

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С.А. ЕСЕНИНА

А. К. Муртазов

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭКОЛОГИИ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА**

Допущено УМО по классическому университетскому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 010702.65 - Астрономия

РЯЗАНЬ-2008

Рецензенты

- А.С. Расторгуев - профессор кафедры экспериментальной астрономии Московского Государственного Университета им. М.В.Ломоносова, доктор физико-математических наук,
- А.Е. Кузнецов - заместитель директора НИИ обработки аэрокосмических изображений Рязанского радиотехнического университета им. А.С. Попова доктор технических наук, профессор,
- Н.И. Перов - доцент кафедры физики Ярославского государственного педагогического университета им. К.Д. Ушинского кандидат физико-математических наук

Муртазов Андрей Константинович

Физические основы экологии околоземного пространства.

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения общих положений новой, сформировавшейся в последние 20 лет фундаментальной науки.

Рассмотрены и проанализированы физические процессы, происходящие в глобальной окружающей биосферу среде - околоземном космическом пространстве.

Подробно освещены вопросы «космической опасности» для человечества и перспективные методы ее преодоления, представлен анализ современных методов экологического мониторинга состояния ОКП и его изменения при естественных и техногенных воздействиях, проведен анализ современного состояния проблемы охраны и рационального использования ОКП как экологической ниши техногенной цивилизации.

Может быть использовано для обучения студентов университетов естественнонаучных специальностей, в частности, «Физика», «Геофизика», «Астрофизика», «Физика Земли и планет», «Экология».

Учебное пособие также может оказаться интересным и полезным для читателей, интересующихся вопросами физики Земли и Вселенной, глобальной экологией и ее ролью в расширении в околоземное пространство ниши человеческой цивилизации.

Содержание

Предисловие

Предмет и задачи экологии околоземного космического пространства

Глава I. Околоземное космическое пространство как глобальная составляющая окружающей среды

- 1.1. Поля и заряженные частицы в околоземном пространстве
 - 1.1.1. Геомагнитное поле
 - 1.1.2. Верхняя атмосфера и ионосфера
 - 1.1.3. Магнитосфера
 - 1.1.4. Сравнительные характеристики магнитосфер планет Солнечной системы
- 1.2. Внешняя часть околоземного космического пространства

Глава II. Осколки естественных космических тел и техногенные отходы в околоземном космическом пространстве

- 2.1. Основные источники естественного мусора в ОКП
 - 2.1.1. Астероиды
 - 2.1.2. Кометы
 - 2.1.3. Метеорное вещество
- 2.2. Отходы техногенного происхождения в ОКП

Глава III. Процессы в ОКП и их взаимосвязь с процессами в биосфере – физические основы экологии ОКП

- 3.1. Глобальное воздействие на систему «ОКП-биосфера» источников космического происхождения
 - 3.1.1. Солнце – основной источник глобального воздействия на систему «ОКП-биосфера»
 - 3.1.2. Процессы в ОКП, обусловленные действием космических лучей и жестких электромагнитных излучений
 - 3.1.3. Природа процессов в биосфере, вызванных космическими воздействиями
- 3.2. Техногенное воздействие на физическое состояние ОКП
 - 3.2.1. Общая характеристика антропогенных воздействий на состояние ОКП
 - 3.2.2. Проблема техногенного воздействия на озоновый слой
 - 3.2.3. Воздействие техногенных отходов на состояние ОКП
- 3.3. Воздействие тел естественного происхождения на состояние ОКП и биосферы
 - 3.3.1. Естественный космический мусор и состояние ОКП
 - 3.3.2. Проблема космической опасности для человечества

Глава IV. Мониторинг состояния ОКП

- 4.1. Цели и задачи мониторинга околоземного пространства
- 4.2. Анализ возможностей современных средств мониторинга загрязнения околоземного космического пространства

Глава V. Охрана и рациональное использование ОКП как новой экологической ниши земной цивилизации

- 5.1. Совместная эволюция биосферы и ОКП.
- 5.2. Развитие методов и средств охраны и рационального использования ОКП в процессе его освоения
- 5.3. Современные методы и средства предотвращения «космической опасности» для человечества

Литература

Тематический словарь Экология космоса

Предисловие

К началу XXI в. околоземное космическое пространство (ОКП) стало значительным фактором научного, общественного, коммерческого использования. ОКП представляет собой зону расширения экологической ниши человеческой цивилизации вследствие ее неизбежного техногенного развития, что явилось одним из путей ухода от угрозы глобального экологического кризиса.

Однако, экспоненциального расширения экологической ниши в околоземное пространство не получилось (по крайней мере, в настоящее время его не наблюдается в противовес оптимистичным прогнозам 40-летней давности) во многом именно из-за экологических причин.

Современная цивилизация достигла такого уровня антропогенного воздействия на ближний космос, какого не испытывает ни одна другая среда: ни гидросфера, ни литосфера, ни приземная атмосфера. Освоение этой среды ведется самыми мощными современными средствами. Но околоземное пространство имеет на много порядков меньше, чем биосфера связей, обеспечивающих его устойчивость. Глобальные соотношения по выбросам энергии и вещества здесь значительно превышают подобные соотношения для биосферы.

Техногенные воздействия в ОКП в настоящее время имеют мощность на два порядка меньшую мощности естественных воздействий, однако, ее рост проходит практически по экспоненциальному закону. При таком законе возрастания техногенные воздействия уже в этом веке могут превзойти естественные, что в значительной мере может сказаться на условиях равновесия ОКП. Критическое значение энергетического загрязнения ОКП может составить величину всего ~1% от величины солнечной постоянной. В таком случае действие принципа Ле Шателье-Брауна в ОКП может оказаться нарушенным, и ОКП, выйдя из состояния динамического равновесия, уже в него не вернется. ОКП с новыми параметрами может иметь совершенно иные свойства, что неизвестно каким образом скажется на земной природе.

Это говорит о том, что ОКП является весьма важным показателем техногенного загрязнения окружающей среды с глобальных позиций: там, где биосфера еще способна компенсировать отклонения от равновесия, ОКП уже может заметно потерять устойчивость и изменить свои свойства.

С этих позиций можно дать определение экологии ОКП как научной дисциплины – в целом это наука, изучающая взаимосвязи биосферы в целом и окружающего ее пространства. Естественно, первоочередной задачей экологии ОКП является исследование процессов в ближнем космосе и их зависимости от естественных и техногенных воздействий.

На основе этого определения автором в предлагаемом учебнике подробно рассмотрены состав и структура ОКП, произведено описание его основных физических параметров на основании данных современных исследований. Проанализированы процессы взаимодействия между различными компонентами околоземного пространства, межпланетной среды, составляющие физические основы экологии ОКП. Сюда входят процессы, обусловленные взаимодействием естественных космических и техногенных излучений с веществом и полями ОКП, процессы, сопровождающие загрязнение ОКП продуктами дезинтеграции астрономических тел и отходами техногенной деятельности.

