Здесь нужно обращаться за помощью к компьютерным моделям, откалиброванным по достаточному объёму экспериментальных данных, для экстраполяции на недостающие условия испытаний.

3.6. Мелкий космический мусор и его опасность

В подразд. 3.4 мы поговорили о столкновениях с мелким КМ. Однако его опасность не исчерпывается одними столкновениями. И проблема мелкого КМ настолько важна, что нуждается в более подробном рассмотрении и освещении более широких её аспектов. Прежде всего, оказалось, что популяция мелкого КМ разрастается во всех областях ОКП стремительнее, чем популяция крупного КМ. В виду ограниченности и разрозненности информации о мелком КМ, скудности его измерений и их доступности лишь в крайне ограниченных областях ОКП исследовательской группе МО РФ пришлось провести весьма трудоёмкую и скрупулёзную работу по выявлению и интеграции такой информации [435, 436]. Результат её отражён на рис. 3.6.1 и 3.6.2.

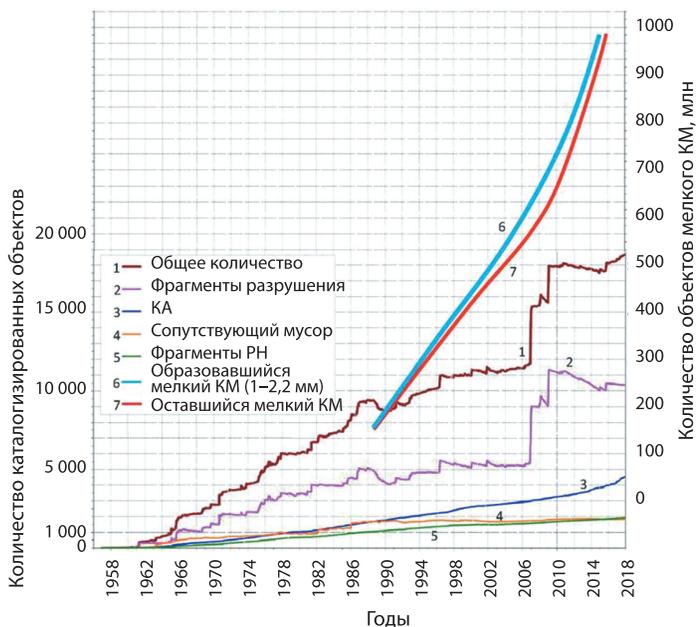


Рис. 3.6.1. История засорения ОКП (в том числе мелким КМ размером 1–2,5 мм) с 1957 г.

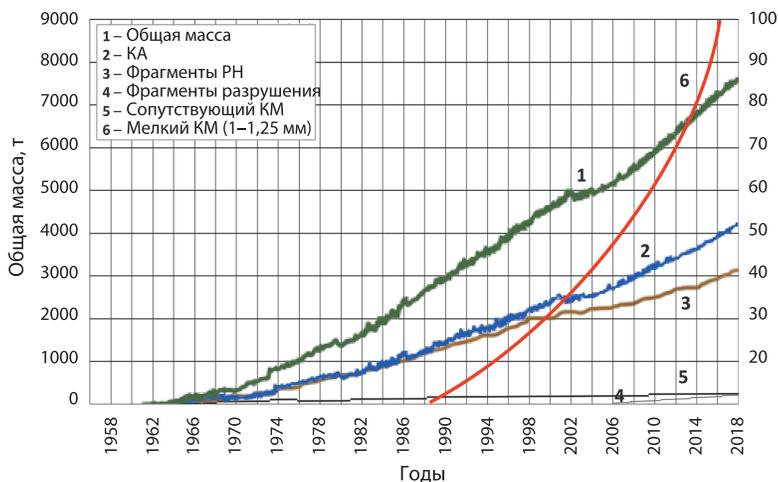


Рис. 3.6.2. Изменение (рост) суммарной массы КМ в ОКП

О последствиях засорения ОКП крупным, каталогизированным КМ говорилось достаточно много, а вот опасность мелкого часто игнорируется, а именно с ним связаны наиболее сложные и плохо предсказуемые проблемы. Получению более полного представления о последнем (о его количестве, составе, распределении в пространстве, динамике и опасности) препятствуют, по крайней мере, два фактора: явная недооценка опасности мелкого КМ в прошлом и как бы традиционно в настоящем и дефицит соответствующих измерений, являющийся прямым следствием нехватки средств, способных его наблюдать.

В оценках опасности мелкого КМ следует отталкиваться не столько от массы, сколько от количества и скорости частиц, точнее от её квадрата, и ряда других особенностей мелкого КМ и его контроля. В отличие от мелкого КМ, нет принципиальных проблем

уводить низкоорбитальные отработавшие крупные КА с рабочих орбит в плотные слои атмосферы, где они вскоре сгорят, а с высоких орбит — на орбиты захоронения. Эта операция пока недоступна в необходимых масштабах для мелкого КМ, особенно на сравнительно высоких орбитах.

На рис. 3.6.1 представлено (по данным многолетних наблюдений, анализа поверхностей возвращённых из космоса КО, лабораторных исследований, экспериментов и моделирования [435]) изменение количества КМ в ОКП с 1957 по 2018 гг. Из него следует, что происходит прогрессивное засорение космоса во всех диапазонах размеров КМ. Шкала количества крупного КМ — слева, мелкого — справа. Кривая 6 представляет динамику образования мелкого КМ (размером 1–2,5 мм в диапазоне высот 400–2000 км), а кривая 7 — остающееся количество после частичного его сгорания (в среднем 10 % в год). Нелинейность изменения количества сгорающего КМ во времени объясняется 11-летними циклами вариаций солнечной активности.

На основе этих данных можно рассчитать, по крайней мере ориентировочно, нарастание массы мелкого КМ в ОКП на фоне роста массы крупных КО (рост массы крупных КО приводится из [437, 438]).

Спектральный анализ кратеров на поверхности КА от столкновений с КМ показывает, что состав КМ включает чуть ли не всю таблицу Менделеева. Однако в основном КМ состоит из алюминия. Значительно меньше в нём кальция, магния, титана, железа, меди, олова, свинца, никеля, хрома, серебра, золота, прочих металлов, кремния, композитных материалов и пластмасс [434, 435, 440].

Исходя из известных оценок их пропорции и полагая условную среднюю плотность частиц КМ равной 3 г/см^3 (у алюминия — $2,7 \text{ г/см}^3$), получим для фракции КМ размером 1–2,5 мм только в низкоорбитальной области (для высот от 400 до 2000 км) кривую изменения суммарной массы, представленную на рис. 3.6.2 (кривая б).

Как видно из графиков на обоих рисунках, нарастание количества и массы мелкого КМ происходит стремительнее, чем крупного (в обоих случаях в среднем экспоненциально).

Динамика популяций мелкого КМ сильно (значительно больше, чем для крупного) зависит от высоты орбит, размеров частиц и уровня солнечной активности. На рис. 3.6.3 и 3.6.4 показана зависимость времени существования мелкого КМ на круговой орбите высотой 600 км и эксцентричной орбите с перигеем на 600 км и апогеем на 1400 км при различных уровнях солнечной активности.

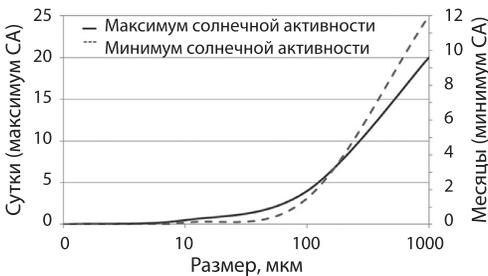


Рис. 3.6.3. Время существования мелкого КМ на высоте 600 км при максимальной и минимальной солнечной активности

Ещё весьма показательный факт. Если в 1994 г. масса мелкого КМ данного размера составляла менее 0,5 % от общей массы КМ, то к 2018 г. их соотношение достигло 1,4 %, т. е. за 24 года возросло почти в три раза. За этот же период количественное соотношение мелкого КМ (только в низкоорбитальной области, где мы располагаем определённым количеством данных для построения таких оценок) и каталогизированных КО (во всех орбитальных областях) возросло также почти в три раза. В абсолютном же выражении

количество мелкого КМ выросло со 172 млн до 1,25 млрд, т.е. более, чем в семь раз. В близком к этому соотношении возросла и его суммарная масса. И это только в низко-орбитальной области, где она в 2018 г. заметно превысила 100 т. С увеличением размеров КМ все эти соотношения постепенно «смягчаются».

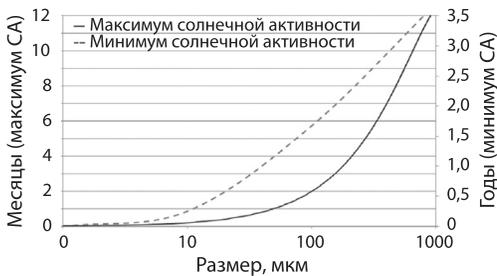


Рис. 3.6.4. Время существования мелкого КМ на орбите 600×1400 км при максимальной и минимальной солнечной активности

Наглядным и показательным выступает сравнение прироста мелкого КМ (размером от 1 мм до 10 см) за три года в одной из наиболее заселённых орбитальных областей (на высотах от 800 до 900 км) по данным реальных наблюдений радаром «Хейстек» и НАХ в 2006 и 2009 гг. Этот прирост составляет в среднем 20–30 % (рис. 3.6.5) [439].

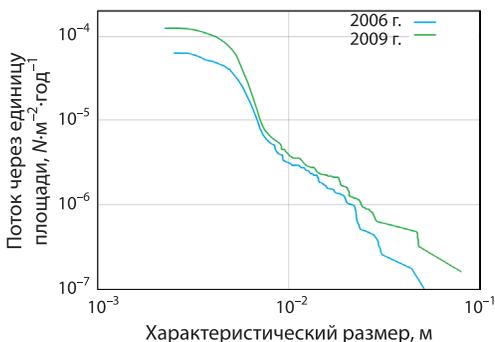


Рис. 3.6.5. Сравнение потоков мелкого КМ через единицу площади на высотах 800–900 км в зависимости от размеров КМ по данным наблюдений радаром Хейстек и НАХ в 2006 и 2009 гг.

Космический мусор любой категории представляет опасность разного рода (и не только из-за угрозы столкновений):

- 1) для действующих КА, неся угрозу потенциального столкновения с ними;
- 2) для населения Земли и наземных сооружений (особенно для ядерных объектов и хранилищ химического и бактериологического оружия) в результате падения крупных останков КМ, преодолевших сопротивление атмосферы (по данным ООН, 80 % населения Земли либо находятся в лёгких укрытиях, либо вообще не защищены от падающих на Землю обломков космических структур);
- 3) для экологии Земли и ОКП, снижая прозрачность околоземного космоса и атмосферы (что нарушает сложившийся за миллиарды лет свето-теплообмен между Землёй и космосом, а также создаёт помехи астрономическим наблюдениям — прежде всего оптическим, и это давно уже заметили астрономы-наблюдатели [2, 436, 441, 6, 5, 268]), учёные РАН через информационное агентство Интерфакс предупредили, что на Земле может стать темнее из-за космического мусора;
- 4) для собственно состояния засорённости ОКП, провоцируя и ускоряя каскадный эффект в результате столкновений не только с действующими КО, но с любыми, что приводит к скачкам увеличения количества КМ.

Что касается крупного КМ, наиболее острой и непосредственной видится опасность 1-го, 2-го и 4-го родов.

С точки зрения опасности для космической деятельности отличие популяции мелкого КМ от популяции крупного состоит в следующем:

- 1) мелкий КМ не каталогизирован, следовательно, нет достаточно точных данных о векторах состояния мелких КО (как правило, нет вообще таких данных), и, таким образом, столкновения с ними непредсказуемы (действующим КА невозможно от них уклониться);
- 2) количество мелких КО, по крайней мере, на несколько порядков больше количества крупных, и этот разрыв прогрессивно увеличивается;
- 3) распределения скоплений мелкого КМ в ОКП и кинетические параметры его элементов изменяются быстрее, чем распределение и параметры движения крупных КО (ввиду большего отношения площади поверхности к массе);
- 4) опасностью любого мелкого КМ (даже в субмиллиметровом диапазоне) для действующих КА пренебрегать нельзя;
- 5) снижение прозрачности ОКП и атмосферы происходит преимущественно из-за накопления мелкого КМ; увеличение или уменьшение потоков излучения в диапазонах длин волн, диссоциирующих молекулярный кислород и озон на высотах 15–30 км, приведёт к значительным изменениям в озоновом слое Земли;
- 6) характер и степень опасности мелкого КМ сильно варьируют и значительно (более чем крупного) зависят от параметров столкновения (угла вектора скорости частицы КМ к поверхности КА, уязвимости в малой окрестности места удара и т. д.);
- 7) ввиду значительных трудностей наблюдения мелкого КМ нам доступно очень мало данных о количестве, составе, распределении этой популяции в ОКП и её динамике.

Теоретически и экспериментально доказано, что при столкновении КО образуется значительно больше мелкого КМ, чем при взрыве [191], и столкновения происходят намного чаще, чем взрывы, причём столкновения мелких КО — на несколько порядков чаще, чем крупных (табл. 3.6.1). Учитывая эти и ряд других обстоятельств, специалисты доказали, что основной источник образования мелкого КМ — взаимные столкновения некаталогизированных (сравнительно мелких) КО [2, 442, 444, 435].

Таблица 3.6.1. Среднее число столкновений N_{cp} в год КМ разных размеров

Размер, см	0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	10	20
N_{cp}	220	325	5,2	0,854	0,123	0,052	0,038

Например, вклад последних в образовании КМ размером от 1 до 10 мм, по крайней мере, на порядок больше вклада взаимных столкновений каталогизированных КО. По расчётам отечественных и зарубежных специалистов, от столкновений КО ежегодно образуется свыше 30 млн фрагментов размером от 1 до 2,5 мм, и лишь 10 % из них сгорает в результате атмосферного торможения (на всех высотах более сильного, чем для крупных КО) [435].

Наглядно и конкретно продемонстрировать сравнительную динамику и классификацию образования крупного и мелкого КМ можно на примере столкновения 10 февраля 2009 г. КА «Космос-2251» и «Иридиум-33». Их суммарная масса составляла 1460 кг. За следующие несколько лет было каталогизировано 1800 фрагментов разрушения (крупных). Однако наблюдения наземными радиолокационными и оптическими средствами («Хейстек», «Голдстоун» и др.) и моделирование (модели ORDEM, MASTER, PROOF, SDPA и др.) показали наличие большого числа мелких фрагментов. Усреднённые результаты приведены в табл. 3.6.2 [442–444]. Интересно также распределение суммарной массы по этим категориям размеров фрагментов (там же).

Вероятность столкновений сильно зависит от размеров элементов КМ. Например, при уменьшении размеров от 10 см до 1 мм (на два порядка) число взаимных столкновений

увеличивается почти на четыре порядка, а вероятность столкновения малой частицы с крупным КО (например, с КА) также возрастает на несколько порядков (по сравнению с вероятностью столкновений каталогизированных КО). Частицы размером 1 мм сталкиваются в среднем 220 раз в год, а каталогизированные объекты — 1 раз в 27 лет (см. табл. 3.6.1) [443]. Здесь стоит лишний раз напомнить, что поверхности возвращаемых на Землю из космоса объектов оказываются испещрёнными следами ударов мелкого КМ (не катастрофические столкновения).

Таблица 3.6.2. Распределение фрагментов от столкновения КА «Космос-2251» и «Иридиум-33»

Размер	>1 м	20 см – 1 м	10–20 см	1–5 см	2,5 мм – 1 см	1–2,5 мм
Количество	2	130	652	145 200	1 480 000	6 250 000
Масса, кг	360	600	155	153	63	30

Интегральный риск поражения КА от каталогизированного КМ исчезающе мал по сравнению с риском поражения мелким КМ (без учёта степени поражения). Таким образом, необходимо измерять концентрацию КМ для оценки рисков столкновений его с КА прежде всего в низкоорбитальной области, где функционирует наибольшее количество КА и сами столкновения наиболее опасны (ввиду большой относительной скорости столкновений в этой области). Отсюда следует необходимость создавать средства наблюдения и регистрации мелкого КМ, которых сейчас недопустимо мало.

Значительный вклад в образование как крупного, так и мелкого КМ вносят и взрывы на орбитах. С учётом исторической статистики средняя вероятность взрыва каждого произвольного КА (РН) приблизительно равна 0,001 в течение 5 лет.

Наконец, есть ещё один неприятный аспект опасности мелкого КМ. Столкновение военного действующего КА с мелким КМ может иметь и опасные военно-политические последствия, о чём уже упоминалось в подразд. 3.1. Если при столкновении КА с крупным КМ (каталогизированным и надёжно отслеживаемым) причина разрушения или выхода из строя КА очевидна и легко объяснима, то при столкновении с мелким КМ в виду неконтролируемости такого события дело обстоит иначе (а результат столкновения может быть и катастрофическим!). В течение последних десятилетий многократно наблюдались внезапные выходы из строя КА военного назначения, причины которых так и не удалось установить ни с помощью наблюдений, ни посредством телеметрии. Остаются два возможных объяснения — незарегистрированное столкновение с КМ или «происки» космического противника. А это уже политически опасная дилемма. Такой «необъяснимый» выход из строя КА военного назначения может спровоцировать политический или даже вооружённый конфликт между космическими державами. Не всегда страна-собственник подвергнутого воздействию КМ КА может оперативно определить действительную причину его выхода из строя (или потери эффективности его функционирования) [2, 441, 325, 436, 237, 445].

3.7. Формальное определение возможной меры опасности техногенного засорения околоземного космического пространства

Теперь несколько слов об измерении опасности D любого конкретного состояния техногенной засорённости ОКП для космической деятельности. В качестве общей меры опасности D любого конкретного состояния техногенной засорённости ОКП для космической деятельности (на фиксированный момент времени t) чисто теоретически можно принять суммарную кинетическую энергию всех техногенных объектов в ОКП или пропорциональную ей величину на этот момент времени:

$$D = \sum_{i=1}^K m_i v_i^2.$$

Для конкретного столкновения общую оценку опасности атакующего КМ можно записать как

$$D_c = kmv_{rel}^2,$$

где m — масса атакующего КО; v_{rel} — относительная скорость столкновения; k — уточняющий коэффициент пропорциональности, учитывающий специфические факторы конкретного столкновения. Это, например, хрупкость обеих сталкивающихся поверхностей, температура плавления, форма атакующего КО и др. А для мелкого КМ это ещё и угол вектора скорости к поверхности цели при столкновении, уязвимость точки удара и т. п. Нельзя отрицать существование практических трудностей в оценке коэффициента k , и здесь он присутствует, по крайней мере, из методических соображений.

В первой формуле параметры K , m_i , v_i зависят от времени, а суммирование (по i) ведётся по всем КО в ОКП без исключения. Но поскольку размеры КО охватывают гигантский диапазон — от десятков метров до долей микрометра, общую оценку опасности D по разным соображениям (по крайней мере, теоретически) целесообразно разбить на несколько слагаемых, каждое из которых отражает свой собственный характер опасности, например:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = \sum_{i \in P_1} m_i v_i^2 + \sum_{i \in P_2} m_i v_i^2 + \sum_{i \in P_3} m_i v_i^2 + \sum_{i \in P_4} m_i v_i^2.$$

Здесь, скажем, P_1 — популяция КО размером >10 см; P_2 — популяция КО размером от 1 до 10 см; P_3 — популяция КО размером от 1 мм до 1 см, P_4 — популяция КО размером <1 мм. Понятно, что такое разбиение общей популяции КО весьма условно. Тем не менее, даже в таком разбиении каждая группа отличается от других спецификой характера представляемой ею опасности для космической деятельности и экологии Земли и ОКП.