Несомненно, основным источником процессов в ОКП и биосфере является Солнце, дающее подавляющий вклад энергии в систему «ОКП-биосфера». Даже при спокойном состоянии Солнца в периоды минимума его активности вариации как электромагнитного, так и корпускулярного излучения Солнца, взаимодействие межпланетного и геомагнитного полей, воздействие солнечных космических лучей приводят к нестабильным процессам в ОКП, выводящим его из состояния динамического равновесия.

Вследствие этого гелиофизические факторы влияют на ход важных и широко распространенных физико-химических процессов в биосфере, они воздействуют на многие стороны биологических явлений, что и находит отражение в соответствующих изменениях показателей жизнедеятельности большинства живых организмов.

Весьма важным параметром, характеризующим общее состояние ОКП, является его загрязнение космическим мусором естественного и техногенного происхождения.

Одним из последствий появления осколков небесных тел в ОКП является явление, называемое космической опасностью: возможность соударения Земли с астероидом, метеороидом или ядром кометы. Воздействия на биосферу после такого соударения могут принять глобальные масштабы и оказаться катастрофическими для человеческой цивилизации. Примером такого воздействия является соударение кометы Шумейкеров-Леви с Юпитером

Однако основной проблемой является в настоящее время проблема техногенного загрязнения ОКП. В общем виде это: загрязнение природной среды и ОКП вредными продуктами сгорания ракетного топлива и его несгоревшими остатками; загрязнение ионосферы при запусках космической техники; космический мусор в ОКП; падение техногенных отходов на Землю; электромагнитные излучения различных передатчиков и линий передачи электроэнергии на Земле; взрывы ядерных зарядов, общая радиоактивность; техногенные катастрофы; взаимодействие ОКП с собственной атмосферой космических аппаратов; последствия аварий и столкновений космической техники в ОКП.

При выборе параметров, характеризующих техногенные воздействия, можно выделить две группы. К первой относятся концентрации компонентов, непосредственно загрязняющих ближний космос. Эти компоненты поступают в околоземное пространство в результате производственной деятельности человека (фреоны, окислы азота, хлора, изотопы радиоактивных элементов и др.), а также в результате запусков ракетно-космических систем. Сюда же относятся электромагнитные излучения техногенного происхождения, изменяющие состояние ионосферы и магнитосферы Земли. Ко второй группе относятся параметры, характеризующие состояние верхней атмосферы, ионосферы, магнитосферы, претерпевающие значительные изменения в результате техногенного воздействия, что в результате обратных связей воздействует на природу планеты.

Причем следует отметить, что если вероятность столкновения Земли с крупными небесными телами в процессе эволюции Солнечной системы уменьшается, то интенсивность техногенных воздействий с развитием цивилизации и ее деятельности по освоению ОКП заметно возрастает.

Таким образом, околоземное космическое пространство как глобальная составляющая окружающей биосферу среды, является многокомпонентной динамической системой со сложным образом изменяющимися параметрами, состояние которой во многом определяет процессы в самой биосфере.

В связи с этим ОКП внесено в закон РФ «Об охране окружающей среды» 2002г. (статья 4. Объекты охраны окружающей среды) как объект охраны.

С выходом человечества за пределы биосферы вопросы контроля состояния ОКП приобретают особое значение. Разработка методов охраны и рационального использования ОКП должна базироваться, по мнению автора, на исследованиях в рамках его экологии и может явиться одной из важнейших научных, технических и даже этических проблем третьего тысячелетия. Здесь, в заключение, можно выделить ряд моментов:

- на современном этапе весьма важной является задача определения предельно допустимых техногенных воздействий на ОКП и в дальнейшем их контроля;
- методы охраны и рационального использования ОКП не должны использовать технологии, вредно воздействующие на ОКП и биосферу;

- они должны быть направлены на снижение засоренности как ОКП, так и биосферы;
- применяемые в будущем методы охраны и рационального использования ОКП не должны энергетически превышать предел, выше которого ОКП не сможет вернуться к первоначальному устойчивому (или какому-либо устойчивому, но несколько отличающемуся по параметрам от первоначального) состоянию.

Такой подход определил в итоге структуру настоящей книги. 1. Физические основы экологии ОКП: анализ физических процессов в ОКП, обусловленных различными факторами естественного и техногенного происхождения; исследования воздействий техногенных и естественных процессов на состояние ОКП, реакцию последнего на них и далее обратного воздействия на биосферу. 2. Современные методы мониторинга состояния ОКП как средство изучения процессов в нем и ОКП с биосферой. 3. Анализ совместной эволюции Земли и основных параметров ОКП. 4. Актуальность проблемы охраны и рационального использования ОКП в свете вопросов экологии (включая достаточно экзотический вопрос о расширении экологической ниши человеческой цивилизации).

Естественно, многообразие процессов в ближнем космосе обуславливает и многообразие методов их исследования. Это, в свою очередь, предполагает разнообразный, междисциплинарный подход к изучению экологии ОКП, а также владение аппаратом и сведениями из многих естественных наук.

Автор глубоко признателен академику Российской академии образования, профессору А.П. Лиферову, благодаря инициативе и поддержке которого были начаты и выполнены исследования, которые привели к написанию этой книги.

Предмет и задачи экологии околоземного космического пространства

Экология – область знания, изучающая условия существования организмов и их связей с окружающей средой, изначально развивалась как составная часть биологической науки. В последние несколько десятилетий она превращается в междисциплинарную науку, изучающую различные аспекты взаимодействия человеческого сообщества с окружающей средой, что отражается в развитии целого ряда направлений экологии, таких например, как инженерная экология, математическая экология и т.д.

В связи с выходом человечества в космическое пространство появилась потребность расширения понятия окружающей среды, которая до сих пор определялась в основном как ближайшая среда обитания и производственной деятельности человека – водный и воздушный бассейны, почва, недра, а также создаваемая самим человеком техногенная среда.

В учении о биосфере по В.И. Вернадскому, явившемся общей мировоззренческой основой всего естествознания XX века, биосферно-космической картиной мира, биосфера Земли рассматривается как единая глобальная экосистема. Естественно, окружающей средой для такой экосистемы является околоземное космическое пространство – ОКП (Муртазов, 2004б).

В начале третьего тысячелетия сформировалась область знания, изучающая условия существования биосферы (включающей, естественно, техносферу) во взаимодействии с околоземным космическим пространством – экология ОКП.

В общем случае экология как наука является биологическим направлением естествознания. Ее задача заключается в установлении причин и условий возникновения и развития биосферных систем различного уровня сложности, изучение устойчивости этих систем. Экология в этом случае понимается как наука, изучающая процессы самоорганизации и эволюции систем в живой и неживой природе, базирующиеся на фундаментальных физических принципах (Трухин и др., 2005).

Давая определение экологии ОКП как науки, следует отметить, что экология на современной стадии своего развития является наукой, призванной объединить, синтезировать совокупность научных знаний о биосфере на основе изучения физических процессов в окружающей среде. С другой стороны, экология как наука в широком смысле изучает взаимосвязи между биотой и окружающей ее средой, устанавливая на основе своих исследований такие пределы воздействия окружающей среды на организмы, ниже которых она не нарушает функций последних. Таким образом, все другие «экологии» (физическая, химическая, военная и т.д.) – это науки, изучающие своими методами процессы в окружающей среде и механизмы их воздействия на биологические организмы.