Например, P_1 — это каталогизированные объекты. Столкновение с ними действующих КА катастрофично. Однако высокая точность известных векторов состояния каталогизированных КО позволяет заблаговременно предвидеть их опасные сближения с КА (и другими каталогизированными КО) и успешно совершить манёвр уклонения от столкновения (при наличии такого ресурса, который у защищаемых КА есть). Поэтому главная опасность КО из популяции P_1 — в возможности столкновения с объектами популяции P_2 и некоторыми (имеющими опасно высокие массу и скорость сближения с объектами P_1) КО популяции P_3 . В результате таких столкновений образуется большое количество фрагментов разрушения (т. е. нового КМ), повышающих вероятность возникновения каскадного эффекта (синдрома Кесслера).

Объекты P_2 опасны прежде всего отсутствием сведений об их векторах состояния с точностью, достаточной для расчёта манёвра уклонения от столкновения с ними, которое, если случится, скорее всего будет катастрофичным, во всяком случае, в низкоорбитальной области.

Популяции P_3 и P_4 весьма многочисленны, особенно P_4 . Это усугубляет их опасность. Многие объекты популяции P_3 при достаточно высокой относительной скорости сближения повлекут катастрофичность столкновения с объектами первых трёх групп. Из-за многочисленности КМ этих популяций и прогрессирующего роста его количества всё ошутимее становится их воздействие на сложившуюся и относительно стабилизировавшуюся в течение многих миллионов лет экологию Земли и геосфер, в частности, свето-теплообмен между ними и внешней средой.

Наиболее типичный для космической деятельности ущерб от КМ популяции P_4 — повреждение чувствительных поверхностей выносных бортовых приборов (телескопы, солнечные панели, угловые отражатели, датчики излучений, детекторы столкновений с элементами КМ и т. п.).

Важно иметь в виду, что к катастрофическому результату как для действующего КА, так и любого КО может привести столкновение их с КМ любой из четырёх категорий.

3.8. Определение степени угрозы со стороны космического мусора для космических аппаратов и выбор мер защиты

Сейчас уже нет сомнений, что при конструировании КА и планировании программы его миссии игнорирование угрозы со стороны КМ по меньшей мере безответственно. В современном проектировании КА необходимо получить количественную оценку этой угрозы. Для этого конструктор должен проанализировать конкретную среду на пути будущего КА и чётко представить себе уязвимость КА при его движении в этой среде.

Уже создано много аналитических и экспериментальных методов и инструментов для решения этой задачи. Но, пользуясь ими, мы не должны забывать о связанных с ними допущениях, ограничениях и неопределённости.

Проектирование КА и его миссии состоит из целого ряда этапов. Каждый из них в определённой, иногда весьма значительной степени связан ограничениями, следующими из решений, принятых на предыдущих этапах. Чтобы избавиться от некоторых ограничений, если в этом возникает необходимость, приходится возвращаться к более ранним этапам и производить перепроектирование, что увеличивает стоимость проекта и время его реализации. Чем раньше КМ вводится как учитываемый фактор в процессе проектирования, тем дешевле обойдётся проект и тем более органично и гармонично будет учтена эта опасная реальность в окончательной версии проекта.

Для каждого нового КА решение индивидуально, отлично от решений, принятых для других КА, так как количественная мера угрозы со стороны КМ, допустимого риска, конструкции и стоимости защиты КА напрямую зависит от используемых материалов, массы, размеров, конфигурации аппарата, его рабочей орбиты, конкретных возложенных на него задач.

Проектирование КА военного назначения должно подчиняться требованиям, podczas радикально отличным от требований к проектированию наземного вооружения. Например, при проектировании космического кинетического оружия поражения КА противника необходимо учитывать следующее. В наземных условиях выстрел снарядом (или пулей) по цели имеет результатом попадание или промах. Сразу после этого снаряд или пуля, как правило, перестают существовать как таковые, т.е. уже не представляют дальнейшей опасности. В космосе же при промахе кинетический снаряд продолжает полёт с огромной космической скоростью, и, следовательно, продолжает сохранять опасность, в том числе и для стороны, осуществившей выстрел.

Общий поток КМ, который встретит на своём пути проектируемый КА, — это функция высоты и наклона его орбиты, размеров и формы аппарата, его ориентации по отношению к вектору скорости потока КМ, продолжительности миссии, текущего уровня солнечной активности. К настоящему времени создано множество моделей засорённости ОКП (и её прогнозирования), которые могут быть использованы для оценки потока и они постоянно совершенствуются [447, 203, 219, 220, 227, 221, 229, 446] (см. подразд. 1.5).

Как только поток КМ определён и построено распределение углов атаки его элементов, можно оценить ожидаемое количество ударов по каждой компоненте КА за заданный период времени. В этом расчёте учитывается и взаимное расположение компонент, экранирование каждой компоненты другими. Для этого тоже существуют методики, которые использовались ещё для анализа проектов ОС «Фридом» (англ. Freedom), МКК «Шаттл», КА LDEF, ОК «Мир», МКК [448, 4]. Кстати, конструкторы МКК определили: вероятность того, что удар КМ вызовет в течение одного года критическое повреждение станции, должна быть менее 0,005 [5].

Количество ударов и их характеристики — это лишь исходная информация для определения ожидаемых последствий и влияния на выполнение КА своей миссии, т.е. для оценки вероятности отказов и сбоев компонент КА и КА в целом. При этом нужно также рассматривать следующие виды последствий ударов:

- выход из строя или повреждение критических компонент КА (часто приводящие к отказу всего КА),
- повреждения после ударов высокоскоростных фрагментов,
- воздействие импульсных нагрузок от удара,
- воздействие плазмы,
- изменение влияния данного повреждения во времени,
- поверхностная деградация от ударов.

Уязвимость КА в потоке КМ может быть определена как комбинация вероятностей отказов его различных компонент вследствие ударов КМ с учётом важности (критичности) каждой компоненты и их дублирования (избыточности).

Оценка уязвимости КА выступает основанием для определения степени и вида защиты КА. В настоящее время применяются три вида защиты — пассивная, активная и операционная («стандарт» IADC). Пассивная защита — это не что иное как бронирование КА или его компонент. Активная защита предполагает использование средств наблюдения для обеспечения заблаговременного предупреждения о грозящем столкновении и последующее применение мер защиты критических компонент КА или совершение манёвра уклонения от потенциального столкновения. Операционная защита предусматривает изменение дизайна КА с допущением возможности умеренной деградации КА или изменения его функций с целью снижения общего риска для его миссии. Задача конструктора КА — найти компромисс между стоимостью реализации каждого метода и достигаемым выигрышем. Рассмотрим эти схемы защиты подробнее.

Бронирование, с одной стороны, защищает КА от ударов мелкого и, в меньшей степени, среднеразмерного КМ, с другой, удорожает конструкцию КА, его запуск и выведение аппарата в космос, уменьшает допустимую массу полезного груза. Само собой разумеется, масса брони пропорциональна размеру и массе частиц, от которых она защищает. «К счастью», КА с большей вероятностью подвергается ударам мелкого КМ, чем среднеразмерного и, тем более, крупного. Так что защищать броней КА от удара крупного КО не имеет смысла по двум причинам: малой вероятности столкновения с крупным КО (в том числе из-за возможности ухода от столкновения) и бессмысленности этой затеи, если столкновение все же произойдёт.

Обычно принято защищать корпус КА от ударов КМ размером до 1 см и массой до 1,46 г. От более крупных частиц броня не защищает, от них защитой может служить лишь уклонение от столкновений с ними [6]. Да и от таких КО нет гарантии надёжной защиты, поскольку решающим фактором здесь служит не столько масса атакующего КО, сколько его скорость. Это решение и эта норма опасности остались по наследству от более ранних, принятых до катастрофических событий столкновения с мельчайшими частицами КМ.

Сам выбор конкретного защитного покрытия — это установление компромисса между: 1) допустимым уровнем риска повреждения КА или его критических компонент, 2) добавленной массой щита (увеличением стоимости конструкции КА и его запуска) и 3) допустимым снижением массы полезного груза. Не следует также забывать, что добавление брони увеличивает площадь поперечного сечения КА и его массу. При этом сама броня становится дополнительным КМ по завершении функционирования КА. Это большие минусы как с точки зрения увеличения вероятности столкновения с КМ, так и повышения засорённости космоса в перспективе.

Некоторую роль защиты КА выполняет его скелетная конструкция, которая и без того должна быть достаточно массивной и прочной, чтобы выдержать пусковые нагрузки.

В космической индустрии используются два типа щитов — монолитный и многослойный с промежутками. Достоинство первого — простота и малый объём. Многослойный щит обеспечивает лучшую защиту от высокоскоростного КМ, чем монолитный, при той же массе материала щита. Монолитный щит естественно использовать для защиты от мелкого КМ при средних и низких скоростях удара, когда энергия атакующей частицы слишком низка, чтобы сама частица разрушилась. В этом случае щит эффективен потому, что его масса достаточно велика, чтобы абсорбировать и рассеять энергию удара.

На типичных для НОКО скоростях столкновения атакующая частица обычно расплавляется или даже испаряется, а мельчайшие осколки или расплав либо образуют большой кратер в щите, либо пробивают его насквозь, в зависимости от толщины щита. И чтобы в таком случае монолитный щит защищал от высокоскоростного удара (от перфорации), его толщина должна быть пропорциональна второй или третьей степени скорости столкновения [449–451]. При скоростях удара более 2–3 км/с многослойный щит (например, бампер Уиппла, *англ.* Whipple bumper) эффективнее монолитного. Экспериментальные и теоретические данные показывают, что при типовой скорости удара в области низких орбит бампер Уиппла обеспечивает защиту, эквивалентную защите монолитного в 10–20 раз более массивного, чем бампер [449]. Это убедительный показатель его эффективности.

Когда высокоскоростной снаряд ударяется в бампер многослойного щита Уиппла, его взаимодействие с бампером возбуждает обратную ударную волну, разрушающую, расплавляющую и даже испаряющую материал снаряда. Затем более мелкие и уже более медленные частицы движутся от бампера к следующему, улавливающему слою (катчеру) и, ударяясь в него, распределяет энергию удара (её оставшуюся часть) по большей площади. При этом каждая мелкая частица обладает малой энергией и создаёт меньший момент. Поэтому катчер может быть более тонким, чем монолитный щит. Многослойный щит защищает не только от высокоскоростных частиц КМ, но и от медленно летящих, которые просто пробивают бампер и останавливаются более толстым катчером.

Толщина бампера и катчера выбирается с учётом самого быстрого, самого крупного и самого высокоэнергетического из ожидаемых атакующих КО, а промежуток между ними должен оптимизировать распределение энергии КО.

Разработано много усовершенствованных вариантов щита Уиппла, снижающих суммарную массу щита для защиты космического аппарата в данной конкретной среде и уменьшающих масштабы вторичного осколкообразования при ударе — в том числе и для защиты МКС [452–454].

Системы активной защиты КА прежде всего включают средства наблюдения (бортовые или наземные) для предупреждения оператора о грозящем столкновении, механизмы для защиты критических компонент КА и/или двигатели для совершения манёвра уклонения от столкновения. На сегодняшний день в качестве предупреждающих сенсоров используются наземные средства наблюдения, прежде всего, СККП. По их наблюдениям рассчитываются потенциальные сближения КА (обычно, пилотируемого) с каталогизированными КО. В случае превышения вероятности столкновения допустимого уровня риска с помощью манёвровых двигателей совершается манёвр уклонения от столкновения. Основы манёвров уклонения от столкновения изложены в работе [4565] и ряде документов НАСА.

Существуют и другие проекты активной защиты. Например, бортовые сенсоры обнаруживают приближение КО, после чего закрываются шторки над чувствительным компонентом КА или он разворачивается, подставляя приближающемуся объекту более защищённую сторону. Могут также выбрасываться особые свободные щиты навстречу атакующему КО, или используется оружие направленной энергии (лазер, плазма и т.п.) для отклонения или разрушения приближающегося объекта [456, 457].

Проблемы всех схем активной защиты начинаются с того, что все они требуют упреждённого обнаружения опасности столкновения. Из-за возможных высоких скоростей сближения атакующего КО и защищаемого КА, зачастую более 15 км/с, это упреждение должно быть весьма значительным — потенциальную опасность бывает необходимо обнаружить за сотни километров до встречи. Система защиты должна успеть среагировать: выработать сигнал предупреждения, успешно сманеврировать или развернуть КА с соблюдением динамических ограничений, выстрелить в надвигающийся КО и т.д. При этом требуется не только обнаружение, но и устойчивое слежение за КО с целью получения наиболее точной координатной информации о нём для выработки надёжного решения о том, столкнётся ли приближающийся КО с защищаемым КА. И если столкнётся, то успеть рассчитать манёвр и реализовать его.

В НАСА есть модель SBRAM (*англ.* Satellite Breakup Risk Assessment Model) для предварительной оценки опасности по отношению к действующим КА со стороны каких-либо разрушающихся КО на орбите (в результате взрыва или столкновения) через дни, недели, месяцы после разрушения [458–460]. Последнее обновление этой модели изложено в работе [481].

Казалось бы, естественно разместить все компоненты системы активной защиты (включая сенсоры) на борту защищаемого КА. Но это только на первый взгляд. Требования к системам, способным своевременно обнаружить на достаточном расстоянии и сопровождать среднеразмерный КО, очень высоки и практически не реализуемы на борту КА с использованием современных технологий. В частности, бортовой радар должен обладать чрезвычайно высокой энергетической мощностью, оптика должна быть от десятков до сотен сантиметров в диаметре. Кроме того, сенсоры должны иметь широкое поле зрения для обнаружения набегающих КО с различных ракурсов.

Для бортовых систем весьма проблематично обеспечить все эти требования. В публикации [5] приводится такой пример и соответствующий расчёт. Низкоорбитальный КА массой 1 т оборудован сенсором, способным предупреждать о потенциальном столкновении КА с расстояния 100 км с точностью, при которой КА может избежать столкновения, сместившись всего на 25 м в сторону. В заданных условиях на манёвр потребуется 5 с. Для этого нужен реактивный двигатель с тягой 2 кН (для сравнения, типичные реактивные двигатели для коррекции орбит имеют тягу 1 кН). Если бы 400-тонной МКС понадобился такой манёвр, нужен был бы реактивный двигатель с тягой 750 кН (такой же, как у второй ступени РН «Ариан-4»). К тому же, ускорение в таком манёвре превысило бы допустимые g -нагрузки на выносные структуры (солнечные панели и т.п.). Снизить эти нагрузки можно было бы за счёт увеличения расстояния обнаружения КО, но тогда придётся увеличивать мощность сенсора. Тронешь в одном месте — поползёт в другом.

Наземные средства СККП давно уже широко используются для предупреждения о сближении с каталогизированными КО действующих КА, в том числе МКС. Имея большое число весьма совершенных средств наблюдения, рассредоточенных практически глобально, они не испытывают дефицита времени на предупреждение. Однако у них есть ограничения на размер обнаруживаемых КО (а чтобы ещё и следить за ними с Земли — минимальный размер 10 см) и, кроме того, требуется высокая точность прогнозирования движения КО.

Наземная система предупреждения о столкновениях и сам защищаемый КА должны отвечать трём очевидным требованиям:

- 1) каталог КО системы должен содержать динамически обновляемую координатную информацию о всех опасных КО, траектории которых пересекают орбиту защищаемого КА;
- 2) система должна обеспечивать достаточно высокую точность измерительной информации, чтобы уровень ложных тревог был низким и исключал чрезмерное число неоправданных манёвров ухода;
- 3) защищаемый КА должен быть способен реагировать на предупреждение уходом от столкновения или выполнением других активных мер защиты.

Современные системы предупреждения о столкновениях, к сожалению, не отвечают этим требованиям. Существующие каталоги КО не являются полными в части содержания объектов размером менее 10–20 см и не включают большинство потенциально опасных более мелких КО. Непредсказуемость состояния верхней атмосферы и, как следствие, неточность прогнозирования будущего положения сближающихся объектов делает неизбежным большое число ненужных манёвров (из-за требования значительного упреждения выдачи сигнала предупреждения об опасности). Эта неопределённость также не позволяет точно и своевременно предсказать параметры ожидаемого столкновения для большинства существующих КА для точного расчёта степени угрозы и установок на манёвр. Необходимые характеристики сенсоров для активной защиты КА достигаются сложными и дорогостоящими техническими решениями. Поэтому такую защиту имеет смысл применять только для пилотируемых и очень дорогих КА.

Даже при наличии эффективной системы предупреждения многие методы активной защиты могут оказаться физически не реализуемыми. Например, схема встречного обстрела атакующего КО требует большей мощности (десятки киловатт), чем может обеспечить современное оборудование КА. Манёвр уклонения при срочном предупреждении может оказаться выполнимым лишь при наличии очень мощного реактивного двигателя и весьма жёсткой конструкции КА, способной выдержать резкий манёвр (не говоря уже о возможных повреждениях внутреннего оборудования и измерительных приборов).

Что касается операционной защиты, то она включает избыточность и дублирование оборудования, специальную архитектуру дизайна. Большинство схем операционной защиты направлены не на снижение угрозы удара КМ, а, скорее, на минимизацию вероятности отказа всей системы КА из-за отказа или сбоя отдельной компоненты по любой причине, не обязательно связанной с КМ. Операционно обеспечивается лишь щадящий режим снижения качества функционирования КА при нештатном или некачественном функционировании какой-либо компоненты. Например, термopокpытие проектируется таким образом, чтобы оно сначала обеспечивало более чем достаточный термopконтpоль, а его нижние слои плавно снижали свои термopазитные свойства при более жёстких, чем проектные воздействиях внешней среды. Солнечные панели устанавливаются большей площади, чем нужно для снабжения КА электроэнергией. Электронное оборудование и двигательная техника обычно дублируется в 2–3 раза. Такая операционная избыточность применяется и в многоаппаратных космических системах. Например, в американской GPS (и российской ГЛОНАСС) устанавливается больше спутников на орбитах, чем это требуется в любой момент времени.

Раздел 4. ПУТИ УМЕНЬШЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТ ЗАСОРЁННОСТИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И СНИЖЕНИЯ САМОЙ ЗАСОРЁННОСТИ

171

В Комитете IADC этим вопросом занимается специальная рабочая группа WG-4, причём, в отличие от остальных трёх рабочих групп, устав IADC требует представительства в ней всех стран-членов комитета. Этим подчёркивается особый статус этой группы и вверенного ей направления исследований проблемы техногенного засорения ОКП.

На более ранних этапах засорения космоса из-за отсутствия соответствующей грамотности в обществе господствовало снисходительное, а то и презрительное отношение к рассматриваемой проблеме. Отголоски этого отношения можно иногда слышать и сейчас. Поэтому одним из коренных вопросов в решении проблемы представляется преодоление дилетантского к ней отношения. Школьные программы и программы вузов должны включать соответствующие курсы, содержащие хотя бы минимум знаний по вопросам техногенного засорения космоса. Конструкторы космической техники и менеджеры всех звеньев, связанные с освоением космоса, должны иметь профессиональные знания в этой области, так как от их действий в значительной степени зависит «состояние здоровья» ближайшего к нам космоса и его краткосрочная и долгосрочная эволюция. Необходимо разработать и широко распространить различные руководства в помощь конструкторам и государственным чиновникам. Эти руководства должны включать информацию о текущем и прогнозируемом состоянии среды, последствиях её засорения, методики оценки повреждений КА и его компонент от КМ, методы пассивной, активной и операционной защиты КА. Эти руководства могут также оказаться полезными учебными пособиями для студентов.

Разумеется, наступать на проблему засорённости ОКП можно одновременно с разных сторон, особенно, если для этого имеются конструктивные основания. Но самая первая задача по логике вещей — это расширение возможностей всех инструментов и методов мониторинга в интересах наблюдения в первую очередь более мелких фракций КМ. Крупные КО мы обнаруживаем и наблюдаем довольно сносно, хотя многие существующие СН сильно устарели.

И это понятно: первым делом нужно очень хорошо и подробно понять и информационно освоить «противника». Это *первый логический эшелон* наступления на проблему. Здесь нужны разработка и ввод новых, специализированных средств обнаружения и наблюдения элементов КМ, привлечение существующих средств наблюдения, обладающих соответствующими возможностями, к мониторингу засорённости ОКП. КМ имеет определённые специфические особенности, поэтому желательна специализация средств наблюдения для более эффективного его обнаружения и отслеживания.

Заметно улучшить мониторинг ОКП могло бы создание более мощных и высокочастотных РЛС, однако у этой стратегии тоже есть предел. Мощная РЛС наземного базирования с рабочей частотой 30 ГГц могла бы обнаруживать частицы КМ размеров 1 мм на низких орбитах. Создание же и эксплуатация такой станции обойдутся очень дорого, а вот дальнейшее увеличение рабочей частоты РЛС с целью обнаружения ещё более мелких частиц вообще теряет смысл, так как радиоволны короче 1 см сильно поглощаются атмосферой Земли. Правда, это ограничение не относится к СН космического базирования, но при этом финансовые трудности их бортового размещения и применения возрастают.

Многие существующие наблюдательные средства способны успешно обнаруживать и контролировать движение некоторых классов КМ. В этом отношении мощным резервом

становятся средства российской СККП и её Центр. Кажется парадоксальным (на самом деле это закономерно и легко объяснимо), что приблизительно 95 % крупных КО и в нашем, и в американском каталогах СККП — это КМ. Иначе говоря, СККП, считающаяся по замыслу и назначению чисто военной системой, «обслуживает по своему профилю» лишь порядка 5 % КО. При этом она уже давно использует для своих целей также измерительную информацию многих гражданских средств наблюдения (академических, вузовских). Вполне разумно и обратное — использовать по согласованию с МО часть информации военных радиолокационных и оптических (оптико-электронных) средств в интересах мониторинга засорённости ОКП (как это делается в США, Великобритании, Франции). Это не будет большой нагрузкой для соответствующих подразделений МО, что подтверждается и опытом СККП США.

Что касается прогресса в отношении изучения популяции самого мелкого КМ (это большое белое пятно на карте околоземной космической среды), наблюдение которого доступно исключительно бортовым пассивным и активным контактными датчикам (техника *in situ*), то здесь можно рассчитывать, пожалуй, только на прорыв в повышении эффективности последних. Необходимо резкое увеличение площади чувствительной поверхности таких детекторов, реализуемое технологически и экономически эффективными методами.

Целесообразно создание и ведение единого динамического каталога КО всех размеров, накопление измерительной унифицированной базы данных и соответствующего архива наблюдений. Такой каталог и архив должны стать одними из главных продуктов национальной и интернациональной системы мониторинга ОКП. В эту базу данных должна стекаться измерительная информация от СН со всего мира, а её содержимое должно быть доступно всем заинтересованным сторонам (прежде всего, широким группам специалистов) пусть даже на определённых (например, коммерческих) условиях.

Каталог КО СККП сегодня содержит информацию только о крупных объектах. Для обслуживания исследований проблемы КМ нужен комплексный каталог, включающий информацию и о мелких КО. Самая мелкая фракция КМ, по-видимому, должна быть представлена в каталоге статистически в терминах распределений. Без достаточно полного каталога КО, ведущегося в реальном времени с высокой точностью орбитальных и некоординатных параметров КО, невозможно проведение полноценных исследований проблемы техногенного засорения ОКП и эффективное её решение.

Очередные кампании наблюдений и расстановку контактных датчиков на борту КА нужно планировать таким образом, чтобы как можно скорее ликвидировать значительные пробелы в наших знаниях среды, состава популяций КМ и их характеристик (в том числе динамических), общей картины засорённости ОКП. Эти пробелы сильно сдерживают повышение точности и надёжности используемых исследователями и конструкторами многочисленных моделей текущей и будущей засорённости ОКП и, следовательно, обоснованности и эффективности принимаемых и планируемых мер по борьбе с угрозой со стороны КМ.

При обязательном продолжении кампаний наблюдения КМ необходимо тщательно архивировать данные измерений, полученные во всех предыдущих кампаниях. Ценность архива пропорциональна продолжительности охватываемого им временного периода. Чем он протяжённый, тем больше анализ соответствующей информации может открыть закономерностей в динамике общей популяции КМ и её частных категорий, и тем достовернее будут результаты анализа.

Второй эшелон наступления на проблему — это работа с конструкторами космической техники и менеджерами всех уровней. Только профессионализм в этой области позволит им до конца осознать угрозу со стороны КМ их собственному делу. Правда, наступление в этом направлении поможет получить лишь паллиативное решение — обуздать дальнейшее засорение космоса. А как быть с тем, что человек уже натворил в ОКП?

И всё же, в первую очередь нужно сосредоточить усилия на сокращении источников порождения нового КМ. Без этого придётся принимать меры по снижению опасности

удара более мощным бронированием КА, усложнением (и, естественно, удорожанием) различных видов защиты. Между тем вероятность функциональных отказов все равно будет возрастать, и очищение космоса путём активного увода крупных КО в ближайшем будущем окажется ещё более неэкономичным и не будет давать нужного эффекта.

Третий логический и самый неудоборешаемый вопрос — это поиск путей реального снижения засорённости ОКП. Нельзя сказать, что эта задача не имеет решения. Есть один способ, кстати, физически осуществимый — прекратить всю космическую деятельность на несколько миллионов лет. За это время ОКП, хотя и очень медленно (возможно, миллионы лет), само очистится без нашей помощи. Но человечество генетически неспособно столько ждать, хотя, на наш взгляд, оно и заслужило такого наказания.

Возможные (как реальные, так и пока фантастические) методы снижения и прекращения роста будущей популяции КМ можно разделить на две категории:

- методы, снижающие краткосрочную опасность засорения ОКП;
- методы, позволяющие уменьшить эту опасность и в дальней перспективе.

Методы первой категории не направлены на снижение общей массы КМ в ОКП, т.е. не уменьшают суммарную кинетическую энергию КМ на околоземных орбитах. А именно она представляется источником долгосрочной опасности столкновений в ОКП [460, 2]. Эти методы не решают нашу проблему коренным образом, хотя и полезны в краткосрочной перспективе. Фундаментальное же решение требует уменьшения общей массы КО на орбитах. Методы первой категории помогут лишь замедлить рост опасности КМ и то только в краткосрочной перспективе. Гораздо важнее затормозить рост количества столкновений, прежде всего, в низкоорбитальной области. Этой цели служат технологии снятия с орбит крупных КО и перевода на орбиты захоронения крупных НОКО и КО на эллиптических орбитах, пересекающих низкоорбитальную область. Но это дорогостоящие операции (особенно снятие с высоких орбит). Дешевле просто ускорить сход с орбиты — кстати, тоже эффективная мера очищения космоса. И эти последние — методы второй категории.

Рассмотрим конкретные методы обеих категорий.

Сокращение высвобождения КМ, сопутствующего запуску и функционированию КА. В подразд. 2.2 дана характеристика этого типа КМ. Он составляет порядка 10 % от количества каталогизированных КО. Существует также значительная популяция некаталогизированного КМ этого типа. Причём большинство его находится в наиболее населённых аппаратами орбитальных районах. Прекращение выброса в космос такого мусора реализуется довольно легко и дешево без негативного влияния на оперативные свойства КА, хотя достигнутый эффект от этого будет не так уж велик. Некоторая часть сопутствующего мусора (например, выбрасываемого из пилотируемых КК) оказывается на низких высотах и быстро сгорает в атмосфере. Но в этой области находятся ценные действующие КА, поэтому рассматриваемые методы будут полезны.

Сокращение продуктов выхлопа твердотопливных двигателей. Это тоже доставляет лишь небольшое облегчение для космической деятельности, поскольку эти мельчайшие частицы вследствие мощного действия на них возмущающих сил имеют короткое время существования на орбитах (менее 5 % их остаются на орбитах более года [5]). Здесь нужно либо отказываться от использования твердотопливных двигателей, либо радикально менять тип топлива.

Пассивация КА и РН. Цель — сохранение целостности КА и РН и, как следствие, сокращение осколкообразования от взрывов. Так как при взрыве образуется значительное количество крупных и среднеразмерных фрагментов с потенциально длительным временем орбитального существования, то сокращение количества взрывов даст существенный эффект в смысле сдерживания будущего роста популяции КМ. Единой рекомендации по предотвращению случайных взрывов нет. Но существует системный подход, называемый пассивацией КА, который предполагает следующие процедуры:

- определение всех потенциальных источников запасённой на борту энергии, остающейся к концу функционирования КА;
- для каждого такого источника разрабатывается безопасный метод рассеивания запасённой энергии;
- активация этих методов в конце функционального существования КА.

Для устранения условий взрыва РН топливо либо выжигается, либо просто стравливается после отделения ступени от КА путём продувки баков или испарением.

Хотя конструкторы и избегают применять краску и другие материалы покрытий, быстро деградирующие во время полёта КА, они не требуют, чтобы покрытие оставалось прочным как в ходе, так и после окончания миссии КА. В виду этого, недорогой мерой борьбы с образованием КМ вследствие деградации поверхности КО стало бы обучение конструкторов КА и РН в области процессов поверхностной деградации в открытом космосе и известным превентивным методам противодействия этим процессам и их последствиям.

Уменьшение осколкообразования вследствие столкновений. В принципе, прямой путь к достижению этой цели — сокращение количества столкновений с помощью манёвров уклонения от них или удаление КО, грозящих столкновениями, из переполненных орбитальных областей.

Выше уже говорилось, что любые меры ограничения количества КО без сокращения общей массы КМ (и, следовательно, кинетической энергии в ОКП) недостаточны для уменьшения долгосрочной угрозы столкновений. Если даже удастся создать самые совершенные системы предупреждения о грозящем столкновении, их нельзя использовать для предотвращения столкновений неуправляемых КО, потому что они не способны маневрировать. Что касается удаления КО из густонаселённых орбитальных областей, то это достигается следующими способами:

- принудительный ввод КА в атмосферу путём применения замедляющих полёт приёмов, или сокращение орбитального существования КА (ускорение естественного схода с орбиты),
- перевод КА на орбиту захоронения в конце активного полёта,
- активное удаление КМ с орбит.

Принудительный ввод в атмосферу КА и РН и сокращение длительности существования КО. Это уже радикальные подходы второй категории. Возможные методы принудительного снятия с орбиты КА или ускорение его естественного схода с неё предполагают включение двигателя в обратном направлении (если, конечно, на борту осталось топливо), использование естественных возмущающих сил и приёмы усиления торможения в атмосфере. Для этого могут использоваться специальные небольшие реактивные двигатели или выжигание остатков топлива в основных двигателях, а также изменение геометрии поверхности КА.

Чтобы иметь возможность выполнять такого типа манёвры, традиционные проекты КА и РН могут нуждаться в соответствующих модификациях. Некоторые КА и РН не имеют собственных систем ориентации и коррекции орбит. Кроме них, могут понадобиться более мощные системы энергоснабжения и значительно более сложные командные системы для длительного сохранения работоспособности и возможности выполнения манёвров торможения. И, конечно же, потребуется большее количество топлива (со всеми вытекающими отсюда конструкционными последствиями). В руководящих документах НАСА по снижению опасности со стороны КМ предлагается ограничивать время существования КО, пересекающих низкоорбитальную область, 25 годами. Но на всякие константы такого рода нужно иметь глубокое и убедительное обоснование.

Атмосферное торможение имеет сильнейшее влияние на продолжительность существования НОКО, и его имеет смысл использовать с целью ускорения погружения КО в плотные слои атмосферы. Время существования КО на эллиптической орбите можно изменять даже более резко, чем на круговой в зависимости от начальной высоты пери-

гея. РН, запущенная на ГТО с низким перигеем, гораздо быстрее сходит с орбиты, чем запущенная на орбиту с высоким перигеем. Это подсказывает эффективный и дешёвый способ сокращения времени существования КО на высокоэллиптической орбите.

Слабые гравитационные возмущения влияют на время существования КО на ГТО с высотой перигея меньше 300 км, а выбор ориентации орбиты по отношению к Солнцу и Луне может заставить лунно-солнечные возмущения работать на снижение перигея. На рис. 4.1 показано, как время существования РН изменяется в зависимости от угла между плоскостью начальной орбиты переходной ступени и Солнцем [461]. Это очевидно подсказывает очень дешёвый способ ускорения схода с орбиты некоторых КА, но для других может потребоваться существенная коррекция программ запуска, полёта, функционирования и согласования с прочими требованиями миссии.

На низких орбитах можно использовать аэродинамические приспособления для усиления торможения в атмосфере, например, установку всевозможных насадок или изменение геометрии поверхности с целью увеличения площади поверхности. Это могут быть надувные баллоны, а чтобы они не сдувались после перфорации мелким мусором, есть способы придания им жёсткости после заполнения их газом.

Перевод КА и РН на орбиты захоронения в конце их активного существования. Описанные выше способы принудительного снятия КО с орбит и сокращения времени их существования сравнительно дешево обходятся для НОКО или КО на эллиптических орбитах с низким перигеем. Но с ростом высоты орбиты стоимость метода неприемлемо возрастает. Есть более универсальный метод «разредить» переполненные рабочие орбиты — перевод выработавших ресурс КА на орбиты захоронения, где они уже не представляют большой угрозы для действующих КА. Такие орбиты должны отстоять достаточно далеко от рабочих, чтобы естественные возмущения не вернули их вскоре назад в рабочую область. Орбиты захоронения достаточно подробно описаны в подразд. 1.1. Здесь подчеркнём лишь, что перевод КО на орбиты захоронения хоть и полезен, но не считается радикальным способом борьбы с засорением космоса, так как не уменьшает общей кинетической энергии в ОКП. Этот способ снижает риск столкновений в исходном районе, но повышает его в районе захоронения. А если произойдёт разрушение КА в районе захоронения, то осколки могут достигнуть и области его прежней рабочей орбиты. При рассмотрении возможности перевода КА или РН на орбиту захоронения как способа снижения опасности столкновения для действующих КА нужно сопоставлять его с другими возможными способами по стоимости и эффективности. Конечно же, в перенаселённой низкоорбитальной области, где трудно найти место для орбиты захоронения, обычно более подходят методы радикального удаления КО с орбиты, тем более, что они в этой области не так дорого обходятся. Но для ГЕО и области полусуточных орбит это вполне оправданная мера.

Методы активного удаления КМ с орбит. Эта идея возникла почти лет 40 назад [463, 464]. Однако из-за большой технической сложности и чрезвычайно высокой стоимости подобных проектов их не относили к разряду практически реализуемых.

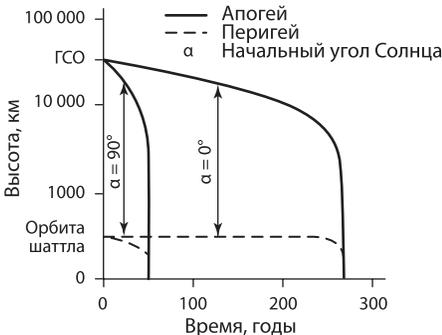


Рис. 4.1. Время существования переходной ступени вывода КА на ГЕО с борта шаттла

176 Удаление с орбит крупных КО требует высокочрезвычайно затратного создания специальной космической транспортной техники при сравнительно малой значительности снижения риска столкновений в результате такой операции. В публикации [464] даётся оптимистическая оценка стоимости реализации такого подхода — более 15 млн дол. на каждый КО в нижней орбитальной области, не считая затрат на разработку манёвровых систем.

Но драматические события 2007, 2009 гг. (разрушения КА «Фенгюн-1С», «Иридиум-33», «Космос-2251») и последние модельные исследования, подтвердившие явную нестабильность популяции КМ в низкоорбитальной области (ниже 2000 км), дали новый продуктивный импульс для дискуссий на эту тему. И не только для дискуссий. Президент США Обама заявил в 2010 г., что национальная космическая политика США предусматривает проведение исследований и развитие технологий, имеющих целью активное удаление КО из ОКП, и были даны соответствующие директивы NASA и Министерству обороны США [269, 18].

Перед планированием операций по активному удалению КО встаёт ряд вопросов:

- в каком орбитальном районе следует осуществлять такие операции в первую очередь,
- каковы главные цели этих операций,
- какой КМ следует удалить в первую очередь,
- какой будет выигрыш от этого,
- каким образом конкретно осуществлять эту операцию.

В свете последних исследований и событий в космосе ответ на первый вопрос — низкоорбитальная область как содержащая наиболее неустойчивую популяцию КМ с признаками начала каскадного процесса. Засорение более высоких орбитальных областей, как мы уже видели, происходит значительно медленнее.

Второй вопрос затрагивает как общие, так и частные цели. Общей целью вполне может быть максимизация отношения достигаемой выгоды к стоимости операции. Частные цели — самые разнообразные: управление ростом популяции мусора, ограничение интенсивности столкновений, смягчение последствий столкновений для конкретно выбранных КА, например, пилотируемых, и т. п.

Какой мусор удалять, прежде всего, зависит от ответа на второй вопрос. Если, например, целью операции представляется стабилизация роста популяции КМ или снижение числа катастрофических столкновений, то в первую очередь следует удалять крупные массивные КО. Если же главной целью выступает снижение угрозы нарушения функционирования большинства действующих КА, то нужно настраиваться на удаление КО размером от 5 мм до 1 см, так как они, становясь опасными в этом смысле, составляют 80 % всех КО размером более 5 мм [269]. Другой вопрос — как это сделать. Очень трудный вопрос.

Было высказано достаточно много предложений для удаления мелкого КМ, включая и самые фантастические: «космические веники», огромные пенные шары, тормозящие фольговые ловушки, лазерные испарители наземного и космического базирования. Короче, в настоящее время не существует сколько-нибудь эффективных технологий удаления мелкого КМ, а практически все предлагаемые более или менее реалистические схемы выглядят очень дорогими.

При оценке методов борьбы с засорением ОКП необходимо учитывать:

- эффективность действительного снижения опасности КМ для космических операций, количество КО, образование которых предотвращает данный метод, массу этих КО и опасность, которой эти КО подвергали бы важные орбитальные районы;
- стоимость реализации данного метода и связанные с этой реализацией технические трудности.

Предпочтение того или иного метода — это фактически компромисс между этими двумя факторами.

Мы уже говорили, что из-за больших ошибок прогнозирования движения КО в атмосфере невозможно с достаточной определённой и, главное, своевременно предсказать место и время падения на Землю крупных обломков КО, когда это реально происходит. Это не позволяет принять необходимые меры защиты жизни и имущества на Земле.

Главным тормозом улучшения точности прогнозирования движения НОКО, особенно по достижении ими самых плотных слоёв атмосферы, считается неопределённость, связанная со «слабым» знанием и прогнозированием вариаций плотности верхней атмосферы, и трудности определения изменяющейся во времени площади поперечного сечения КО из-за его переменной и обычно не поддающейся отслеживанию ориентации в пространстве. Функцией этих двух характеристик является сила сопротивления атмосферы, как очень важная компонента уравнений движения КО. Из-за плохого сегодняшнего знания этих характеристик точность прогнозирования движения НОКО теряет $\pm 15\%$, что составляет несколько, а иногда и десятки километров за сутки. Эти ошибки существенно превосходят все остальные, включая ошибки наблюдения и погрешности модели движения. Особенно недопустимы такие ошибки при расчёте параметров сближения КО для программирования манёвра уклонения от столкновения.