Под экологией ОКП часто также понимают не процессы, а просто материальное загрязнение ближнего космоса. На самом деле, задача экологии ОКП – исследование процессов, происходящих под действием этих загрязнений (наряду с изучением естественных процессов) и воздействия процессов в ОКП на биосферу.

Отсюда следует, что под экологией ОКП можно понимать комплексную науку о физических процессах в ближнем космосе, определяющих его состояние и эволюцию, а также механизмах их воздействия на биосферу. С какой-то точки зрения экологию ОКП можно рассматривать как один из разделов прикладной экологии.

Поскольку предметом экологии как фундаментальной естественной науки является совокупность или структура связей между организмами и средой (Коробкин, Передельский, 2000), экология ОКП должна исследовать многочисленные связи околоземного пространства с биосферой. А это подразумевает многостороннее исследование процессов в ОКП.

Таким образом, предметом экологии ОКП являются: а) его физическое состояние и процессы, происходящие в нем под действием различных, обуславливающих это состояние, факторов; б) связь процессов в ОКП с процессами в биосфере.

1. Физическое состояние ОКП весьма тесно связано с воздействиями на него Солнца.

2. Немаловажную роль на процессы в ОКП и биосфере играют космические лучи высоких энергий, приходящие из галактической среды.

3. Взаимодействие ОКП с межпланетной пылью, веществом комет, метеорами, мини-кометами и т.д. оказывает как прямое, так и опосредованное влияние на состояние ОКП и биосферы. Кардинальным образом изменить состояние ОКП и биосферы может взаимодействие их с космическими телами достаточно крупных размеров.

4. Процессы, возникающие в ОКП в результате техногенных воздействий различных видов, нарушают его равновесие. К ним можно отнести различные виды техногенных излучений, искусственные космические объекты и техногенный мусор, остатки ракетного топлива и т.д.

Весьма актуальным является вопрос об устойчивости ОКП под влиянием естественных и техногенных воздействий, тесно связанный с наличием в ОКП обратных связей, способных компенсировать эти воздействия и вернуть его в состояние динамического равновесия. Биосфера имеет информационную емкость, на двадцать порядков превосходящую информационную емкость неживой окружающей среды, и примерно на такой же порядок большее количество обратных связей, обусловленных наличием биоты. Следовательно, для необратимого выхода ОКП из состояния равновесия требуется значительно меньшая энергия воздействия на него.

Виды основных воздействий, определяющих процессы в ОКП, его структуру и взаимодействие с биосферой, приведены на рис. 1.1.

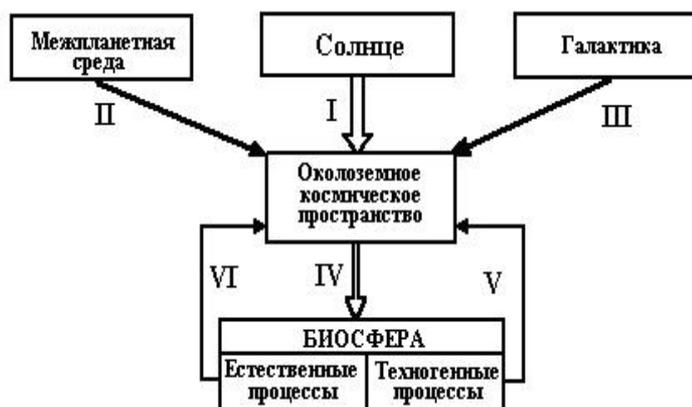


Рис. 1.1. Основные связи и взаимодействия околоземного космического пространства. Связи V и VI – прямые и обратные воздействия био- и техносферы на ОКП

В связи даже с кратким определением предмета экологии ОКП задачи, стоящие перед ней, весьма разнообразны.

Фундаментальные:

- разработка общей теории состояния и устойчивости ОКП;

- исследование процессов в ОКП, которые происходят под действием как внутренних, так и внешних естественных и антропогенных воздействий, и всего комплекса вытекающих отсюда взаимодействий, воздействий процессов в ОКП на процессы в биосфере (и наоборот), что составляет физические основы экологии ОКП (Муртазов, 2004б, 2005);

- определение уровней воздействия на ОКП, превышение которых может необратимо вывести его из состояния динамического равновесия и изменить ход процессов в биосфере;

- общий прогноз состояния ОКП и параметров биосферы, зависящих от этого состояния.

Прикладные:

- мониторинг состояния ОКП; контроль естественных и техногенных уровней воздействия на ОКП;

- моделирование состояния ОКП и глобальных биосферных процессов, связанных с этим состоянием:

- прогноз состояния ОКП;

- выработка рекомендаций по ограничению техногенного воздействия на ОКП в свете его охраны и рационального использования.

Стратегическая задача экологии ОКП видится автору в разработке теории взаимодействия биосферы и ОКП в процессе расширения экологической ниши техногенной цивилизации, которое уже началось с выходом человечества в космическое пространство.

Таким образом, экология околоземного космического пространства представляет собой фундаментальную науку, охватывающую практически весь комплекс взаимоотношений биосферы с окружающей средой и опирающуюся на исследования в области максимально возможного спектра наук, как естественных (физика, химия, биология, география, геология и т.д.), так и в итоге гуманитарных, социальных и экономических.

ГЛАВА I

Околосреднее космическое пространство как глобальная составляющая окружающей среды

Околосреднее космическое пространство (ОКП) представляет собой глобальную окружающую биосферу нашей планеты среду. Зону его действия современные авторы определяют по-разному, в зависимости от решаемых ими задач. Многие исследователи считают, что ОКП можно продлить до границы сферы действия Земли (930 тыс. км) или даже до орбит ближайших планет: Венеры и Марса. Чаще всего – это область от слоев нейтральной земной атмосферы (точнее, нижних орбит зоны пилотируемой космонавтики ~ 160-200 км - Левантовский, 1974) вплоть до лунной орбиты.

Автор при обсуждении вопросов экологии ОКП в этой книге ограничивает область пространства, занимаемую ОКП, озоновым слоем снизу (~25 км) и согласно ГОСТ 25645.103-84 орбитой Луны (~4*10⁵ км) сверху общим объемом до 10¹⁸ км³, поскольку процессы, протекающие именно здесь, оказывают определяющее влияние на живые организмы Земли, биосферу в целом.

То есть, говоря языком геоэкологии, ОКП представляет собой среду, лишенную биологических объектов, включающую в себя парабиосферу в качестве нижней границы и артебиосферу – зону экспансии цивилизации в космос (Степановских, 2000).