Над этой проблемой работают многие учёные, но её решение пока оказывается им не под силу. Заметно улучшить точность определения этих двух характеристик сейчас нереально.

Пожалуй, единственный, хотя и не дешёвый, по нашему мнению, конструктивный выход — увеличение плотности посадки средств наблюдения и рациональное их размещения с тем, чтобы сократить интервалы движения КО между зонами действия СН, сделать сеансы наблюдения КО более частыми и сократить интервалы экстраполяции траектории его движения.

Опять-таки, действенным этот совет становится только в смысле гарантированного положительного эффекта в случае, если он будет реализован, а вот последнее проблематично ввиду высокой стоимости реализации проекта. В то же время, если это всё-таки будет сделано, этот путь (подчеркнём ещё раз — физическое реализуемый) ведёт не только к демпфированию проблемы непредсказуемости атмосферы, но и к большему покрытию слабо контролируемых сегодня областей орбит, т.е. к более быстрому обнаружению КО, причём на большем разнообразии орбит. Короче, убиваем сразу двух зайцев.

В подразд. 1.4 говорилось о трудностях, испытываемых обеими СККП в обнаружении и контроле движения ВЭКО и других КО в высокоорбитальной области. Одна из причин этих трудностей — несовершенство используемых повсеместно методов поиска и обнаружения малоразмерных и слабоконтрастных КО. В ОКП присутствует гигантская масса элементов КМ с широчайшим разбросом орбитальных, массогабаритных и прочих индивидуальных параметров — по высотам, размерам, яркости и т.п. При этом специалисты испытывают большой дефицит измерительной информации для полноценного исследования проблемы техногенного засорения ОКП. КО различных классов требуют индивидуального подхода к их поиску и обнаружению.

Традиционные методы поиска плохо адаптируются к новым широкомасштабным популяционным изменениям в ОКП и нуждаются в совершенствовании в направлении повышения их производительности и эффективности. В настоящее время вполне назрела необходимость модернизации всего арсенала методов поиска КО и создания и широкого внедрения методологии обнаружения мелких и слабоконтрастных космических объектов на основе последних научных достижений в этой области. В частности, в работах [25, 26] предлагается новый теоретический подход к построению методов поиска таких КО по грубой априорной информации об их орбитах. В основе этого подхода лежит теоретико-множественное представление области неопределённости текущего положения КО, её деформации и самих элементов планов поиска. А главным регулирующим инструментом планирования служит введённый впервые принцип эквивалентности элементов плана поиска для различных моментов времени. Такой подход целевым образом направлен на борьбу с ошибками 1-го и 2-го рода — устранение «щелей» между

Этот подход не только теоретический. Некоторые основанные на нём методы успешно испытаны, показали высокую эффективность и уже используются в действующих системах (например, в российской СККП, в частности, в ОЭК «Окно», базирующемся в Таджикистане [465, 165]). Ещё на этапе отработки с их помощью удалось обнаружить ВЭКО типа «Молния», считавшиеся потерянными и в течение более полугода не кооперируемые с их операторами, а также успешно пронаблюдать заданные КО на ГЕО бортовым телескопом с очень узким полем зрения в космическом эксперименте с орбитальной астрономической обсерваторией «Астрон», проводившемся в течение более шести лет с марта 1983 г. под руководством академиков А. Б. Северного и А. А. Боярчука.

За последние десятилетия во всём мире было создано много моделей засорённости ОКП, в том числе и для составления прогнозов на десятки и сотни лет вперёд. Однако практически все они грешат уровнем достоверности выдаваемой информации. Одна из главных причин — весьма ощутимый недостаток исходной измерительной информации (и её полноты) для калибровки этих моделей, особенно в части мелкого КМ.

В интересах повышения эффективности изучения проблемы КМ, оперативного получения соответствующих оценок и прогнозов необходимо постоянное совершенствование динамических моделей состояния засорённости ОКП на базе современных результатов научных исследований (в математике, физике, астрономии) и регулярного притока новых данных наблюдений КМ. Крайне актуально сейчас заполнение пробелов в знаниях о структурной и параметрической связи между хорошо наблюдаемой крупноразмерной фракцией фрагментов разрушения КО и его практически ненаблюдаемой мелкой фракцией с целью адекватной экстраполяции первой на вторую при моделировании разрушений.

Имеет смысл внимательно проанализировать архивные данные всех космических миссий, предусматривавших зондирование космоса самыми разнообразными бортовыми СН в самых различных диапазонах длин волн при выполнении задач, не связанных с наблюдениями КМ, на предмет выявления невольных наблюдений КМ, особенно мелкого. Эта «побочная» информация о КМ получена фактически бесплатно, хранится как бесполезная для её владельца, и ею следует разумно воспользоваться.

Международное сотрудничество могло бы помочь улучшить качество каталогов космических объектов без особых дополнительных затрат. Это, пожалуй, самый экономичный способ существенно поднять эффективность каталогов. В каждом из них есть данные о КО, отсутствующие в других. Кроме того, между каталогами есть противоречия, анализ которых даст возможность устранить ошибки во всех каталогах. Так что взаимный обмен каталогами позволяет беззатратно информационно пополнить каждый из них. В принципе, такой обмен даёт возможность улучшить и точность сопровождения КО. С 1992 по 2010 г. осуществлялся плодотворный обмен информацией каталогов КО между СККП России и США. Затем он прекратился в связи с ухудшением отношений между странами.

Идеальным шагом в интересах повышения качества мониторинга ОКП было бы объединение СККП России, США и создающейся сейчас Европейской СККП. Однако в сегодняшней международной обстановке это нереально. Первые две системы принадлежат Министерству обороны России и США, соответственно, а основа будущей Европейской СККП РЛС GRAVES — Министерству обороны Франции.

Было бы важно договориться о запрете намеренных разрушений КО. Однако этот вопрос, разумеется, в значительной степени политический и затрагивает такие delicate аспекты интересов государств, как национальная безопасность. Если не удастся договориться о полном запрете взрывов в космосе, то можно попытаться склонить заинтересованные в таких операциях стороны к проведению испытаний по «разумным» сценариям, которые завершались бы минимальным и недолгосрочным увеличением засорённости космоса.

Человечество имеет пример и опыт ответственного подхода к обращению с нашим общим богатством — космосом — даже в таких «неприкасаемых» и амбициозных областях деятельности государств, как разработка нового вооружения.

По мере нарастания угрозы техногенного засорения космоса и, что крайне важно, её осознания в широких слоях общества всё чаще слышны голоса из самых серьёзных научных, общественных и даже государственных организаций высокого уровня о необходимости принятия более радикальных мер борьбы с этой угрозой, чем реально принимаемые или планируемые. Так, Международная академия астронавтики (англ. Intern. Academy of Astronautics — IAA) после фундаментального исследования проблемы, инициированного ею в конце 2006 г., пришла к выводу о необходимости сосредоточиться, в отличие от прежних, «пассивных» мер, на активном удалении из космоса больших и малых нефункциональных КО — отработавших КА, ступеней РН, сопутствующего космическим миссиям мусора — которые служат потенциальным источником дальнейшего развития каскадного эффекта.

Основным инструментом исследования служила эволюционная модель НАСА LEGEND. В качестве критерия для выбора кандидата на удаление было принято произведение массы КО на вероятность столкновения — MP_c . При этом рассматривались различные сценарии и нормы удаления — 5 (сценарий 1), 10 (сценарий 2) и 20 (сценарий 3) КО в год, начиная с 2020 г. На рис. 4.2 показан прогноз на 200 лет (на 2206 г.) распределения пространственной плотности крупных КО (>10 см) по высотам для этих сценариев. Нижняя кривая представляет распределение плотности на 2006 г., а верхняя — прогноз этой характеристики на 200 лет при условии, что никакие меры по снижению засорённости ОКП приниматься не будут [466, 467].

Главный вопрос стратегии активного удаления КО из космоса, как уже отмечалось, — рациональный выбор эффективных (или хотя бы физически реализуемых) и в то же время экономически оправданных (или, по крайней мере, щадящих) средств проведения этой операции. К числу таковых может быть отнесено использование направленной энергии, электродинамических и аэродинамических приёмов (например, искусственное увеличение баллистического коэффициента), «солнечных парусов», вспомогательных двигательных установок, тормозящих поверхностей, «захват» КО на орбите и пр. Этот проект IAA выступает в полной мере международным. У него 23 автора из девяти стран [468, 466].

Заметим, что эта мера (активное удаление из космоса крупных объектов) постоянно предлагается в течение последних 40 лет. Однако принять её к исполнению мешала дороговизна таких проектов. Сейчас, похоже, правительства космических держав готовы с этим смириться ввиду большой убедительности и красноречивости последних драматических событий в ОКП.

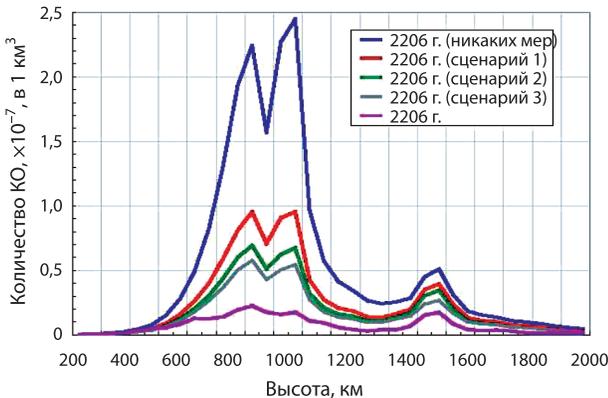


Рис. 4.2. Прогноз на 2206 г. распределения пространственной плотности крупных КО для различных сценариев борьбы с засорением ОКП

180 На 15-м ежегодном заседании совместной рабочей группы НАСА и Министерства обороны по КМ Тони Гриффит представил проект КА для активного удаления КМ с орбит, финансируемый Джонсоновским космическим центром. На том же семинаре профессор Алабамского университета в Хантсвилле (*англ.* University of Alabama, Huntsville) Ричард Форк совместно с Мэри Ховатер и Яном Роджерсом из НАСА доложили принципы использования лазерных систем для удаления мелкого КМ [66].

И почти одновременно, 18–19 июня 2012 г. в Париже прошёл Второй Европейский семинар по активному удалению КМ. Так что, кажется, действительно лёд тронулся.

В последние годы мы наблюдаем заметную активизацию действий не только научных, но и административных организаций высокого уровня в этом направлении, что говорит о широком осознании проблемы. Кажется, многие начали понимать, какой ценой нам обошлась близорукость человечества на ранних этапах освоения космоса. Лучше поздно, чем никогда. Действительно, давно пора подумать о том, какое наследство человечество оставляет своим потомкам.

Безусловно, в наше время можно наблюдать проявления более ответственного отношения человека к освоению космической среды. Это, в частности, выражается и в выборе некоторыми странами (к сожалению, далеко не всеми) щадящих режимов проведения космических экспериментов и испытаний космического оружия, приводящих к образованию КМ, и в более рациональном проектировании космической техники (что сдерживает образование мусора, сопутствующего запуску и функционированию КА), и во всё более активном использовании орбит захоронения отработавшей техники, и, наконец, в расширяющейся популяризации идей бережного отношения к чистоте космической среды. В последние годы заметно чаще во всём мире проводятся конференции и прочие научные форумы на рассматриваемую тему.

К сожалению, нет глобально поставленной в международном масштабе и системно решаемой задачи полного исследования засорённости ОКП. Большинство измерений КМ собрано по случаю, как побочный продукт. Ни национальных, ни интернациональных централизованно координируемых стратегий разработки и реализации космических экспериментов, рассчитанных исключительно на изучение и решение проблемы КМ, сегодня не существует

Все известные модели дают пессимистические прогнозы: предсказывают только рост техногенной засорённости околоземного космоса. Разница лишь в некоторых конкретных параметрах и форме кривых, которые, тем не менее, всегда монотонно возрастающие. Хуже того, для разных сценариев развития процесса дальнейшего освоения космоса они либо экспоненциальные, либо, в лучшем случае, асимптотически линейные.

В прошлом международное космическое право создавалось под эгидой Комитета ООН по мирному использованию космического пространства (COPUOS) и не имело прямого отношения к угрозе со стороны КМ. Долгое время действовали три международных договора, лишь косвенно касающиеся КМ:

1. Договор о принципах управления деятельностью при исследовании и использовании космического пространства, включая Луну и другие небесные тела (10 октября 1967 г.).
2. Конвенция о международной ответственности за вред, нанесённый КО (1 сентября 1972 г.).
3. Конвенция о регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство (15 сентября 1976 г.).

В последние годы ООН всё пристальнее вникает в проблему техногенного засорения космоса. С 1994 г. Научно-технический подкомитет Комитета ООН по мирному использованию космоса на каждой своей ежегодной сессии включает в качестве пункта повестки дня рассмотрение этого вопроса [471]. На 38-й Ассамблее COSPAR (*англ.* Committee on Space Research), состоявшейся в Бремене в 2010 г., на секции «Потенциально вредоносная деятельность в космосе» главной и наиболее активно обсуждаемой была тема «Космический мусор — глобальный вызов».

В 1999 г. подкомитет выпустил свой первый большой отчёт по этой теме [469]. А в 2007 г., опираясь на предложения и отчёты IADC, он разработал основные направления снижения засорённости космоса [470]. В этот важный документ ООН включает следующие требования к космической деятельности государств:

- ограничивать образование новых КО при нормальной работе КА;
- минимизировать возможности случайного разрушения (взрыва) КА (РН) во время его функционального существования;
- ограничивать вероятность случайного столкновения на орбите;
- избегать намеренных разрушений КО и других вредных действий в космосе;
- минимизировать возможности послеоперационного разрушения КА (РН) в виду остаточной энергетики на борту;
- ограничивать длительность пребывания КА и ступеней РН в области низких орбит по окончании их миссии;
- ограничивать длительность пребывания КА и ступеней РН в области геосинхронных орбит по окончании их миссии.

На 48-й сессии в феврале 2011 г. Подкомитет продолжил изучение проблемы КМ, заслушав целый ряд специальных докладов представителей США, Франции, России, ЕКА, IADC. В качестве злободневного вопроса рассматривалось постоянно возрастающее число манёвров уклонения от столкновений, выполнявшихся действующими КА в последние годы. НАСА доложило о семи таких манёврах своего флота автоматических спутников и о манёврах МКС; Франция и ЕКА — о 13 и 9 манёврах спутников, находящихся под их контролем, соответственно [471]. Здесь стоит вспомнить, что в 2009 г. космические аппараты маневрировали девять раз, чтобы не столкнуться с КМ [472]. Кому-то это может показаться мелочью, но, напомним, всё это всерьёз рассматривает ООН, имея крайне жёсткий регламент времени.

Нам представляется, что следовало бы пересмотреть современную стратегию реагирования операторов КА на опасные сближения. Во-первых, точность предсказания сближения в большинстве случаев низка, прежде всего, для не каталогизированных КО, и при этом сильно влияние неопределённости прогнозирования торможения в атмосфере.

Во-вторых (и это в значительной степени следствие первого), не существует оценок того, насколько полезными оказались проведённые за всё время манёвры ухода от столкновений, действительно ли они увели КА от реальных столкновений, потому что невозможно точно оценить реальный промах, да ещё гипотетический в прошлом.

В-третьих, степень эффективности дорогостоящих уходов от столкновения страдает от того, что большинство действительно опасных сближений не регистрируется, так как количество не каталогизированных (а, следовательно, не отслеживаемых) опасных элементов КМ велико. Да и множество реально происходящих столкновений остаются незамеченными ввиду малого покрытия неба наблюдениями.

В этих условиях возможны даже такие парадоксы: уводим КА от сближения с менее опасным КО в сторону более опасного. Уже сейчас суета с так называемыми уводами от столкновений достаточно интенсивна, а что будет в будущем, когда плотность КМ значительно возрастёт? Сомнению не подлежит целесообразность уводов от столкновения с крупными и массивными КО, так как они действительно крайне опасны и, кроме того, сопровождаются с высокой точностью ввиду достаточного количества измерений и меньшей зависимости эволюции траектории движения от атмосферного торможения (малое значение отношения площади поперечного сечения к массе).

Все методы борьбы с опасностью КМ в ОКП можно разделить на три главные категории. Первая категория (так сказать, «эгоистическая») — это пассивная, активная или операционная защита конкретного КА, направленная на устранение или смягчение последствий ударов, в основном, мелкого КМ, но никак не на замедление темпа и, тем более, не на снижение засорённости ОКП. Соответствующий результат достигается за счёт бронирования КА, осуществления манёвров уклонения от столкновения, активной контра-таки на надвигающийся КО, дублирования и резервирования аппаратуры и т.п.

Методы второй категории имеют целью ограничение количества потенциально опасных КО, прежде всего, за счёт пассивации КА и РН (что снижает количество взрывов в космосе) и сокращения выброса в космос сопутствующего миссиям мусора. Эти методы тоже не уменьшают текущей засорённости космоса.

Наконец, методы третьей категории направлены на снижение или ограничение общей массы и суммарной площади поперечного сечения КО путём снятия с орбит или увода на другие, мало используемые орбиты отработавших КА и РН. В этом же направлении работает и постепенно укрепляющаяся тенденция миниатюризации новых запускаемых КА с применением мини-, микро- и нанотехнологий.

Эти три подхода по-разному влияют на динамику засорённости ОКП и опасности КМ в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Методы первых двух категорий могут значительно замедлить рост опасности КМ в краткосрочном плане и даже ограничить его накопление в некоторых орбитальных районах в дальней перспективе. Но это мало повлияет на замедление или предотвращение каскадного эффекта. И только ограничение и снижение общей массы и суммарной площади поперечного сечения орбитальной популяции сможет предотвратить или замедлить возникновение каскадного эффекта или уменьшить скорость его развития.

Снижение общей площади поперечного сечения популяции КМ играет важную роль в уменьшении долгосрочного потенциала возникновения и развития каскадного процесса столкновений, поскольку этот показатель характеризует общую площадь цели для атаки со стороны КМ. Ограничение массы существенно потому, что в долгосрочной перспективе именно масса определяет максимальное число образующихся в результате столкновений фрагментов, способных вызвать дальнейшие разрушения встречных КО.

Для оценки и прогнозирования перспективности и эффективности различных мер борьбы с засорением космоса можно использовать те же модели, что используются для прогнозирования эволюции будущей популяции КМ. Они содержат много неопределённости, снижающих точность прогноза, однако это не мешает получать за неимением точных грубые и сравнительные оценки возможностей различных методов сокращения или замедления роста популяции космического мусора.

Если бы в будущем популяция КМ пополнялась только за счёт отработавших КА, РН, сопровождающих миссиям КМ, продуктов взрывов и деградации поверхности КО (короче говоря, если бы в будущем не происходило столкновений), она продолжила бы свой приблизительно линейный рост. Однако все существующие модели прогнозирования засорённости ОКП, используя различные методологии, различные системы допущений, различные начальные данные, однозначно предсказывают, что столкновения между КО добавляют потенциально большое и экспоненциально растущее количество новых КО, переводящее процесс техногенного засорения ОКП в новое отнюдь не вызывающее оптимизма качество. Хотя даже небольшие КО представляют значительную угрозу действующим (и недействующим) КА, именно крупные объекты (такие как КА и РН) несут в себе потенциал возникновения и развития каскадного процесса столкновений.

Долгосрочное прогнозирование процесса засорения ОКП показывает, что даже при самых решительных мерах, таких как немедленное прекращение всяких запусков и деятельности в космосе, связанной с образованием КМ, стабильность космической среды не может быть обеспечена. Графики на рис. 4.2 (см. с. 179) показывают, что даже при самой жёсткой из возможных политике борьбы с засорением космоса остановить этот процесс уже невозможно. Все известные реальные меры борьбы с КМ, кроме принудительного снятия КО с орбиты, пока могут только замедлить темп засорения ОКП, но не снизить общую массу КМ. Единственный реальный механизм увода КМ из космоса — это естественный вход (или, в гораздо меньшем масштабе, принудительный ввод) в атмосферу очень низких КО. Предлагаемые радикальные меры удаления крупного КМ из ОКП крайне дороги при довольно низкой эффективности. А реальных способов удаления мелкого и среднеразмерного КМ вообще нет. Для прекращения экспоненциального роста популяции КМ (перевода его в линейный) необходимо, кроме предотвращения взрывов на орбитах, активное снятие с орбит крупных КО и/или сокращение времени их орбитального существования.

Раньше конструкторы КА по понятным причинам не рассматривали КМ как фактор проектирования. В настоящее время несмотря на остающуюся большую неопределённость в знаниях в этой сфере мы имеем всё же значительное продвижение в изучении состояния

184 засорённости космоса. Последнее совместно с развитием и доступностью аналитических и экспериментальных инструментов и методов количественного оценивания угрозы космической деятельности со стороны КМ, а также новые подходы к обеспечению защиты КА от ударов КМ дают возможность конструкторам адекватно оценить риски для КА и подобающе защитить их от среднеразмерного КМ. Хотя любая защита (кроме успешного уклонения от столкновения) бессильна от столкновения с крупным КО.

Каскадный эффект, который, по мнению многих экспертов, уже начался, приведёт к тому, что в ближайшие десятилетия столкновения уже существующих техногенных КО начнут доминировать как источники образования нового КМ. Это ускорит появление новых катастрофических столкновений, и ситуация выйдет из-под контроля даже без вмешательства человека [468, 473].

Если ещё раз вернуться к рассмотрению прогнозов темпов засорения ОКП при различных сценариях развития космической активности человека (см. рис. 2.4.1–2.4.4 на с. 98), становится грустно, и первая мысль, которая приходит в голову, это «Как мы опоздали!»

В настоящее время космический мусор представляется неотъемлемой, причём существенной составляющей околоземной космической среды. Всего лишь лет 60 назад этого ещё не было. Более того, подобное явление тогда справедливо расценили бы как абсурд. Но сегодня КМ непременно должен учитываться как фактор при изучении космического пространства, при анализе экологии Земли и ближайшего космоса, при проектировании космических аппаратов, при планировании космических операций. Постоянно расширяющийся арсенал аналитических и экспериментальных инструментов количественной оценки угрозы со стороны КМ для КА и человечества вообще, а также методов защиты от неё уже сейчас позволяет конструкторам и государственным чиновникам принимать грамотные решения. Было бы желание.

Чтобы адекватно оценивать опасность со стороны техногенного космического мусора для космических аппаратов самого разного назначения и исполнения, функционирующих на различных орбитах, уяснить характер происходящей эволюции популяции КМ и надёжно её прогнозировать, иметь возможность и основание принимать правильные и своевременные решения для уменьшения этой угрозы, необходимо глубокое понимание соответствующих процессов, происходящих в ОКП, с хорошим знанием всех параметров этих процессов (состава, количества, размеров, массы, скорости, распределения КО по высоте, наклонению, эксцентриситету и т.д.), источников образования и динамики потоков КМ. Нужно хорошо представлять себе причинно-следственные связи между этими процессами и космической деятельностью человека, причём не только текущую, но и в перспективе.

Однако пока не хватает данных о диапазонах размеров КМ, разнообразии его форм, масс и материалов, источниках образования нового КМ, орбитальных районах и распределении КМ в них. Не хватает не только такого рода данных и необходимой измерительной информации. Многие публикации в этой области просто фиксируют некоторые факты без глубокого анализа наблюдаемого. Бросается в глаза эклектика состава докладов на конференциях и семинарах. До сих пор не подведена единая общенаучная платформа под все накопленные в этой важнейшей области знания, которая должна грамотно отражать влияние космической деятельности человека на состояние космической среды и наоборот и давать хорошо обоснованный прогноз и того, и другого на ближайшее и далёкое будущее. Углубление наших знаний в этой области, использование их в процессе принятия мер по снижению угрозы КМ может быть эффективным средством в этом направлении, возможно, единственным на текущем этапе.

Без использования глубоких и точных знаний защита КА может оказаться либо избыточной, либо недостаточной, превентивные меры по предупреждению угрозы со стороны КМ в будущем могут оказаться неэффективными и даже ошибочными, а стоимость необоснованно выбранных мер — слишком высокой. Правильно выбранный баланс в паре эффективность — стоимость служит безошибочным признаком профессионального решения.

При написании этой монографии автор не ставил себе задачу достичь предельной полноты охвата темы техногенного засорения ОКП. Это было бы безнадежным занятием в виду чрезвычайной обширности темы и стремительной динамики её информационного покрытия в настоящее время. Сама по себе проблема стала настолько актуальной (как в научной среде, так и в индустриальной, коммерческой, социальной, военной, политической сферах), что её исследованием занимается огромная армия учёных практически во всех странах мира. Соразмерны этому и гигантские бюджеты, выделяемые на исследования в данной области в большинстве ведущих стран мира. Если бы кто-то

186 задумал составить энциклопедию техногенного засорения ОКП или терминологические словари, их пришлось бы существенно обновлять и переиздавать чуть ли не каждый месяц.

Заключение

Хотя автор старался придерживаться научной строгости изложения, он, в то же время, пытался использовать всякий шанс, чтобы сделать книгу понятной широкому кругу читателей, поскольку сама тема настойчиво требует популяризации.

Главная цель книги — достичь того, чтобы как можно больше людей прониклось пониманием крайней важности обсуждаемой здесь проблемы. Во всяком случае, эту книгу должен прочитать каждый налогоплательщик. И это не такая уж шутка. Только тогда можно надеяться на улучшение перспективы будущего состояния близкого нам космоса и на хорошую отдачу от него.

В работе над книгой были использованы материалы из многочисленных, прежде всего, научных источников, в том числе материалы рабочих групп Комитета IADC, всех Европейских конференций по проблемам техногенного засорения космоса, международных научных семинаров, итогового отчёта Комитета Национального исследовательского совета США по космическому мусору (в работе которого, как и в большинстве упомянутых здесь мероприятий, принимал участие автор, в частности, как руководитель рабочей группы IADC, создатель и руководитель российско-американского научного семинара по контролю космического пространства), публикации в известных международных научных журналах, ежеквартальных изданиях НАСА "Orbital Debris Quarterly News", Acta Astronautica и многих других.

Приводимая здесь обширная библиография может служить путеводителем по различным аспектам нашей проблемы.

1. *Aksenov O., Veniaminov S.* et al. Challenging aspects in evaluating the potential danger of space objects breakups and collisions for space flights // *Advances in Astrophysics*. 2018. V. 3. No. 2. P. 83–90.
2. *Вениаминов С. С.* Космический мусор — угроза человечеству. 2-е изд., испр. и доп. М.: ИКИ РАН, 2013. 208 с. Сер. «Механика, управление и информатика».
3. *Макаров Ю. Н.* Мониторинг техногенного засорения космического пространства. Проблемы и решения: докл. на Президиуме РАН // *Наноиндустрия*. 2019. Т. 12. № 1(87). С. 6–14. DOI: 10.22184/1993-8578.2019.12.1.6.14.
4. *Love S. G., Brownlee D. E.* A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust // *Science*. 1993. V. 262. P. 550–553.
5. *Orbital Debris: A Technical Assessment*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1995. 210 p.
6. *Interagency Report on Orbital Debris*, Executive Office of the President of the United States. Library of Congress Catalog Card No. 95-72164. 1995.
7. *Space Security 2008*. Univ. of Waterloo, Ontario, Canada: Pandora Press, 2008.
8. *Space Security 2010* / ed. Jaramillo C. Univ. of Waterloo, Ontario, Canada: Pandora Press, 2010.
9. *Intern. Space Station*. NASA, 2009. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/isstodate.html.
10. *Intern. Space Station: Facts and Figures*. NASA, 2012. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/onthestation/facts_and_figures.html.
11. *How much does it cost?* European Space Agency, 2005. http://www.esa.int/export/esaHS/ESAQHA0VMOC_iss_0.html.
12. *Space Security index 2012* / ed. C. Jaramillo. University of Waterloo, Ontario, Canada: Pandora Press, 2012.
13. *Вениаминов С., Убоженко Д., Гололобов И.* Проблемы техногенного засорения космоса (по отчётам НАСА *Orbital Debris Quarterly News*): сб. информ.-справ. материалов. М.: НИИЦ ЦНИИ ВКС МО РФ, 2021.
14. *Johnson N.* Origin of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee // *Orbital Debris Quarterly News*. 2012. V. 16. Iss. 4. 3 p.
15. *New NASA Procedural Requirement and Technical Standard for Limiting Orbital Debris Generation* // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 4. 12 p.
16. *Publication of the Handbook for Limiting Orbital Debris* // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 4. P. 3. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv12i4.pdf>.
17. *Orbital Debris Quarterly News*. 2020. V. 24. Iss. 1. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv25i1.pdf>.
18. *President B. Obama* // *National Space Policy of the United States of America*. 2010. 18 p.
19. *New U.S. National Space Policy Cites Orbital Debris* // *Orbital Debris Quarterly News*. 2010. V. 14. Iss. 3.
20. *von der Dunk F. G.* The Sky is the Limit — But Where does it End? // *Proc. 48th Colloquium on the Law of Outer Space*. 2005. Art. No. IAC-05-E6.2.01. 12 p.
21. *Veniaminov S., Adushkin V.* et al. Natural and technogeneous contamination of near-Earth space // *Acta Astronautica*. 2017. V. 135. P. 6–9.
22. *Jenkin A., McVey J.* Constellation and “Graveyard” Collision Risk for Several MEO Disposal Strategy // *Proc. 5th European Conf. Space Debris*. 30 Mar.–2 Apr. 2009, Darmstadt, Germany, 2009. ESA SP-672. 8 p.
23. *Rossi A., Anselmo L., Pardini C., Jehn R.* Effectiveness of the de-orbiting practices in the MEO region // *Proc. 5th European Conf. Space Debris*. 30 Mar.–2 Apr. 2009, Darmstadt, Germany, 2009. ESA SP-672. 7 p.
24. *Johnson N.* Space Debris Mitigation Strategies and Practices in Geosynchronous Transfer Orbits // 35th COSPAR Scientific Assembly. 18–25 July 2004, Paris, France.
25. *Вениаминов С. С.* Введение в теорию планирования поиска космического объекта по неточной априорной информации о его орбите / под ред. Р. Р. Назирова. М.: ИКИ РАН, 2010. 71 с. Сер. «Механика, управление, информатика».
26. *Veniaminov S.* *Fundamentals of the theory of planning the search for space objects*. Cambridge, UK: Cambridge Scholar Publishing, 2020.

27. *Solodyna C., Banner G.* Narrowband and Wideband Radar Signatures in Support of the Space Catalog // Proc. 4th US/Russian Space Surveillance Workshop. USNO. Washington, DC, USA. 2000.
28. *Johnson N.* Current Characteristics and Trends of the Tracked Satellite Population in the Human Space Flight Regime // 57th Intern. Astronautical Congress. Valencia, Spain. 2006. Paper IAC-06-B6.1.03.
29. *Johnson N.* Evidence for Historical Satellite Fragmentations in and Near the Geosynchronous Regime // Proc. 3rd European Conf. Space Debris. 19–21 March 2001, Darmstadt, Germany / ed. H. Sawaya-Lacoste. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2001. ESA SP-473. V. 1. P. 355–359.
30. *Barker E., Matney M.* GEO Population Estimates Using Optical Survey Data // Space Control Conf. MIT Lincoln Laboratory, Lexington, Massachusetts, USA. 2007.
31. *Chobotov V.* Disposal of spacecraft at end-of-life in geosynchronous orbit // J. Spacecraft and Rockets. 1990. V. 27. No. 4.
32. *Johnson N.* The Disposal of Spacecraft and Launch Vehicle Stages in Low Earth Orbit // 2nd Intern. Association for the Advancement of Space Safety (IAASS) Conf. Chicago, Illinois, USA. 2007.
33. *Monheim A.L.* et al. GFO: Disposal of a Power-Challenged Satellite with an Attitude (Control) Problem // AIAA Space 2009 Conf. Pasadena, California, USA. 2009.
34. *Friesen L.J.* et al. Results in orbital evolution of objects in the geosynchronous region // J. Guidance, Control and Dynamics, 15 (1), 1992.
35. *Yoshikawa M.* Long-term analysis for the orbital changes of debris // 18th Intern. Symp. Space Technology and Space Science (ISTS). Kagoshima, Japan. 1992.
36. *Sochilina A.* et al., On Occasional Changes of Velocities of GEO Uncontrolled Objects // Proc. 3rd US/Russian Space Surveillance Workshop. US Naval Observatory, Washington DC, USA. 1998.
37. *Севастьянов М., Давиденко В.* ОКНО в космос, или Военно-политическая астрономия // Новости космонавтики. 2003. № 9.
38. *Батырь Г.* и др., СККП РФ / ОАО МАК «Вымпел». 2006. <http://www.vimpel.ru/skcp2.htm>.
39. *Гаврилин Е.В.* Эпоха классической РКО. М.: Техносфера. 2008.
40. Оружие и технологии России: Энциклопедия XXI век / ред. Министр обороны РФ С. Иванов. Т. 5. Космические средства вооружения. М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2004. 704 с.
41. Диалектика технологий воздушно-космической обороны / ред. В.Н. Минаев; Минпромторг РФ, Департамент радиоэлектрон. промышленности. М.: Изд. дом «Столичная энциклопедия», 2011 г.
42. СККП России: вчера, сегодня, завтра: Международный проект Дмитрия Смирнова. 2007. <http://army.lv/ru/SKCP-Rossii-vchera-segodnya-zavtra./2615/2489>.
43. 50 лет ракетно-космической обороне / общ. ред. Аксёнова О.Ю. М.: ООО «Типография КЕМ», 2010.
44. Оружие России: Федеральный электронный справочник В и ВТ ПВО, РЛС дальнего обнаружения БР и КО. М., 2008.
45. *Шилин В., Олейников И.* Область контроля — космическое пространство // Воздушно-космическая оборона. 2007.
46. *Veniaminov S., Batyr G.* et al., The current state of the Russian Space Surveillance system and its capability in surveying space debris // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993. ESA-SD-01.
47. *Hays P.L.* National Security Space Actors. 2007.
48. The SSS Space Surveillance System. Jane's Space Directory (23 Dec. 2003). Improving Our Vision: Approaches for Shared Space Situational Awareness: report on conf. held in Center for Defense Information. 2006.
49. Rumsfeld Asks if Pentagon is Over-Reliant on Space Systems // Space News. 2002. No. 4.
50. *Verges F.* The Cambridge Encyclopedia of Space. 2007.
51. *Ильин А.* «Воронеж» в сердце Азии // Новости космонавтики. 2012. № 7.
52. Improving Our Vision: Approaches for Shared Space Situational Awareness // The World Security Institute's Center Conference. Colorado Springs, Colorado, USA. 2006.
53. *Stansbery E.* Growth in the Number of SSN Tracked Orbital Objects // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 1.

54. *Veniaminov S. et al.*, Potentialities of Passive-RF sensors for characterization of satellites // Proc. 7th US/Russian Space Surveillance Workshop. Monterey, California, USA. 2007.
55. United States Space Surveillance Network // Wikipedia. U.S._Space_Surveillance_Network.htm. 2010.
56. US Policy and Capabilities on SSA (PDF). Secure World Foundation (24 января 2019).
57. Orbital Debris Quarterly News. 2021. V. 25. Iss. 4.
58. National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2004, 117 Stat. 1565 Public Law 108-136-24, USA, Nov. 2003.
59. Келсо, ТS "SATCAT Boxscore". CelesTrak. 2019.
60. *Chamberlain S., Slauenwhite T.A.* US Space Command Space Surveillance Network Overview // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993. ESA-SD-01.
61. *Schumacher P.* US Naval Space Surveillance Upgrade Program 1999–2003 // Proc. 7th US/Russian Space Surveillance Workshop. Monterey, California, USA, 2007.
62. Lockheed Martin Awarded Concept Development Contract for U.S. Air Force Space Fence // Lockheed Martin Press Release. 30 June 2009. http://www.lockheedmartin.com/news/press_releases/2009/063009_LM_AirForce_SpaceFence.html.
63. *Morales M.* Space Fence program awards contracts for concept development // U.S. Air 31 July 2009. <http://www.af.mil/news/story.asp?id=123161377>.
64. *Scully J.* Space Unite Settles at VAFB // Santa Maria Times. Oct. 2007. <http://www.santamariatimes.com/articles/2007/10/29/news/centralcoast/news03.txt>.
65. US Strategic Command History. March 2007, online: <http://www.stratcom.mil/about-ch.html>.
66. 15th Annual NASA/DoD Orbital Debris Working Group Meeting // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 3.
67. Космические силы США вооружились «Космическим забором». 2020. <https://nplus1.ru/news/2020/03/31/space-fence>.
68. *Butler A.* Space-Based Visible Sensor Ceases Ops // Aviation Week. 21 Nov. 2008. <http://www.aviationweek.com/aw/generic/story.jsp?id=news/Spacey061008.xml&channel=space>.
69. US Air Force delays launch of space based surveillance system / ed. Jaramillo C. Univ. of Waterloo, Ontario, Canada: Pandora Press, 2010.
70. Space Security index 2020. University of Adelaide, 2020.
71. Bureaucracy Threatens Sat Protection Project // Aviation Week and Space Technology. 4 Apr. 2008.
72. Space Surveillance Support to Commercial and Foreign Entities (CFE) Pilot Program // Public Law 108–136. Section 913. 10 U.S.C. § 2274 (i) — Data Support. 2010. http://celestrak.com/NORAD/elements/notices/Space_Surveillance_Support_to_CFE_Pilot_Program_V07.pdf.
73. Federation of American Scientists. Joint Data Exchange Center (JDEC). 2010.
74. A GRAVES Sourcebook // Federation of American Scientists. 2006. <http://www.fas.org/spp/military/program/track/graves.pdf>.
75. *de Selding P.* French Say "NON" to US Disclosure of Secret Satellites // Space News. 8 June 2007.
76. *de Selding P.* Europe Keeping Increasingly Capable Eye on Space Debris // Space News. 21 Apr. 2010. <http://www.spacenews.com/civil/100421-europe-eye-orbital-debris.html>.
77. Successful Trial for BNSC-funded Space Surveillance Project (2006) // Spacewar. Nov. 2006. http://www.spacewar.com/reports/Successful_Trial_For_BNSC_funded_Space_Surveillance_Project_999.html.
78. *Michal Th. et al.* GRAVES: The new French System for Space Surveillance // Proc. 4th European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2005.
79. *Donath T., Schildknecht T. et al.* Proposal for a European Space Surveillance System // Proc. 4th European Conference on Space Debris. Darmstadt, Germany, 2005.
80. *Пак Я., Хабаров Е.* Наземные оптико-электронные и квантово-оптические средства европейской системы контроля космического пространства. Ч. 1 // Зарубежное военное обозрение. 2016. № 8. С. 63–70.
81. *Пак Я., Хабаров Е.* Наземные оптико-электронные и квантово-оптические средства европейской системы контроля космического пространства. Ч. 2 // Зарубежное военное обозрение. 2016. № 9. С. 69–74.