В состав ОКП входят верхние слои атмосферы, ионосфера, магнитосфера с радиационными поясами, зоны нахождения отходов естественного и техногенного происхождения. Его пронизывают гравитационные, геомагнитное, геоэлектрическое и межпланетные магнитные поля, солнечный ветер, потоки заряженных частиц солнечного и галактического происхождения. В ОКП попадают кометы, мини-кометы, астероиды и их осколки, метеорные потоки, межпланетная космическая пыль и т.д. Взаимодействие компонентов ОКП между собой вызывает сложные обменные процессы, оказывающие как непосредственное, так и опосредованное влияние на биосферу Земли, воздействуя в той или иной степени на ход физических, биологических, эволюционных процессов в живой и неживой природе.

Несомненно, главным поставщиком энергии в ОКП является Солнце, под воздействием которого происходит подавляющее число процессов в системе Земля-ОКП.

Температуру T планеты, вращающейся вокруг звезды с температурой фотосферы T_* , в общем случае можно определить как

$$T = \left(\frac{3\pi}{8G\rho}\right)^{\frac{1}{6}} * (1 - A)^{\frac{1}{4}} * P^{-\frac{1}{3}} * T_*, \quad (1.1)$$

где A – альbedo планеты, P – ее средний период обращения вокруг звезды, $\bar{\rho}$ – средняя плотность звезды.

Мощность солнечного излучения, падающего на Землю, составляет $\pi R_3^2 I_0 = 1,7 * 10^{17}$ Вт, где $I_0 = (1367 \pm 3)$ Вт/м² – где I – солнечная постоянная; R_3 – радиус Земли.

Солнечная постоянная является основным физическим параметром, характеризующим поступление солнечной энергии на Землю и в ОКП. Зная ее можно модифицировать выражение (1.1) в уравнение радиационного баланса, являющееся основным уравнением термодинамики земной биосферы и окружающего ее пространства:

$$\sigma T^4 = \frac{1}{4} (1 - A) * I_0, \quad (1.2)$$

где $\sigma = 5,67 * 10^{-8}$ Вт*м⁻²*К⁻⁴ – постоянная Стефана-Больцмана.

Альbedo Земли составляет 0,30-0,36. Оставшееся излучение поглощается атмосферой и поверхностью. Поток солнечного излучения у поверхности Земли на единицу ее площади составляет в среднем $\varepsilon = 240$ Вт/м².

Таким образом, из (1.2), в отсутствии атмосферы температура Земли составляла бы 255К или -18°C . Однако, реальная средняя температура Земли составляет 288К (15°C) и обусловлена парниковым эффектом, доля которого составляет соответственно 150-160 Вт/м² (Будыко, 1978).

Принято считать, что существующее среднее распределение падающей на Землю солнечной энергии по различным генерируемым им макроскопическим процессам в ОКП и на планете совместно с заданием видов и частоты всех встречающихся флуктуаций определяют как состояние ОКП, так и климат Земли в целом (Горшков, 1995). Причем, это относится к широкому диапазону излучения Солнца – от рентгеновского излучения до радиоволн (рис. 1.2).

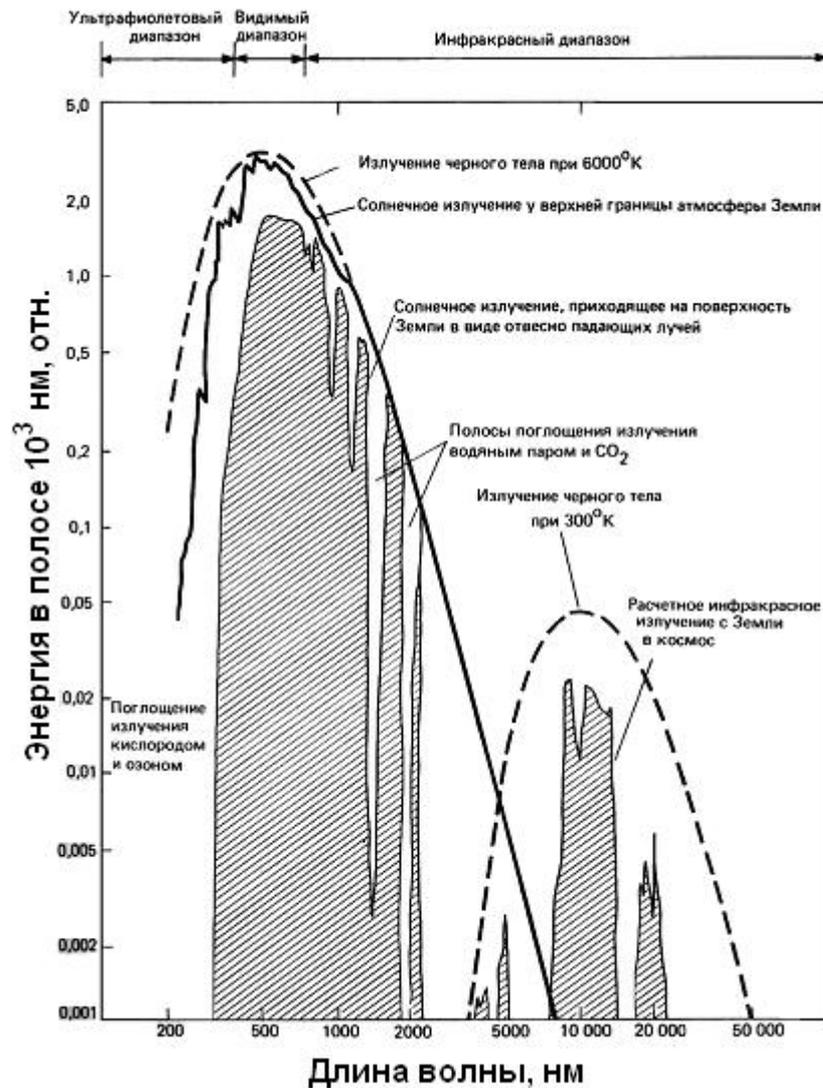


Рис. 1.2. Электромагнитное излучение Солнца, приходящее к Земле и попадающее на ее поверхность в сравнении с инфракрасным излучением Земли. Все эти потоки проходят через ОКП

1.1. Поля и заряженные частицы в околоземном пространстве

1.1.1. Геомагнитное поле

Геомагнитное поле в целом состоит из нескольких полей:

$$T = H_0 + H_M + H_a + H_B + \delta H. \quad (1.3)$$

Здесь H_0 – напряженность дипольного поля, создаваемая однородной намагниченностью земного шара, H_M – напряженность недипольного, или материкового, поля, создаваемого внутренними причинами, обусловленными неоднородностью глубинных слоев Земли, H_a – напряженность аномального поля, создаваемая различной намагниченностью верхних слоев земной коры, H_B – напряженность поля от внешних источников, δH – напряженность поля внешних вариаций.

Сумма полей H_0+H_M образует главное магнитное поле Земли.