82. *Donath T., Schildknecht T. et al.*, Possible European Systems for Space Situational Awareness // 59th Intern. Astronautical Congress. Glasgow, Scotland, UK. 2008.
83. *Donath T. et al.*, Architectures Analysis for the Future European SSA System // Proc. 5th European Conference on Space Debris. Darmstadt, Germany, 2009.
84. *Muller F.* Consolidated requirements for a UHF radar system for the ESSAS // ESA contract n° 22062/08/D/HK. 2009.
85. http://factmil.com/publ/strana/evrosojuz/nazemnye_radiolokacionnye_sredstva_evropejskoj_sistemy_kontrolja_kosmicheskogo_prostranstva_2017/125-1-0-1177.
86. Chinese Space Facilities // [Globalsecurity.org](http://www.globalsecurity.org/space/world/china/facility.htm). Oct. 2005. <http://www.globalsecurity.org/space/world/china/facility.htm>.
87. *Xiaodan Du* China launches major project to monitor space with network of observatories // CCTV. Jan. 2008. <http://www.cctv.com/english/20080106/100834.shtml>.
88. China Enhances Spacecraft Monitoring Network // Xinhua. 12 Dec. 2006. http://news3.xinhuanet.com/english/2006-12/12/content_5473204.htm.
89. *Zhour H., Liu W.* Status Quo and Assumption of China's Space Satellite Monitoring // China Communications. 2006.
90. China Launches New Space Tracking Ship to Serve Shenzhou VII // Xinhua. 22 Sept. 2008. <http://english.cri.cn/3126/2008/09/22/902s407814.htm>.
91. *Harvey W. et al.* The Near Earth Object Surveillance Satellite (NEOSSAT) Mission Enables an Efficient Space-based Survey (NESS Project) of Interior-to-Earth-Orbit (IEO) Asteroids // 38th Lunar and Planetary Science. 2007.
92. *Maskell P., Oram L.* Sapphire: Canada's Answer to Space-Based Surveillance of Orbital Objects // Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conf. Wailea, Maui, Hawaii, USA, Sept. 2008.
93. *Wattie Ch.* Canada will launch own spy satellite: Project Sapphire // National Post. A6, Nov. 2006.
94. *Veniaminov S., Batyr G. et al.*, RSSS Results from ODERACS Measurements // Proc. 12th IADC Meeting, Houston, Texas, USA, 1995.
95. Radar and Optical Ground Measurements Final Report on ODERACS experiment. NASA, JSC, Houston, Texas, USA, 1996.
96. *Вениаминов С.С.* Оптимизация поиска объекта, движущегося циклически по замкнутой траектории // Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1984. № 1.
97. *Вениаминов С.С.* Планирование поиска космического объекта. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing, 2012.
98. *Veniaminov S.* Planning the search for a space object. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing, 2012.
99. *Veniaminov S.* The Methods and Experience of Detecting Small and Weakly-Contrasting Space Objects // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, 1993.
100. *Potter A., Settecerri T. et al.*, Radar and Optical Ground Measurements, ODERACS: Final Report. NASA, 1996.
101. *Назаренко А. и др.*, Результаты исследования аэродинамических характеристик и плотности верхней атмосферы с помощью пассивных спутников «Пион» // Наблюдения искусственных небесных тел. Астросовет АН СССР. 1990. № 86.
102. *Тарасов Ю.Л. и др.*, Проектирование и конструкция комплекса «Пион» // Наблюдения искусственных небесных тел. Астросовет АН СССР. 1990. № 86.
103. *Batyr G. et al.*, A posteriori analysis of the "Pion" experiment results // Proc. 1st European Conf. Space Debris. ESA-SD-01. Darmstadt, Germany, 1993.
104. «Спектр-РГ» увидел разрыв звезды сверхмассивной черной дырой // N+1. 2020. <https://nplus1.ru/news/2020/12/30/star-death-spektr-rg>.
105. Легендарный радиотелескоп «Аресибо» прекращает работу // LiveJournal. Masterok. 2020.
106. IADC Observation Campaigns, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee // 43rd Session of UNCOUOS S&T SC. Feb. 2006.
107. *Matney M. et al.*, Recent Results From Goldstone Orbital Debris Radar // 32nd COSPAR Scientific Assembly. Nagoya, Japan, 1998.
108. *Stokely C.* Utilizing the Ultra-Sensitive Goldstone Radar for Orbital Debris Measurements // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 3.
109. *Stokely C.* Utilizing the Ultra-Sensitive Goldstone Radar for Orbital Debris Measurements. 2004.
110. Galilean Satellite Goldstone-GBT Radar. Jet Propulsion Laboratory, NASA, 2014.

111. *Foster J.* et al. Detection of Small Radar Cross Section Orbital Debris with the Haystack Radar // 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, France, 18–25 July 2004: Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 4.
112. *Stansbery E., Setteccery T.* HAX Radar // Orbital Debris Quarterly News. 1997. V. 2. Iss. 1.
113. *Stansbery E.* et al. Orbital Debris Environment Characteristics Obtained by Means of the Haystack Radar // Proc. 1st European Conf. Space Debris, Darmstadt, Germany, 1993.
114. *Matney M.* Small Debris Observations from the Iridium-33/Cosmos-2251 Collision // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 2. Apr. 2010.
115. *Xu Y.-L.* et al., A Statistical Size Estimation Model for Haystack and HAX Radar Detections // 56th Intern. Astronautical Congress. Fukuoka, Japan, 17–21 Oct. 2005.
116. *Setteccery T.* Comparison of Optical and Radar Orbital Debris Measurements // 9th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. 1999.
117. *Setteccery T., Stansbery E.* Measurements of the Orbital Debris Environment: Comparison of the Haystack and HAX Radars. 1997.
118. *Stansbery E.* Detection of Very Small Debris With Haystack // Orbital Debris Quarterly News. V. 2. Iss. 4. 1997.
119. *Stokely C.* Flux Comparisons from the Goldstone, Haystack, and HAX Radars // Orbital Debris Quarterly News. V. 10. Iss. 2. Apr. 2000.
120. Small Debris Observations by the Cobra Dane Radar // Orbital Debris Quarterly News. 1999. V. 4. Iss. 4.
121. Space Surveillance Sensors: The Cobra Dane Radar, 2012, <https://mostlymissiledefense.com/>
122. AN/FPS-108 COBRA DANE//Military Space Program. 2914.
123. *Flury W.* et al., Detection and Tracking of Space Objects and Debris in Europe // Proc. 5th US/Russian Space Surveillance Workshop. Pulkovo Obs., St. Petersburg, Russia, 2003.
124. *Flury W.* Agenda Item 8: Space Debris, European Space Agency // 41st Session UNCOPUOS. 2004.
125. *Letsch R.* et al., First Results from the Multibeam Bistatic Beampark Experiment at FGAN // Proc. 5th European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2009.
126. *Markkanen J., Jehn R., Krag H.* EISCAT Space Debris during IPY — a 5000 hour Campaign // Proc. 5th European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2009.
127. *Thomson A.* A GRAVES Sourcebook. Version 2007-12-1. 2007.
128. *Rossi A.* The Earth Orbiting SD // Serbian Astronomical J. 2005. V. 170.
129. Starlink GRAVES Radar Reflections Received with SDR // rtl-sdr.com. 5 Dec. 2019.
130. Space Debris Radar Station Operational // Japan Times. 9 Apr. 2004.
131. Space Track. 2008. <http://www.space-track.org>.
132. *Barker E.* et al., Analysis of Working Assumptions in the Determination of Populations and Size Distributions of Orbital Debris from Optical Measurements // Air Force Maui Optical and Supercomputing (AMOS) Technical Conf. Wailea, Maui, Hawaii, USA, 13–17 Sept. 2004.
133. *Flury W.* et al., Searching for Small Debris in the Geostationary Ring — Discoveries with the Zeiss 1-meter Telescope // 104 ESA Bulletin. Nov. 2000.
134. *Vananti A.* et al., Preliminary Results from Reflectance Spectroscopy Observations of Space Debris in GEO // Proc. 5th European Conf. Space Debris. ESA SP-672. Darmstadt, Germany, 2009.
135. *Früh C.* et al., Catalogue Correlation of Space Debris Objects // Proc. 5th European Conf. Space Debris. ESA SP-672. Darmstadt, Germany, 2009.
136. *Africano J.* et al., Liquid Mirror Telescope Observations of the Orbital Debris Environment. JSC-28826. Houston, Texas, USA, 1999.
137. *Cress G., Potter A.* Liquid Mirror Telescope // Orbital Debris Quarterly News. 1997. V. 2. Iss. 1.
138. *Africano J.* Liquid Mirror Telescope Observations of the Orbital Debris Environment: Oct. 1997 – Jan. 1999 // Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 5. Iss. 1.
139. *Barker E.* et al. The LEO Environment as Determined by the LMT between 1998 and 2002 // Air Force Maui Optical and Supercomputing (AMOS) Technical Conf. Wailea, Maui, Hawaii, USA, 5–9 Sept. 2005.
140. *Jarvis K.* et al. Liquid Mirror Telescope (LMT) Observations of the Low Earth Orbit Orbital Debris Environment. Mar. 1997 – Sept. 2001. Houston, Texas, USA, 2007.
141. *Potter A., Mulrooney M.* Liquid Metal Mirror for Optical Measurements of Orbital Debris // Advances in Space Research. 1997. V. 19.

142. *Mulrooney M., Matney M.* Derivation and Application of a Global Albedo Yielding an Optical Brightness to Physical Size Transformation Free of Systematic Errors // 8th Air Force Maui Optical and Supercomputing (AMOS) Technical Conf. Wailea, Maui, Hawaii, USA, 2007.
143. Publication of the Final and Yearly CDT Reports // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 2.
144. *Africano J.* et al. Preliminary Results from the NASA Orbital Debris Observatory // 9th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. 1999.
145. *Settecerry T., Pitts C.* Radar Measurements of the Orbital Debris Environment: Haystack and HAX Radars, Oct. 1990 – Oct. 1998. Houston, Texas, USA, 1999.
146. *Stansbery E.* et al. A Comparison of Radar and Optical Techniques for Conducting Near Earth Object (NEO) Searches // 9th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 1999.
147. *Abercromby K.* et al. Survey and Chase: A New Method of Observations for the Michigan Orbital Debris Survey Telescope (MODEST) // 57th Intern. Astronautical Congress. Valencia, Spain, 2–6 Oct. 2006.
148. *Matney M.* et al. Calculating Statistical Orbit Distributions Using GEO Optical Observations with the Michigan Orbital DEbris Survey Telescope (MODEST) // 57th Intern. Astronautical Congress. Valencia, Spain, 2–6 Oct. 2006.
149. *Yanagisawa T.* et al. Detection of Small GEO Debris with MODEST Data Using an Automatic Detection Algorithm // *Orbital Debris Quarterly News*. 2006. V. 10. Iss. 3.
150. *Abercromby K.* et al. Michigan Orbital DEbris Survey Telescope (MODEST) Results // *Orbital Debris Quarterly News*. 2005. V. 9. Iss. 3.
151. *Abercromby K.* et al. A Summary of Five Years of Michigan Orbital Debris Survey Telescope (MODEST) Data // 59th Intern. Astronautical Congress (IAC). Glasgow, Scotland, 2008.
152. *Barker E.* et al. Comparison of Orbital Parameters for GEO Debris Predicted by LEGEND and Observed by MODEST: Can Sources of Orbital Debris be Identified? // *Advanced Maui Optical and Space (AMOS) Surveillance Technologies Conf.* Wailea, Maui, Hawaii, USA, 10–14 Sept. 2006.
153. *Rodriguez H.* et al. Seasonal Variations of the MODEST Data // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 1.
154. *Seitzer P.* Searching for Faint Debris in the GEO Ring // *Orbital Debris Quarterly News*. 2004. V. 8. Iss. 4.
155. *Seitzer P.* et al. Real-time Survey and Follow-up Observations of GEO Debris // *Orbital Debris Quarterly News*. 2005. V. 9. Iss. 4.
156. *Seitzer P.* et al. An Optical Survey for GEO Debris in High Inclination Orbits // *Air Force Maui Optical and Supercomputing (AMOS) Technical Conf.* Wailea, Maui, Hawaii, USA, 5–9 Sept. 2005.
157. *Seitzer P.* et al. Optical Observations of GEO Debris with Two Telescopes // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 3.
158. *Seitzer P.* et al. Optical Studies of Space Debris at GEO — Survey and Follow-up with Two Telescopes // 8th Air Force Maui Optical and Supercomputing (AMOS) Technical Conf. Wailea, Maui, Hawaii, USA, 10–14 Sept. 2007.
159. *Seitzer P.* et al. Optical Studies of Orbital Debris at GEO Using Two Telescopes // *Advanced Maui Optical and Space (AMOS) Surveillance Technologies Conf.* Wailea, Maui, Hawaii, USA, 2008.
160. *Seitzer P.* et al. An Optical Survey for Space Debris in Geosynchronous Orbit // 211th Meeting of the American Astronomical Society. Austin, Texas, USA, 7–11 Jan. 2008.
161. 8th Air Force Maui Optical and Supercomputing (AMOS) Technical Conference, Wailea, Maui, Hawaii, USA, September 2007 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 4.
162. *Seitzer P.* Observations of Space Debris in Geosynchronous Orbit with the Michigan Schmidt // *Orbital Debris Quarterly News*. 2001. V. 6. Iss. 3.
163. *Yoshitaka T.* Observation of Space Debris by the Kamisaibara Radar System // *Proc. 4th European Conf. Space Debris*. Darmstadt, Germany, 2005.
164. *Pyrin V.* et al., Some Results of Testing the New Program for Searching Space Objects in Deep Space // *Proc. 4th European Conf. Space Debris*. Darmstadt, Germany, 2005.
165. *Tretyakov Yu.* et al. On the theory and some specific methods for searching space objects by rough orbital information // *Proc. 6th US/Russian Workshop on Space Surveillance*, St. Petersburg, 2005.
166. *Seitzer P.* et al. Detection of Optically Faint GEO Debris // *Orbital Debris Quarterly News*. V. 16. Iss. 4, NASA, USA, October 2012.

167. *Seitzer P.* et al. Visible Light Spectroscopy of GEO Debris // 13th Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conf. Maui, Hawaii, USA, Sept. 2012.
168. *Seitzer P.* et al. Searching for Optically Faint GEO Debris // The 63rd Intern. Astronautical Congress (IAC), Naples, Italy, Oct. 2012.
169. Orbital Debris Quarterly News. 2015. V. 19. Iss. 3.
170. Orbital Debris Quarterly News. 2015. V. 19. Iss. 4.
171. Orbital Debris Quarterly News. 2017. V. 21. Iss. 1.
172. Orbital Debris Quarterly News. 2017. V. 21. Iss. 4.
173. Orbital Debris Quarterly News. 2020. V. 24. Iss. 1.
174. Orbital Debris Quarterly News. 2020. V. 24. Iss. 4.
175. *Pearce E.* Satellite photometry with the GEODSS, MOSS and SBV systems // Proc. 4th US/Russian Workshop on Space Surveillance. USNO. Washington D. C., USA, 2000.
176. *Kessler D.* Orbital Debris Environment // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
177. *Pearce E.* Space Debris Measurements: Phase 1 // Proc. 1st US/Russian Space Surveillance Workshop, 1994.
178. *Mehrholz D.* Potentials and limits of SO observations and data analysis using radar techniques // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
179. *Sato T., Tanaka K.* et al., Interpretation of SD RCS variations observed by the MU radar // 18th Intern. Symp. Space Technology and Space Science. Kagoshima, Japan, 1992.
180. *Goldstein R., Randolph L.* Rings of Earth Detected by Orbital Debris Radar // JPL Progress Report 42-101. Pasadena, California, USA, 1990.
181. *Stansbery E.* et al. Haystack Radar Measurements of the Orbital Debris Environment // JSC-26655. NASA, Houston, Texas, USA, 1994.
182. *Cress G.* et al. Radar and Optical Ground Measurements Final Report. ODERACS. Houston, Texas, USA, 1996.
183. *Hyde J.* et al. Shuttle Hypervelocity Impact Database // 62nd Intern. Astronautical Congress (IAC). Cape Town, South Africa, 3–7 Oct. 2011.
184. *McDonnell J., Sullivan K.* Hypervelocity impacts on space detectors // Hypervelocity Impacts in Space. 1992. V. 39.
185. *Watts A.* et al. Dimensional scaling for impact cratering and perforation. Houston, Texas, 1993.
186. *Kuzin G.* Meteorit and Man-made Microparticle Impact Detection Methodology and Equipment on the Space Stations "Salyut" and "Mir" // NRC Space Debris Workshop. Irvine, California, 1993.
187. *Mulholland J.* Synoptic monitoring of orbital debris (SYNMOD): A progress report on current and future applications // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
188. *Horz F.* Mir Orbital Debris Collector Data Analyzed // Orbital Debris Quarterly News. 1999. V. 4. Iss. 2.
189. PINDROP — An Acoustic Particle Impact Detector // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 3.
190. *Mulholland J.* et al. IDE spatio-temporal impact fluxes and high time resolution studies of multi-impact events and long-lived debris clouds // NASA CP-3134, LDEF — 69 Months in Space: Proc. 1st Post-Retrieval Symp. Kissimee, Florida, USA, 1991.
191. *Potter A.* Early detection of Collisional cascading // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
192. *Hüdepohl A.* et al. Analysis of the Results of Two-year Operations of the Munich dust counter — a Cosmic Dust Experiment on Board the satellite HITEN // IAF. Paris, France, 1992. Paper 92-0561.
193. *Kinard W.* Description of the ordinal meteoroid and debris counting experiment to fly on the Clementine inter-stage adapter spacecraft // NASA Conf. publication 10120. 3rd LDEF post-retrieval symposium abstracts. Hampton, Virginia, USA, 1993.
194. *Kassel P., Wartman J.* Metal-oxide-silicon capacitor detectors for measuring micrometeoroid and space debris flux // AIAA J. Spacecraft and Rockets. 1994.
195. *See T.* et al. Meteoroid and Debris Impact Features Documented on the LDEF: A Preliminary Report. Houston, Texas, USA, 1990.
196. *Bernhard R., Christiansen E.* Orbital Debris as Detected on Exposed Spacecraft // Orbital Debris Quarterly News. 1997. V. 2. Iss. 4.

197. *Strong I, Tuzzolino A.* The Space Dust Experimental Spacecraft, Air Force Laboratory Contract Task Report // Proc. 1st Annual Workshop on the Effects of Orbital Debris. Kirtland Air Force Base. New Mexico, 1989.
198. ISS Large Area Debris Collector (LAD-C) Update // Orbital Debris Quarterly News. 2006. V. 10. Iss. 3.
199. *Liou J.-C.* et al. Improving the Near-Earth Micrometeoroid and Orbital Debris Environment Definition with LAD-C // 57th Intern. Astronautical Congress. Valencia, Spain, 2–6 Oct. 2006.
200. *Opiela J., Johnson N.* In Situ Detections of a Satellite Breakup // Orbital Debris Quarterly News. 200. V. 5. Iss. 4.
201. *Tuzzolino A.* et al. In Situ Detections of a Satellite Breakup by the SPADUS Experiment // Proc. 3rd European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2000.
202. *Eichler P.* The necessity and efficiency of mitigation measures to limit the debris population in LEO // NRC Committee on Space Debris Workshop. Irvine, California, USA, 1993.
203. *Kessler D.* et al. Space Station Program Natural Environment Definition for Design. Houston, Texas, USA, 1994.
204. *Kessler D.* et al. Space Station Program Natural Environment Definition for Design. Texas, USA, 1991.
205. *Kessler D., Cour-Palais B.* Collisional frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt // J. Geophysical Research. 1978. V. 83. Iss. A6.
206. *Kessler D.* Sources of orbital debris and the projected environment for future spacecraft // J. Spacecraft and Rockets. 1981. V. 18. Iss. 4.
207. *Su S.-Y., Kessler D.* Contribution of explosion and future collision fragments to the orbital debris environment // Advances in Space Research. 1985. V. 5. Iss. 2.
208. *Johnson N.* et al. NASA's New Breakup Model of EVOLVE 4.0 // 33rd Scientific Assembly of COSPAR. 2000; Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 5. Iss. 3.
209. *Krisko P.* EVOLVE 4.0 Sensitivity Study Results // Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 5. Iss. 1.
210. *Reynolds R.* Orbital debris environment projections for space station // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
211. *Reynolds R.* et al. Sensitivity Analysis of the Orbital Debris Environment Using EVOLVE 4.0 // 32nd COSPAR Scientific Assembly. Nagoya, Japan, 1998.
212. *Rex D., Eichler P.* The possible long term overcrowding of LEO and the necessity and effectiveness of debris mitigation measures // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
213. *Назаренко А.И.* Прогноз засорённости ОКП на 200 лет и синдром Кesslera. 2010. <http://www.satmotion.ru>.
214. *Nazarenko A.* Results of Updating the Parameters of the Space Debris Model in 2007 and in 2009 // Proc. 5th European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2009.
215. Space Debris. Hazard Evacuation and Mitigation / ed. Smirnov N. Taylor and Francis, 2002.
216. *Reynolds R., Eichler P.* Synergistic Use of EVOLVE/ CHAIN Comparison // Orbital Debris Quarterly News. 1996. V. 1. Iss. 2.
217. *Anz-Meador Ph., Krisko P., Matney M.* GEO_EVOLVE 1.0: A Long-Term Debris Evolution Model for the Geosynchronous Belt // Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 5. Iss. 4.
218. *Flegel S.* et al. Basic Philosophy and Feature Comparison of the Debris Environment Models MASTER-2009 and ORDEM2010 // 38th Scientific Assembly of COSPAR. Bremen, Germany. 2010; Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 3.
219. *Krisko P.* The 2006 Geosynchronous (GEO) Environment for ORDEM2010 // Orbital Debris Quarterly News. 2009. V. 13. Iss. 4.
220. *Krisko P.* NASA's New Orbital Debris Engineering Model, ORDEM2010 // 4th IAASS Conf. Huntsville, Alabama, USA, 2010.
221. *Sdunnus H., Klinkrad H.* An introduction to the ESA Reference Model for Space Debris and Meteoroids // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
222. *Liou J.-C.* Cube — The LEGEND Collision Probabilities Evaluation Model // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 1.
223. *Liou J.-C.* Collision Activities in the Future Orbital Debris Environment // 35th COSPAR Scientific Assembly. Paris, France, 18–25 July 2004; Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 4.

224. *Liou J.-C.* A Statistical Analysis on the Future Debris Environment // 56th Intern. Astronautical Congress. Fukuoka, Japan, 17–21 Oct. 2005.
225. *Krisko P., Liou J.-C.* NASA Long-Term Orbital Debris Modeling Comparison: LEGEND and EVOLVE // 54th Intern. Astronautical Congress. Bremen, Germany, 2003.
226. *Martin C.* et al. Comparing the Long-term Evolution of the Space Debris Environment with DELTA, LEGEND and SDM // 36th COSPAR Scientific Assembly. Beijing, China, 16–23 July 2006.
227. *Krisko P.* ORDEM2010 Population Verification and Validation // 29th IADC Meeting. Berlin, Germany, 2011.
228. *Xu Y.-L.* et al. Modeling of the Orbital Debris Population of RORSAT Sodium-Potassium Droplets // 38th Scientific Assembly of COSPAR, Bremen, Germany. 2010; Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 3.
229. *Xu Y.-L.* et al. Simulation of Micron-Sized Debris Populations in Low Earth Orbit // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 2.
230. *Hanada T., Matney M.* Orbital Evolution of Cloud Particles from An Explosion in Near-GEO // Orbital Debris Quarterly News. 2002. V. 7. Iss. 1.
231. *Krisko P.* Proper Implementation of the 1998 NASA Breakup Model // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 4.
232. *Johnson N.* et al., History of On-orbit Satellite Fragmentations. 14th ed. 2008.
233. *Johnson N.L., Krisko P.H., Liou J.-C.* et al. NASA'S new breakup model of EVOLVE 4.0 // Advances in Space Research. 2001. V. 28. Iss. 9. P. 1377–1384.
234. *Fucke W.* Fragmentation experiments for the evaluation of the small size debris population // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
235. *Hogg D.* et al. Final Report on the SOCIT Series of Hypervelocity Impact Tests. Wright Laboratory, Dayton, Ohio, 1993.
236. *Portree D., Loftus J.* Orbital Debris: A Chronology. Houston, Texas, USA, 1999.
237. Chinese Anti-satellite Test Creates Most Severe Orbital Debris Cloud in History // Orbital Debris Quarterly News. 2007. V. 11. Iss. 2.
238. Chinese Debris Reaches New Milestone // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 4.
239. *Johnson N.* et al., The Characteristics and Consequences of the Break-up of the Fengyun-1C Spacecraft // 58th Intern. Astronautical Congress. 2007; Proc. 7th US/Russian Space Surveillance Workshop. Monterey, California, USA, 2007.
240. *Liou J.-C., Johnson N.* Characterization of the cataloged Fengyun-1C fragments and their long-term effect on the LEO environment // Advances Space Research. 209. V. 43.
241. *Liou J.-C.,* HST WFPC2 MMOD inspection team. Micrometeoroid and Orbital Debris Impact Inspection of the Hubble Space Telescope Wide Field Planetary Camera 2 Radiator and the Implications for the Near-Earth Small Particle Environment // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 3.
242. Update on Three Major Debris Clouds // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 2.
243. Satellite Collision Leaves Significant Debris Clouds // Orbital Debris Quarterly News. 2009. V. 13. Iss. 2.
244. *Opiela J.* Developing a Mass Density Distribution for Breakup Debris // Orbital Debris Quarterly News. 2006. V. 10. Iss. 2.
245. *Назаренко А. и др.,* Методика и некоторые результаты выявления пространственно-временных закономерностей крупномасштабных флуктуаций плотности атмосферы // Наблюдения искусственных небесных тел. Астросовет АН СССР. 1987. № 82.
246. *Nazarenko A.* et al. The space-temporal variations of the upper atmosphere density derived from the satellite drag data // Advances Space Research. 1991. Vol. 11. Iss 6.
247. *Johnson N.* Increasing Solar Activity Aids Orbital Debris Environment // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 1.
248. *Horstman M.* Varying Solar Flux Models and their Effect on the Future Debris Environment Projection // Orbital Debris Quarterly News. 2005. V. 9. Iss. 1.
249. *Whitlock D.* Modeling the Effect of High Solar Activity on the Orbital Debris Environment // Orbital Debris Quarterly News. 2006. V. 10. Iss. 2.
250. *Вениаминов С.* Новые подходы к прогнозированию солнечной активности с использованием метода блочной аппроксимации, обобщений метода наименьших квадратов и методов выявления периодичностей // Эколог. вестн. науч. центров Черноморского эконо. сотрудничества. 2017. № 4. Вып. 2. С. 39–44.

251. Walker R., Nazarenko A. Comparison of models of the current LEO debris environment at different size thresholds // 17th IADC Meeting. ESOC. Darmstadt, Germany, 1999.
252. Kessler D. et al. The Kessler syndrome: Implications to Future Space Operations // 33rd Annual American Astronautical Society. Rocky Mountain Section. Guidance and Control Conf. Breckenridge, Colorado, USA, 2010.
253. Mulrooney M. An Assessment of the Role of Solid Rocket Motors in the Generation of Orbital Debris // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 4.
254. Siebold K., Matney M. et al., Risk analysis of 1–2 cm debris population for solid rocket motors and mitigation possibilities for geotransfer orbits // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
255. Horstman M. An Analysis of the Orbital Distribution of Solid Rocket Motor Slag // 58th Intern. Astronautical Conf. Hyderabad, India, 24–28 Sept. 2007.
256. An Assessment of the Role of Solid Rocket Motors in the Generation of Orbital Debris. Houston, Texas, USA, 2007.
257. Kessler D. et al. The Importance of Nonfragmentation Sources of Debris to The Environment // 32nd COSPAR Scientific Assembly. Nagoya, Japan, 1998.
258. Watts A. et al. Impact effects on optics survivability: induced optical scattering. Kirtland Air Force base, New Mexico, USA, 1994.
259. Coombs C. et al. Damage areas on selected LDEF aluminum surfaces // Proc. 2nd LDEF Post Retrieval Symp. NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, 1992. Pt. 2. Art. No. 3194. P. 595.
260. Allbrooks M., Atkinson D. The Magnitude of Impact Damage on LDEF Materials. Houston, Texas, USA, 1992.
261. Meshishnek M. et al. LDEF Experiment M0003 Meteoroid and Debris Survey // Proc. 2nd LDEF Post Retrieval Symp. NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, 1992. Art. No. 3194. P. 357.
262. Krueger F. Hypervelocity Impact Physics — Plasma Discharge Phenomena on Solar Generators // Behavior of Systems in the Space Environment. 1993. V. 245.
263. https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers.
264. Space Track public satellite catalog maintained by the U.S. military. 2012. <http://space-track.org>.
265. Satellite box score (as of 21 Nov. 2021) // Orbital Debris Quarterly News. 2021. V. 25. Iss. 4.
266. Liou J.-C., Johnson N. Instability of the current orbital population // Science. 2006; Orbital Debris Quarterly News. 2006. V. 10. Iss. 2.
267. Olmedo E. et al. Cataloguing Performance of a Proposed European Space Situational Awareness System // Proc. 5th European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2009.
268. Report on Orbital Debris, Interagency Group. National Security Council, Washington D.C., USA, 1989.
269. Liou J.-C. A Note on Active Debris Removal // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 3.
270. Monthly Number of Objects in Earth Orbit by Object Type // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 1.
271. AIAA Position Paper on Space Debris: 30 Years On // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 4.
272. Satellite box score (as of 5 Jan. 2011) // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 1.
273. Satellite box score (as of 6 July 2011) // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 3.
274. Reentry of GeneSat-1 and ICESat Spacecraft (2010) // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 4.
275. Красильников А. «Альтаиры» на орбите // Новости космонавтики. 2012. № 7.
276. Афанасьев А. Три «японца» и «кореец» на орбите, Малые спутники // Новости космонавтики. 2012. № 7.
277. Smallsat Deployments Done Right // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 1.
278. Liou J.-C. An Updated Assessment of the Orbital Debris Environment in Leo // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 1.
279. Dicky V., Veniaminov S. et al. Comparative Analysis of the Russian and US SO Catalogs // Proc. 4th US/Russian Space Surveillance Workshop. USNO, Washington D.C., USA, 2000.
280. Dicky V., Veniaminov S. et al. Dynamics of the Principal Characteristics of the US/Russian Catalogs // Proc. 5th US/Russian Workshop on Space Surveillance. Pulkovo Observatory, Saint Petersburg, 2003.

281. *Ailor W.* Overview: Space Debris and Reentry Hazards. Aerospace Corporation, 2008.
282. *Сочилина А.* О движении геостационарных спутников в гравитационном поле Земли // Бюл. ИТА АН СССР. 1984. Т. 15. № 56.
283. *Сочилина А.* Об эволюции высоких почти круговых орбит спутников с критическим наклоном // Бюл. ИТА АН СССР. 1984. Т. 15. № 56.
284. *Stansbery E. et al.* Haystack Radar Measurements of the Orbital Debris Environment. Houston, Texas, USA, 1994.
285. *Kessler D. et al.* Current status of orbital debris environment models // 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA, 1995.
286. *Stansbery E. et al.* Recent results of orbital debris measurements from the Haystack radar // 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA, 1995.
287. *Johnson N.* History of consequences of on-orbit break-ups // Advantages in Space Research: Space Debris, Asteroids, and Satellite Orbits. 1985. V. 5. Iss. 2.
288. *Muller F., Kessler D.* The effect of particulates from solid rocket motors fired in space // Advances Space Research. 1985. V. 5. Iss. 2.
289. LDEF — 69 Months in Space // 3rd Post-Retrieval Symp. NASA Conf. Publ. 3275. Pt. 1, 2, 3. Williamsburg, Virginia, USA, 1993.
290. *Munzenmayer R. et al.* The Munich dust counter MDC — An experiment for the measurement of micrometeoroids and space debris // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
291. *Kessler D.* Collision probability at low altitudes resulting from elliptical orbits // Advances Space Research. 1990. V. 10. Iss. 3–4.
292. *Liou J.-C.* An Update on LEO Environment Remediation with Active Debris Removal // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 2.
293. *Liou J.-C.* An Update on the Effectiveness of Postmission Disposal in LEO // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 4.
294. <http://www.rbcdaily.ru/2009/03/31/cnews/408370>.
295. Controlling Rocket Body Reentry Risks // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 2.
296. vip.lenta.ru 06.02.2003, 05:22:39.
297. *Анц-Медор Р., Поттер А.* Время существования и падение ОК «Салют-7» – «Космос-1686». Международный семинар. Дармштадт, Германия, 1991.
298. *Portree D., Loftus J.* Orbital Debris and Near-Earth Environmental Management: A Chronology. Houston, Texas, USA, 1993.
299. Cosmos Reentry Spurs Nuclear Waste Debate // Aviation Week and Space Technology. 1978.
300. *Matney M.* On the Probability of Random Debris Reentry Occurring on Land or Water // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 1.
301. Rocket Body Debris Falls in Argentina // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 2.
302. PAM-D Debris Falls in Saudi Arabia // Orbital Debris Quarterly News. 2001. V. 6. Iss. 2.
303. Russian Launch Vehicle Stage Reenters Over U.S // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 2.
304. French Launch Vehicle Debris Lands in Brazil // Orbital Debris Quarterly News. 2012. V. 16. Iss. 2.
305. Eighteen-Year-Old Solid Rocket Motor Casing Found in Australia // Orbital Debris Quarterly News. 2008 V. 12. Iss. 4.
306. *Clark Ph.* The Soviet Manned Space Program. Salamander Books, Ltd., 1988.
307. *Flury W.* The Reentry of Salute-7/Kosmos-1686. Intern. Workshop. Darmstadt, Germany, 1991.
308. *Lopez O. K.* Dangerous Encounters // Via Satellite. 1995.
309. *Johnson N.* Empirical Accuracies of U.S. Space Surveillance Network Reentry Predictions // 37th COSPAR Scientific Assembly. Montréal, Canada, 13–20 July 2008.
310. *Kelley R., Johnson N.* Evaluating and Addressing Potential Hazards of Fuel Tanks Surviving Atmospheric Reentry // 5th Intern. Association for the Advancement of Space Safety (IAASS) Conf. Versailles-Paris, France, 17–19 Oct. 2011.
311. Accidental Collisions of Cataloged Satellites Identified // Orbital Debris Quarterly News. 2005. V. 9. Iss. 2.
312. *McKnight D.* Collision and Breakup Models: Pedigree, Regimes, and Validations // Briefing to the NRC Committee on Space Debris Workshop. Irvine, California, USA, 1993.

- 198
- Литература
313. *Christiansen E.* et al. ISS Zarya Control Module Impact Damage // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 4.
 314. *Hyde J.* et al. Intern. Space Station Hand Rail and Extravehicular Activity Tool Impact Damage // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 3.
 315. MMOD Inspection of the HST Wide Field Planetary Camera 2 Radiator // *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 3.
 316. New Report on Hubble Space Telescope Impact Damage // *Orbital Debris Quarterly News*. 2002. V. 7. Iss. 1.
 317. Survey of the Hubble Space Telescope Micrometeoroid and Orbital Debris Impacts From Space Shuttle Service Mission 3A Imagery. Houston, USA, 2002.
 318. *Anz-Meador Ph.* Challenges in Interpreting HST Impact Features // *Orbital Debris Quarterly News*. 2011. V. 15. Iss. 1.
 319. *Klinkrad H., Stokes H.* Hypervelocity Impact Damage Assessment and Protection Techniques // *Space Debris: Models and Risk Analysis*. 2006. P. 205–208.
 320. *Opiela J.* et al. Data Collected During the Post-Flight Survey of Micrometeoroid and Orbital Debris Impact Features on the Hubble Wide Field Planetary Camera 2 // *IAC Conf. Prague, Czech Republic*, 2010.
 321. *Kessler D.* Derivation of the collision probability between orbiting objects: The lifetime of Jupiter's moons // *Icarus*. 1981.
 322. Avoiding Satellite Collisions in 2009 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2010. V. 14. Iss. 1.
 323. Increase in ISS Debris Avoidance Maneuvers // *Orbital Debris Quarterly News*. 2012. V. 16. Iss. 2.
 324. *Lear D., Christiansen E.* Intern. Space Station Debris Risk Assessment Process // *Orbital Debris Quarterly News*. 1999. V. 4. Iss. 1.
 325. ISS Performs First Collision Avoidance Maneuver // *Orbital Debris Quarterly News*. 2000. V. 5. Iss. 1.
 326. The Multiple Fragmentations of Cosmos 2421 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 3.
 327. ISS Maneuvers to Avoid Russian Fragmentation Debris // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 4.
 328. Intern. Space Station again dodges debris // *Orbital Debris Quarterly News*. 2011. V. 15. Iss. 3.
 329. Intern. Space Station Avoids Debris from Old NASA Satellite // *Orbital Debris Quarterly News*. 2011. V. 15. Iss. 1.
 330. РИА Новости, Москва, 7 окт. 2012.
 331. *Aksenov O., Veniaminov S.* et al. On monitoring the re-entry of the ISS fragment by Russian Space Surveillance System // *Proc. 8th US/Russian Space Surveillance Workshop*. Maui, Hawaii, USA, 2010.
 332. *Johnson N.* International Space Station and the Space Debris Environment: 10 Years on // *Proc. 5th European Conf. Space Debris*. Darmstadt, Germany, 2009; *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13, Iss. 2.
 333. *Jackson A., Bernhard R.* 'Large' Solid Rocket Motor Particle Impact on Shuttle Window // *Orbital Debris Quarterly News*. 1997. V. 2. Iss. 2.
 334. *Kerr J.* Post-flight Examination of the STS-96 Orbiter // *Orbital Debris Quarterly News*. 2000. V. 5. Iss. 1.
 335. ISS Space Shuttles Examined for Debris Impacts // *Orbital Debris Quarterly News*. 2001. V. 6. Iss. 2.
 336. *Hyde J.* et al. STS-114 Micrometeoroid/Orbital Debris (MMOD) Post-Flight Assessment // *Orbital Debris Quarterly News*. 2006. V. 10. Iss. 3.
 337. *Hyde J.* et al. Investigation of MMOD Impact on STS-115 Shuttle Payload Bay Door Radiator // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 3.
 338. *Hyde J.* et al. Shuttle Post Flight MMOD Inspection Highlights // *61st Intern. Astronautical Congress (IAC)*. Prague, Czech Republic, 2010.
 339. *Lear D.* et al. STS-118 Radiator Impact Damage // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 1.
 340. *Herrin J.* et al. STS-126 Shuttle Endeavour Window Impact Damage // *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 2.
 341. *Christiansen E.* et al. Assessment of High Velocity Impacts on Exposed Space Shuttle Surfaces, // *Proc. 1st European Conference on Space Debris*. Darmstadt, Germany, 1993.