Геомагнитное поле в первом приближении эквивалентно полю диполя с магнитным моментом $M_3=8,8*10^{22} \text{ A}\cdot\text{м}^2$ в центре Земли (центральный диполь). Этот эквивалентный диполь представляет поле более точно, если ось диполя смещена на 540 км (2000 г.) от центра Земли в сторону Тихого океана (эксцентричный диполь). Точки, в которых ось диполя пересекает земную поверхность, являются геомагнитными полюсами. Положение геомагнитных полюсов отличается от положения истинных магнитных полюсов, в которых истинное магнитное наклонение равно 90° . Сейчас ось земного диполя наклонена к оси вращения Земли на 10° и пересекает земную поверхность в точке с координатами $79^\circ 32'$ с.ш. и $71^\circ 34'$ з.д. (модель IGRF-2000) в Гренландии (южный геомагнитный полюс).

Проблема происхождения магнитного поля Земли до настоящего времени не может считаться окончательно решенной, хотя почти общепризнанной является гипотеза магнитного гидродинамо, основанная на признании существования жидкого внешнего ядра на глубинах 2900 км – 5120 км. Тепловая конвекция во внешнем ядре способствует образованию кольцевых электрических токов. Скорость перемещения вещества в верхней части жидкого ядра будет несколько меньше, а нижних слоев - больше относительно мантии в первом случае и твердого ядра - во втором. Подобные медленные течения вызывают формирование кольцеобразных (тороидальных) замкнутых по форме электрических полей, не выходящих за пределы ядра. Благодаря взаимодействию тороидальных электрических полей с конвективными течениями во внешнем ядре и генерируется магнитное поле дипольного характера.

Для описания геомагнитного поля Гауссом (1839) впервые был произведен его анализ: в связи со сферичностью Земли все геополя разлагаются по сферическим функциям. Этот анализ дал компоненты разной мультипольности – дипольное поле, квадрупольное поле и компоненты высшей мультипольности. Оказалось, что дипольное геомагнитное поле по величине на порядок превосходит поля высшей мультипольности.

Таким образом, геомагнитное поле определяется путем разложения магнитного потенциала W по сферическим функциям

$$W = R_3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_3}{r}\right)^{n+1} \{g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda\} P_n^m(\cos \theta) \quad (1.4)$$

где R_3 - радиус Земли,

r - расстояние от центра Земли, в котором помещено начало сферических координат,

θ - полярное расстояние,

λ - восточная долгота,

g_n^m и h_n^m - коэффициенты Гаусса

P_n^m - присоединенные полиномы Лежандра - полиномы n -го порядка относительно $\cos\theta$ и $\sin\theta$.

Коэффициенты g_n^m и h_n^m измеряются в тех же единицах, что и напряженность магнитного поля – «Гаусс» (Гс) в СГС. В земном и космическом магнетизме употребляется единица «гамма» (γ), $1\gamma=10^{-3}\text{Гс}$. Величины g_n^m и h_n^m испытывают небольшие вековые вариации. Первые коэффициенты ряда (1) можно наглядно интерпретировать. Пусть в центре Земли вдоль полярной оси z расположен магнитный диполь M . В произвольной точке P вектор M создает магнитный потенциал $W=M\cdot r/r^3$. В рассматриваемом случае $M=(0, 0, M_z)$, тогда

$$W = \frac{M_z}{r^2} \cos\theta = \frac{M_z}{r^2} (\cos\theta). \quad (1.5)$$

Полагая в (1) и (2) $r=R_3$ и сравнивая оба выражения, найдем $g_1^0 = M_z/R_3^3$. Аналогично коэффициенты g_1^1 и h_1^1 выражаются через компоненты магнитного диполя M_x и M_y как $g_1^1 = M_x/R_3^3, h_1^1 = M_y/R_3^3$. Следовательно, первая сферическая гармоника геомагнитного поля эквивалентна полю магнитного диполя, расположенного в центре Земли, причем величина магнитного момента диполя равна

$$M = R_3^3 \{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2\}^{1/2}, \quad (1.6)$$

а направление диполя определяется углами θ_0 и λ_0 :

$$\text{tg}\theta_0 = (g_1^0)^{-1} \{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2\}^{1/2}, \quad \text{tg}\lambda_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1}. \quad (1.7)$$

Отметим, что если диполь расположить не в начале координат, а в некоторой точке r_0 (x_0, y_0, z_0), то координаты r_0 могут быть определены как через дипольные ($n=1$), так и через квадрупольные ($n=2$) компоненты поля. Соответствующая геометрическая конфигурация называется эксцентрическим диполем. Центр земного магнитного диполя смещен относительно центра планеты на $r_0 = 0,07R_3$.

Полный вектор напряженности B_m и составляющие геомагнитного поля определяются как (рис. 1.3)

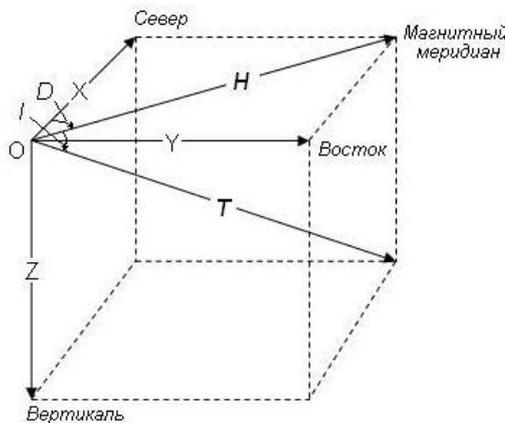


Рис. 1.3. Геомагнитная система координат

$$T = M_3 * \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi} / 4\pi r^3, \quad (1.8)$$

$$Z = M_3 * \sin \varphi / 2\pi r^3, \quad H = M_3 * \cos \varphi / 4\pi r^3, \quad \operatorname{tg} D = \frac{Y}{X}, \quad \operatorname{tg} I = \frac{Z}{H}, \quad (1.9)$$

где H , X , Y , Z – горизонтальная, северная, восточная и южная составляющие

D и I – соответственно магнитные склонение и наклонение.

Значения составляющих геомагнитного поля: горизонтальная составляющая на экваторе $H=0,31$ Гс, вертикальная на северном геомагнитном полюсе $Z=0,58$ Гс, вертикальная на южном геомагнитном полюсе - $Z=0,68$ Гс, за среднее принято значение $\sim 0,4$ Гс (Аллен, 1977).

Магнитный момент диполя изменяется со временем и в течение последнего столетия систематически уменьшается, составляя приблизительно

$$M_3 = (8,27 - 0,003951 * t) * 10^{15} \text{ Тл} * \text{м}^3, \quad (1.10)$$

где t – время в годах с 1900.0.

Если бы закон изменения магнитного момента сохранялся, то к 3991 г. M_3 стал бы равным нулю (Акасофу, Чепмен, 1975). Однако в последнюю четверть XX века коэффициент перед t вырос до 0,006, что сокращает время обнуления M_3 на 700-800 лет (Дьяченко, 2003).

Вместе с тем археомагнитные и палеомагнитные исследования показали, что с течением времени величина поля магнитного диполя изменяется около некоторого среднего значения, близкого к современному (Акасофу, Чепмен, 1975; Жарков, 1983).

В разные геологические эпохи геомагнитное поле имело разную полярность: переполусовка его происходила с периодом от сотен тысяч до десятков миллионов лет. Причем, в настоящее время скорость южного (то есть находящегося в северном полушарии) истинного геомагнитного полюса резко возросла до (51 км/год в 2001 г.). Его движение происходит через северный географический полюс по направлению к Восточно-Сибирской магнитной аномалии, что и является, по мнению некоторых авторов, прямым признаком переполусовки общепланетарного поля (Дмитриев А.Н., 1995).

Так в новейшее геологическое время продолжительности эпох одной полярности составляла в среднем $\sim 2 * 10^5$ лет. В более древние геологические времена эти периоды достигали $10^6 - 10^7$ лет, что дало возможность составить геомагнитную хронологическую шкалу на последние 160 млн. лет (Жарков, 1983). Ее расширение представляет собой как одну из фундаментальных проблем геофизики, так и весьма важную проблему экологии ОКП.

Вместе с тем, есть мнение, что Земля прошла локальный максимум величины магнитного момента, которая теперь возвращается к своему среднему «мезозойскому дипольному минимуму» (Дьяченко, 2003).

Основное геомагнитное поле в ОКП на высотах до трех радиусов Земли сохраняет дипольный характер (несколько искажаясь под влиянием магнитных аномалий), вклад недипольных компонент убывает с расстоянием от планеты. В целом оно испытывает лишь вековые вариации и уменьшается медленнее, чем r^{-3} (хотя и не как r^{-2}). Затем его структура усложняется. При переходе магнитопаузы на расстоянии около 10 земных радиусов напряженность геомагнитного поля резко падает до $\sim 0,004$ А/м (Мишон, 1996)

Переменная составляющая геомагнитного поля ($\sim 1\%$), порождаемая токами в магнитосфере и ионосфере, более неустойчива. Здесь наблюдаются периодические солнечно-суточные и лунно-суточные магнитные вариации.

Прогноз состояния геомагнитного поля весьма важен с точки зрения экологии ОКП, поскольку оно определяет параметры взаимодействия ОКП с межпланетным полем,

солнечным ветром и т.д. В конечном итоге состояние геомагнитного поля определяет степень воздействия ОКП на земную биосферу.

Таким образом, основные свойства геомагнитного поля, известные на современном этапе, следующие (Трухин и др., 2005):

- в первом приближении главное поле является полем центрального наклоненного к оси вращения Земли магнитного диполя;

- напряженность поля изменяется в среднем от $35 \cdot 10^3$ нТл на экваторе до $65 \cdot 10^3$ нТл на полюсах;

- магнитный момент земного диполя приблизительно равен $8 \cdot 10^{22}$ А*м²;

- главному полю присущи вековые вариации, имеющие дискретный спектр с определенным набором периодов колебаний. Имеет место западный дрейф недипольной части главного поля;

- главное поле иногда меняет свою полярность – происходят инверсии геомагнитного поля через характерные периоды $10^5 - 10^6$ лет (косвенный результат, полученный по палеомагнитным данным).

Электрическое поле Земли ввиду несферичности планеты проникает и в ОКП. Оно имеет меняющиеся со временем составляющие. Изменения вызваны, в основном, приливными воздействиями Луны и Солнца, то есть имеют суточные вариации. Его роль в процессах, протекающих в ОКП, изучена пока еще не столь подробно, как роль геомагнитного поля.

1.1.2. Верхняя атмосфера и ионосфера

Классификация различных зон атмосферы проводится на основании распределения с высотой температуры, поскольку оно отражает баланс основных энергетических процессов. Нижняя граница околоземного пространства попадает в район термосферы, где температура еще продолжает быстро повышаться вследствие, главным образом, поглощения солнечного коротковолнового излучения. Выше 300 км в термопаузе поглощение солнечного излучения столь незначительно, что интенсивность его излучения практически не изменяется с высотой. В термопаузе разогрев верхней атмосферы наблюдается, главным образом, во время полярных сияний и магнитных бурь (до 2000-3000 К).

Обнаружено изменение плотности верхних слоев атмосферы и колебания их температуры в зависимости от солнечной активности и времени года (летом в дневные часы плотность на высоте 200 км в 20 раз больше, чем зимой ночью), а также широты (плотность в полярных районах в 5 раз больше, чем вблизи экватора на той же высоте).

Уравнение гидростатического равновесия для нижних слоев атмосферы имеет вид

$$\frac{dp}{dh} = -\rho g, \quad (1.11)$$

Откуда

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\bar{\mu}g}{kT} dh = -\frac{1}{H} dh, \quad \text{где } H = \frac{kT}{\bar{\mu}g}. \quad (1.12)$$

Здесь p – давление, h – высота, $\bar{\mu}$ и ρ – средняя молекулярная масса и плотность атмосферы ($= n\bar{\mu}$), g – ускорение силы тяжести, k – постоянная Больцмана, H – шкала высот. При постоянной T величина H также постоянна, исключая небольшое изменение с высотой в связи с убыванием g (а в гетеросфере и с $\bar{\mu}$). Интегрирование (1.12) при $H=const$ дает так называемую барометрическую формулу

$$p = p_0 e^{-\frac{h}{H}}, \quad \rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}}. \quad (1.13)$$

Выше мезопаузы (~85 км) состав атмосферы меняется в результате фотохимических реакций, так что μ уменьшается; вследствие этого H растет с высотой. В этих условиях каждая составляющая распределяется по высоте в соответствии с характерной для нее шкалой высот, которая определяется из соотношений

$$H_1 = \frac{kT}{m_1 g}, \quad H_2 = \frac{kT}{m_2 g}, \quad H_3 = \frac{kT}{m_3 g}, \dots \quad (1.14)$$

Шкала высот для молекулярного и атомарного водорода поэтому в 16 раз больше, чем для молекулярного и атомарного кислорода.

На высотах больше нескольких сотен км становится существенным изменение g :

$$g = g_0 \left(\frac{R_3 + h_0}{R_3 + h} \right)^2, \quad (1.15)$$

где g_0 – величина g на высоте h_0 .

Поэтому для каждой газовой составляющей атмосферы, где можно пренебречь медленными вариациями T , справедливо соотношение

$$\frac{dp_i}{p_i} = \frac{d\rho_i}{\rho_i} = -\frac{m_i g_0}{kT} \left(\frac{R_3 + h_0}{R_3 + h} \right)^2 dh \quad (1.16)$$

и

$$p_i = p_0 \exp \left\{ -\frac{m_i g_0}{kT} \frac{(R_3 + h_0)}{(R_3 + h)} (h_0 - h) \right\}, \quad (1.17)$$

$$\rho_i = \rho_0 \exp \left\{ -\frac{m_i g_0}{kT} \frac{(R_3 + h_0)}{(R_3 + h)} (h_0 - h) \right\}, \quad (1.18)$$

Легкие компоненты – атомарные водород, гелий и кислород – имеют большие шкалы высот, а потому простираются на большие высоты. В результате концентрация тяжелых атомов убывает быстрее, чем легких, и верхняя атмосфера сначала становится преимущественно атомарно кислородной, далее гелиевой (гелиосфера), а затем выше 1000-2000 км – водородной. Протяженная водородная экзосфера Земли, распространяющаяся до высот порядка 10^5 км, образует геокорону. Взаимные соударения частиц здесь редки и они движутся преимущественно под действием силы земного тяготения. Здесь часть нейтральных атомов водорода поглощает и переизлучает солнечное излучение в линиях L_α и L_β .