342. Orbital Debris Success Story — A Decade in the Making // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 2.
343. Johnson N. Fiftieth Anniversary of First On-Orbit Satellite Fragmentation // Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 3.
344. <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/SatelliteFragHistory/fraghistory.html>.
345. Johnson N. Deliberate Satellite Fragmentations and Their Effect on the Long-Term Space Environment // 38th Scientific Assembly of COSPAR. Bremen, Germany, July 2010; Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 3.
346. Satellite Breakups Remain a Problem After 40 Years // Orbital Debris Quarterly News. 2002. V. 7. Iss. 3.
347. History of On-Orbit Satellite Fragmentations / 13th ed. 2004.
348. Russia building anti-satellite weapons // Associated Press. 5 March 2009. <http://www.msubc.msn.com/id/29531802>.
349. Hyde J. et al. A History of Meteoroid and Orbital Debris Impacts on the Space Shuttle // Proc. 3rd European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2000.
350. Zak A. IS Anti-satellite System // Russian Space Web. 2008. <http://www.russianspaceweb.com/is.html>.
351. Новости космонавтики. 1996. № 22.
352. Новости космонавтики». 1996. № 23.
353. McKnight D. Determining the Cause of a Satellite Breakup: A Case Study of the "Cosmos-1275" Breakup // 38th IAF Congress. England, 10–17 Oct. 1987.
354. Johnson N. Preliminary Analysis of the Fragmentation of the Spot 1 Ariane third stage // Orbital Debris from Upper-stage Breakup / ed. J. Loftus. 1989.
355. Johnson N. New Passivation Measures Implemented on Pegasus Upper Stage // Orbital Debris Quarterly News. 1998. V. 3. Iss. 1.
356. Johnson N. First Natural Collision of Cataloged Earth Satellites // Orbital Debris Quarterly News. 1996. V. 1. Iss. 2.
357. Россия. Запуск и полёт станции «Марс-96» // Новости космонавтики. 1996. № 22, 23.
358. <http://fyn.astronomer.ru/forum/index.php?action=printpage;topic=65.0>.
359. Three Satellites Breakups During May-June // Orbital Debris Quarterly News. 1997. V. 2. Iss. 3.
360. Johnson N. Intentional LEO Spacecraft Breakup in September // Orbital Debris Quarterly News. 1997. V. 2. Iss. 4.
361. Three Upper Stage Breakups in One Week Top February Debris Activity // Orbital Debris Quarterly News. 1998. V. 3. Iss. 2.
362. The First Satellite Breakup of 2000 // Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 5. Iss. 2.
363. Two Major Satellite Breakups Near End of 2001 // Orbital Debris Quarterly News. 2002. V. 7. Iss. 1.
364. A New Collision in Space? // Orbital Debris Quarterly News. 2002. V. 7. Iss. 3.
365. Second Identified Satellite Breakup of 2002 // Orbital Debris Quarterly News. 2002. V. 7. Iss. 3.
366. Satellite Fragmentations in 2003 // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 1.
367. Fragmentation of Cosmos 2383 // Orbital Debris Quarterly News. 2004. V. 8. Iss. 2.
368. First Satellite Breakups of 2006 // Orbital Debris Quarterly News. 2006. V. 10. Iss. 3.
369. Копник А., Лисов И. «Экспресс АМ-11» подбит космическим мусором? // Новости космонавтики. 2006. V. 5.
370. Кто сбил спутник «Экспресс АМ-11»? // Сайт Эдуарда Безобразова. Железногорск, 6 апр. 2006.
371. Significant Increase in Satellite Breakups During 2006 // Orbital Debris Quarterly News. 2007. V. 11. Iss. 1.
372. Three More Satellites Involved in Fragmentations // Orbital Debris Quarterly News. 2006. V. 10. Iss. 4.
373. Four Satellite Breakups in February Add to Debris Population // Orbital Debris Quarterly News. 2007. V. 11. Iss. 2.
374. Fengyun-1C Debris: One Year Later // Orbital Debris Quarterly News. 2008. V. 12. Iss. 1.
375. Fengyun-1C Debris: Two Years Later // Orbital Debris Quarterly News. 2009. V. 13. Iss. 1.
376. Stokely C., Matney M. Haystack Radar Observations of Debris from the Fengyun-1C Antisatellite Test // Orbital Debris Quarterly News. 2000. V. 12. Iss. 3.
377. Stansbery E. et al. A Comparison of Three Catastrophic On-Orbit Collisions // 59th Intern. Astronautical Congress (IAC). Glasgow, Scotland, 29 Sept. – 3 Oct. 2008.

378. Detection of Debris from Chinese ASAT Test Increases; One Minor Fragmentation Event in Second Quarter of 2007 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 3.
379. *Liou J.-C., Johnson N.* Physical Properties of the Large Fengyun-1C Breakup Fragments // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 2.
380. *Liou J.-C., Johnson N.* Characterization of the Catalog Fengyun-1C Fragments and Their Long-Term Effect on the LEO Environment // 37th COSPAR Scientific Assembly. Montréal, Canada, 13–20 July 2008.
381. *Kaufman M., White J.* Navy missile hits dying spy satellite, says Pentagon // *Washington Post*. 21 Feb. 2008.
382. Satellite Breakups During First Quarter of 2008 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 2.
383. *Johnson N.* Operation Burnt Frost // *Space Policy*. 2021. V. 56.
384. *Grego L.* A History of Anti-Satellite Weapons Programs. 2006. Union of Concerned Scientists. http://www.ucsusa.org/global_security/space_weapons/a-history-of-asat-programs.html.
385. Data compiled from the public satellite catalog. 2008. Space Track. <http://www.space-track.org>.
386. Two Minor Fragmentations End Worst Debris Year Ever // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 1. P. 1–2.
387. ISS Crew Seeks Safe Haven During Debris Flyby // *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 2.
388. *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 12. Iss. 2–4.
389. *Kessler D.J.* et al. The Search for a Previously Unknown Source of Orbital Debris: The Possibility of a Coolant Leak in Radar Ocean Reconnaissance Satellites. 21 Feb. 1997.
390. New Debris Seen from Decommissioned Satellite with Nuclear Power Source // *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 1. 2009.
391. <http://lenta.ru/news/2009/02/13/collision/>.
392. *Kelso T.* Analysis of the “Iridium 33”–“Cosmos 2251” Collision // *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Conference Proc.* Maui, Hawaii, USA, 2009.
393. *Nazarenko A.* Increasing the Accuracy of Orbit Forecasting on the Basis of Improvement of Statistical Methods for Processing Measurements // *Proc. 5th European Conf. Space Debris*. Darmstadt, Germany, 2009.
394. *Nazarenko A.* Space Debris Status for 200 years ahead & Kessler effect // 29th IADC Meeting. Berlin, Germany, 2011.
395. *Makarov Yu., Nazarenko A.* et al. Prediction of Near-Earth Space Debris Population and Future SO Disposal Measures // *Intern. Astronautical Congress*. 2011.
396. Update on Three Major Debris Clouds // *Orbital Debris Quarterly News*. 2010. V. 14. Iss. 2.
397. Status of Three Major Debris Clouds // *Orbital Debris Quarterly News*. 2012. V. 16. Iss. 3.
398. Congressional Hearing Held on Orbital Debris and Space Traffic // *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 3.
399. United Nations’ COPUOS Receives Update on Iridium–Cosmos Collision // *Orbital Debris Quarterly News*. 2008. V. 13. Iss. 3.
400. Only a Few Minor Satellite Breakups in 2011 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2012. V. 16. Iss. 1.
401. Two Derelict NOAA Satellites Experience Anomalous Events // *Orbital Debris Quarterly News*. 2012. V. 16. Iss. 1.
402. <http://www.interfax.ru/print.asp?sec=1448&id=226017>. 2012.
403. <http://day.zp.ua/news/32307.html>.
404. New Russian Launch Failure Raises Breakup Concern // *Orbital Debris Quarterly News*. 2012. V. 16. Iss. 4.
405. *Cizek E.* Publication of the “History of On-Orbit Satellite Fragmentations” // *Orbital Debris Quarterly News*. 2001. V. 6. Iss. 4.
406. *History of On-Orbit Satellite Fragmentations*. 13th ed. 2004.
407. *Krisko P.* Historical collisions in low Earth orbit // 57th Intern. Astronautical Congress. Valencia, Spain, 2006.
408. *Eichler P., Rex D.* Debris chain reactions // *Orbital Debris: Technical Issues and Future Directions*. 1992.
409. *Kessler D.* Collisional cascading: The limits of Population Growth in Low Earth Orbits // *Advances Space Research*. 1991. V. 11. Iss. 12.

410. *Kessler D. et al.* Review of various models to describe the orbital debris environment // 44th Congress of the Astronomical Federation. Graz, Austria, 1993.
411. *Rossi A. et al.* Approaching the exponential growth: Parameter sensitivity of the debris evolution // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
412. *Su S.-Y.* On runaway conditions of orbital debris environment // Advances Space Research. 1993. V. 13. Iss. 8.
413. Don Kessler wins the Jerome Lederer — Space Safety Pioneer Award (2008) // Orbital Debris Quarterly News. 2009. V. 13. Iss. 1.
414. *Kessler D.* Origin of orbital debris impacts on LDEF's trailing surfaces // LDEF — 69 months in space. 2nd Post-Retrieval Symp. 1992.
415. *Horz F.* Man-made particles on the trailing edge of LDEF // LDEF — 69 months in space. 2nd Post-Retrieval Symp. 1992.
416. Small Satellite Possibly... // Orbital Debris Quarterly News. 2013. V. 17. Iss. 2.
417. *Вениаминов С. и др.,* О подходах к оценке потенциальной опасности разрушений и столкновений космических объектов // Воздушно-косм. сфера. 2018. С. 54–63.
418. Космос, космические дневники. 31 авг. 2016. 21:45. nplus1.ru/news/2016/08/31/sentinel-hit.
419. *Christiansen E.* Investigation of hypervelocity impact damage to space station truss tubes // Intern. J. Impact Engineering. 1990. V. 10.
420. *Christiansen E., Ortega J.* Hypervelocity impact testing of Shuttle orbiter thermal protection system tiles // American Inst. Aeronautics and Astronautics Space Programs and Technologies Conf. Huntsville, Alabama, USA, 1990.
421. *Schneider E., Stilp A.* Meteoroid and debris simulation at Ernst-Mach-Institut: Experimental methods and recent results // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
422. *Whitney J.* Hypervelocity impact tests of shielded and unshielded pressure vessels. Houston, Texas, USA, 1993.
423. *Hanada T., Liou J.-C.* Shape Distribution of Fragments from Microsatellite Impact Tests // Orbital Debris Quarterly News. 2009. V. 13. Iss. 2.
424. *Murakami J. et al.* Microsatellite Impact Tests to Investigate Multilayer Insulation Fragments // Orbital Debris Quarterly News. 2009. V. 13. Iss. 2.
425. *Gehring J.* Engineering considerations in hypervelocity impact // High-Velocity Impact Phenomena / ed. R. Kinslow. N.Y.; L.: Academic Press, 1970.
426. *Boslough V. et al.* Hypervelocity testing of advanced shielding concepts for spacecraft against impacts to 10 km/s // Intern. J. Impact Engineering. 1993. V. 14.
427. *Piekutowski A.* Debris clouds generated by hypervelocity impact of cylindrical projectile with thin aluminum plates // Intern. J. Impact Engineering. 1986. V. 5.
428. *Chhabildas L. et al.* An impact technique to accelerate flier plates to over 12 km/s // Intern. J. Impact Engineering. 1992. V. 14.
429. *Fortov V.* Hypervelocity Impact in Space Debris Problem // Space Debris Workshop. Irvine, California, USA, 1993.
430. *Herrman W., Wilbeck J.* Review of hypervelocity penetration theories // Intern. J. Impact Engineering. 1986. V. 5.
431. *Reimerdes H. et al.* Ballistic limit equations for the Columbus double-bumper shield concept // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
432. *Ryan S., Christiansen E.* A Ballistic Limit Analysis Program for Shielding Against Micrometeoroids and Orbital Debris // 61st Intern. Astronautical Congress (IAC). Prague, Czech Republic, 2010.
433. *Christiansen E.* Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields // Intern. J. Impact Engineering. 1992. V. 14.
434. *Hörz F., Bernhard R.* Compositional Analysis and Classification of Projectile Residues in LDEF Impact Craters. Houston, Texas, USA, 1992.
435. *Вениаминов С. и др.,* О популяции мелкого космического мусора, её влиянии на безопасность космической деятельности и экологию Земли // Космический мусор: фундамент. и практ. аспекты угрозы: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019.
436. *Вениаминов С. и др.* Об опасности мелкого космического мусора // Международ. науч. конф. «Околоземная астрономия 2018». КГУ, Казань, 2018.
437. *Veniaminov S. et al.* The Small Orbital Debris Population and its Impact on Space Activities and Ecological Safety // Acta Astronautica. 2020. V. 176. P. 591–597. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.015>.

438. *Orbital Debris Quarterly News*. 2021. V. 25. Iss. 3.
439. *Hamilton J.* NASA Develops Report on Radar Observations of Small Debris Populations // *Orbital Debris Quarterly News*. 2013. V. 17. Iss. 4. P. 4–5.
440. *Bernhard R.* et al. Analytical electron microscopy of LDEF impactor residues // LDEF 69 Months in Space // 3rd Post-Retrieval Symp. 1993. Pt. 1. P. 401–427.
441. *Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду*. М.: Изд-во ГЕОС, 2016. 795 с.
442. *Liou J.-C.* An Update on Recent Major Breakup Fragments // *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 3. P. 5–6.
443. *Назаренко А. И.* Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013.
444. *Orbital Debris Quarterly News*. 2018. V. 22. Iss. 1. P. 10–11.
445. *Veniaminov S.* et al. Orbital missions safety — A survey of kinetic hazards // *Acta Astronautica*. 2016. V. 126. P. 510–516.
446. *Matney M.* et al. Comparison of the NASA ORDEM 3.1 and ESA MASTER-8 Models // *Orbital Debris Quarterly News*. 2021. V. 25. Iss. 3.
447. *Kessler D.* et al. Orbital Debris Environment for Spacecraft Designed to Operate in LEO. NASA Technical Memorandum. Houston, Texas, USA, 1989.
448. *Christiansen E.* Spacecraft Meteoroid/Debris Protection // Committee on Space Debris Workshop. Irvine, California, USA, 1993.
449. *Swift H.* Hypervelocity impact mechanics. N.Y.: John Wiley and Sons, 1982.
450. *Cour-Palais B.* Hypervelocity impact investigations and meteoroid shielding experience related to Apollo and Skylab. Washington D.C., USA, 1985.
451. *Cour-Palais B.* Hypervelocity impact in metals, glass, and composites // *Intern. J. Impact Engineering*. 1987. V. 5.
452. *Christiansen E., Kerr J.* Mesh double bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and space debris protection // *Intern. J. Impact Engineering*. 1993. V. 14.
453. *Christiansen E.* Shielding Status // 11th Meeting of the IADC. Tsukuba, Japan, 1994.
454. *Cour-Palais B., Crews J.* A multi-shock concept for spacecraft shielding // *Intern. J. Impact Engineering*. 1990. V. 10.
455. *Lambert M.* Space debris shield optimization // 11th Meeting of the IADC. Tsukuba, Japan, 1994.
456. *Foster J., Stansbery G.* Fundamentals of Debris Collision Avoidance // Satellite Operations and Safety Workshop. Westford, Massachusetts, USA, 2003.
457. *Schall W.* Active shielding and reduction of the number of small debris with high power lasers // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
458. *Settecerri T., Beraun J.* Laser debris sweeper for the Space Station Freedom // Proc. 1st European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 1993.
459. *Krisko P.* et al. SBRAM Upgrade to Version 2.0 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2005. V. 9. Iss. 3.
460. *Matney M.* Update of the Satellite Breakup Risk Assessment Model (SBRAM) // *Orbital Debris Quarterly News*. 2000. V. 5. Iss. 3.
461. *Kessler D., Loftus J.* Orbital debris as an energy management problem // 31st Plenary Meeting of the Committee on Space Research (COSPAR). Hamburg, Germany, 1994; Advances in Space Research, 1995.
462. *Loftus J.* et al. Management of the orbital environment // *Acta Astronautica*. 1992. V. 26. Iss. 7.
463. *Liou J.-C., Johnson N.* A Sensitivity Study of the Effectiveness of Active Debris Removal in LEO // 58th Intern. Astronautical Conf. Hyderabad, India, 24–28 Sept. 2007.
464. *Orbital Debris*, 1985.
465. *Petro A., Ashley H.* Cost estimates for removal of orbital debris // *Progress in Astronautics and Aeronautics* / ed. Loftus J. 1989. V. 121.
466. *Veniaminov S.* et al. Some results of testing the new program for searching space objects in deep space // Proc. 4th European Conf. Space Debris. Darmstadt, Germany, 2005.
467. *Liou J.-C., Johnson N.* A Preliminary Active Debris Removal Study // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 4.
468. *Liou J.-C., Johnson N.* A Sensitivity Study of the Effectiveness of Active Debris Removal in LEO // 58th Intern. Astronautical Conference. Hyderabad, India, 24–28 Sept. 2007.
469. *Johnson N., Klinkrad H.* Space Debris Environment Remediation Concepts // Intern. Conf. Orbital Debris Removal. Chantilly, VA, December 2009; *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 2.

470. United Nations Adopts Orbital Debris Report // *Orbital Debris Quarterly News*. 1999. V. 4. Iss. 2. P. 7, 9.
471. United Nations Adopts Space Debris Mitigation Guidelines // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 2. P. 1–2.
472. United Nations Discusses Space Debris and Long-Term Sustainability of Activities in Outer Space // *Orbital Debris Quarterly News*. 2011. V. 15. Iss. 2. <http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/content/news.shtml>.
473. *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 2.
474. *Orbital Debris Quarterly News*. 2022. V. 26. Iss. 1.
475. *Orbital Debris Quarterly News*. 2022. V. 26. Iss. 3.
476. *Orbital Debris Quarterly News*. 2021. V. 25. Iss. 4.
477. *Orbital Debris Quarterly News*. 2022. V. 26. Iss. 2.
478. Сравнение модели НАСА ORDEM 3.1 и модели ЕКА MASTER-8 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2021. V. 25. Iss. 3 С. 2.
479. *Anz-Meador P.* A Review of Space Environment Implications of CubeSat Traffic, 2003–2014 // *Orbital Debris Quarterly News*. 2015. V. 19. Iss. 3. P. 4.
480. *Gates D., Matney M.* SBRAM Update // *Orbital Debris Quarterly News*. 2022. V. 26. Iss. 2.
481. Observation Campaigns, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee // 43rd Session of UNCOPUOS S&T SC, Feb. 2006.
482. Small Satellite Possibly Hit by Even Smaller Object // *Orbital Debris Quarterly News*. 2013. V. 17. Iss. 2.
483. *Адушкин В., Аксенов О., Вениаминов С., Козлов С.* О подходах к оценке потенциальной опасности разрушений и столкновений космических объектов // *Воздушно-космическая сфера; Aerospace Sphere J.* 2018. Т. 1(94). С. 54–63. DOI: 10.30981/2587-7992-2018-94-1-54-63.
484. *Veniaminov S., Adushkin V., Kozlov S.I., Tyurenkova V.V.* The small orbital debris population and its impact on space activities and ecological safety // *Acta Astronautica*. 2020. V. 176. P. 591–597. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.015>.
476. *Orbital Debris Quarterly News*. 2022. V. 26. Iss. 4.

Книга издана в авторской редакции

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Подписано в печать __.01.2023

Формат 70×100/16

Усл. печ.-л. 16,58

Тираж 150

Заказ 4201