Ионосфера.

Слои атмосферы, в которых происходит ионизация газов под действием коротковолнового солнечного излучения, образуют ионосферу. Систематическое зондирование показывает зависимость здесь электронной концентрации от солнечной активности, в течение светового дня она меняется пропорционально косинусу зенитного расстояния Солнца ($\cos Z$) для наблюдения на земной поверхности

Область D ионосферы ($h \approx 60-90$ км) обладает слабой ионизацией и малой концентрацией заряженных частиц. Здесь ионизация в основном происходит за счет рентгеновского излучения Солнца, а также слабых дополнительных источников: космических лучей, метеоров, заряженных частиц магнитосферного происхождения. Ночью ионизация в этом слое резко уменьшается.

Область E ($h \approx 90-120$ км) характеризуется ростом концентрации электронов с высотой в дневное время, связанным с действием коротковолнового солнечного излучения. Доминирующую роль здесь играет ионизация молекул кислорода O_2 . Ионизация в этом слое обусловлена излучением парой линий из области дальнего ультрафиолета (97,7 и 102,6 нм). Максимум дневной ионизации на высоте порядка 110 км оказывает значительное влияние на распространение средних и коротких радиоволн,

отражающихся от этого слоя. Здесь ночью ионизация также снижается, но число электронов остается не меньше $n_e \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$. Это связано с тем, что процессы рекомбинации не успевают охватить все долгоживущие ионы, а какое-то количество ионов поступает из слоя F . Определенную роль в ночной ионизации слоя E играют: поглощение рассеянного геокороной излучения Солнца в линии L_α ; метеорная ионизация; космические лучи. Максимум ионообразования под действием солнечного излучения располагается на высотах 150-200 км.

Область F начинается несколько ниже, примерно от 140 км. Максимальное количество ионов и электронов располагается вследствие диффузии выше или ниже зоны ионообразования, то есть в области F этот максимум приходится на высоты 250-400 км. В дневное время вследствие воздействия солнечного излучения на высотах 150-200 км образуется дополнительный максимум количества заряженных частиц – область F_1 . Вышележащая область F_2 характеризуется образованием более легких ионов: O^+ на высотах 400-1000 км, а выше – ионов водорода и гелия. Вообще, космические исследования показали, что в ионосфере не существует отдельных слоев, а электронная концентрация более менее плавно изменяется между основными максимумами. Поэтому точнее говорить не об отдельных слоях, а областях ионосферы (Иванов-Холодный, 2000; Куликовский, 2002). В среднем слой D имеет концентрацию 10^4 электронов/см³, слой E – 10^5 см^{-3} , слой F_1 – $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, слой F_2 – 10^6 см^{-3} (рис. 1.4).

Давно было известно, что на процессы ионизации ионосферы влияет солнечная активность. После создания современной аэрономической теории удастся объяснить многие аспекты поведения ионизации ионосферы на разных высотах. При этом важно учитывать две причины (Иванов-Холодный, 2000). Первая из них связана с изменением поглощательной способности верхней атмосферы для УФ-излучения разных частей спектра. В результате этого ионизация в слоях F_1 , F_2 обусловлена менее проникающей их частью. В нижней ионосфере, в слое E , ионизацию вызывает более короткое и жесткое УФ-излучение, которое в течение солнечного цикла изменяется меньше. Другая причина связана с тем, что с высотой величина геофизического эффекта вариаций плотности и молекулярного состава атмосферы меняется с изменением солнечной активности. Благодаря этому при переходе от максимума к минимуму солнечного цикла эффект ионизации, характеризуемый квадратом электронной концентрации, в областях E и F_1 изменяется в соответствии с изменением потока, создающего эти слои. В то же время в области F_2 с усилением солнечной активности возрастание электронной концентрации вызвано не только увеличением потока излучения, но и изменением плотности и состава атмосферы. Теория образования области F_2 должна принципиально отличаться от областей E и F_1 . Это различие вызывается наложением геофизического эффекта на процесс ионизации в слое F_2 . Значительный рост ионизации в этом слое обусловлен тем, что с увеличением уровня солнечной активности на высоте около 300 км заметно возрастают плотность и температура атмосферы. Это приводит к увеличению высоты слоя и вызывает дополнительное увеличение электронной концентрации, которая оценивается критической частотой радиозондирования, при которой прекращается отражение радиоволн от ионосферы.

В нижней части области E на высотах 85-95 км в период действия активных метеорных потоков на ночной стороне появляется спорадический **слой E_s** , образованный ионами металлов Mg^+ , Fe^+ , Ca^+ с примесью Si^+ , Na^+ , Al^+ , Ni^+ (Трухин и др., 2005).

В последнее время стали выделять еще **слой G** на высотах свыше 500 км (Кононович, Мороз, 2001).

Таким образом, каждый тип ионизирующего излучения имеет максимум ионообразования в соответствующей области (Трухин и др., 2005). Коротковолновые излучения 8,5-91,1 нм большую часть ионов образуют на высотах 120-200 км, 91,1-103,8 нм – в E -области (90-115 км), рентгеновское излучение с длиной волны <8,5 нм – в области D (85-100 км). Здесь же на высотах около 80 км существенный вклад в ионизацию

вносят излучение первой линии серии Лаймана L_{α} (121,57 нм) и потоки электронов с энергией <30-40 кВ. В нижней части области D (ниже 60-70 км днем и 80-90 км ночью) ионизация происходит под действием галактических космических лучей. В тропопаузе на высоте около 15 км находится еще один максимум скорости образования ионов, образованный действием галактических космических лучей и продуктов ядерных реакций (максимум Пфотцера с концентрацией ионов $6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$).

Скорость образования ионов возрастает к высоким географическим широтам и при переходе от максимума к минимуму 11-летнего солнечного цикла в соответствии с изменением интенсивности космических лучей, которая к высотам 50-70 км уменьшается на 3-4 порядка, хотя и остается выше, чем скорость ионообразования под действием других источников (Мазур, Иванов, 2004; Трухин и др., 2005).

На рис. 1.4 приведена общепринятая классификация нижних слоев ОКП: атмосферы и ионосферы, основанная на различных свойствах атмосферного газа.

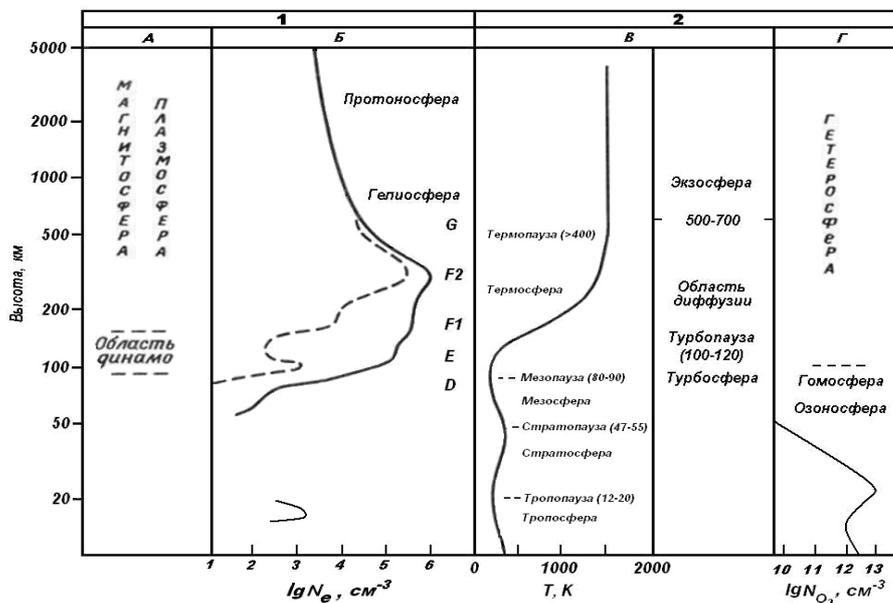


Рис. 1.4. Современная классификация слоев атмосферы и ионосферы

1.1.3. Магнитосфера

Одной из важнейших в ОКП является магнитосфера – структура, образованная взаимодействием солнечного ветра с геомагнитным полем.

Строгой границы между магнитосферой и ионосферой не существует. На высоте 1-2 тыс. км обнаруживается ряд явлений, относящихся более к ионосферным, но испытывающим заметное влияние магнитосферы. Внешний слой магнитосферы в подсолнечной точке определяется балансом динамического давления солнечного ветра $2nt_p v^2$ и давления магнитного поля Земли $B^2 / 8\pi$:

Сила идеально упругого удара протона массой m о магнитосферу, отнесенная к единице времени, составляет

$$mv - (-mv) = 2mv, \quad (1.19)$$

для N частиц $2mvN = 2mvnv = 2nmv^2 (\cos^2 \alpha), \quad (1.20)$

где n – концентрация протонов, v – их скорость, α - угол падения на магнитосферу.

Давление магнитного поля напряженностью B

$$P_{mag} = \frac{B^2}{8\pi}, \quad (1.21)$$

Тогда основное уравнение задачи определения границы магнитосферы

$$2nmv^2 \cos^2 \alpha = \frac{B^2}{8\pi}. \quad (1.22)$$

Далее, геомагнитное поле на границе магнитосферы представляется как $B_g + B_b$, где B_g – собственно геомагнитное поле, B_b – поле, порожденное током на границе магнитосферы, которое в свою очередь представляется как $B_p + B_c$ (B_p – поле на внутренней стороне поверхности, B_c – поправка на кривизну границы).

Эксперименты показывают, что $B = 2(B_g + B_c)$. При определении границы магнитосферы в первом приближении в подсолнечной точке при нормальном падении протонов $\alpha=0$, $B_c=0$. Тогда для этой точки $B=2B_g$, $B_g = \frac{M_3}{R_M^3}$, а R_M^3 определится выражением

(Акасофу, Чепмен, 1974; Сюняев, 1986)

$$2nm_p v^2 = \frac{1}{8\pi} * \left(\frac{2M_3}{R_M^3}\right)^2 \quad (1.23)$$

где M_3 - дипольный магнитный момент Земли.

Это расстояние от центра Земли (так называемый радиус Чепмена-Ферраро R_M) составляет 9-11 ее радиусов. Перед магнитосферой на расстоянии 13-17 радиусов Земли образуется бесстолкновительная ударная волна, отклоняющая поток солнечной плазмы, обтекающий затем магнитосферу (рис. 1.5).

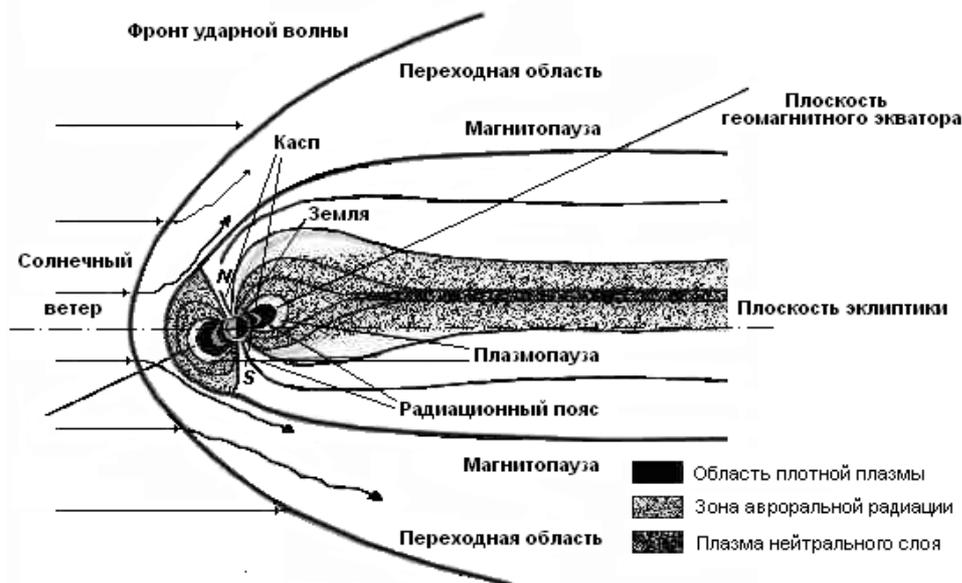


Рис. 1.5. Общая схема магнитосферы Земли

С дневной стороны поток солнечного ветра сжимает магнитосферу, на ночной стороне силовые линии магнитного поля вытягиваются в хвост диаметром 30-40 радиусов Земли и длиной по некоторым данным до 10^3 земных радиусов. Внутренняя часть магнитосферы до расстояний $\sim 3-5R_{\text{Земли}}$ — плазмосфера, расположена в пределах диполеподобного геомагнитного поля. Частицы «холодной» плазмы (концентрация $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$) плазмосферы участвуют в суточном вращении Земли.

Во внешней части магнитосферы концентрация частиц ниже плазмосферной на 3-4 порядка. Движение частиц плазмы здесь определяется электрическими полями, возбуждаемыми солнечным ветром, и сильно зависит от величины и направления в межпланетного магнитного поля.

Движение заряженных частиц в магнитосфере

На заряженную частицу, движущуюся в магнитосфере, действуют силы как со стороны магнитных полей \vec{B} , так и наведенных электрических \vec{E} . В общем виде уравнение движения частицы в магнитосфере записывается в виде

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = q\vec{E} + q[\vec{v} * \vec{B}], \quad (2.5)$$

где m – релятивистская масса заряженной частицы $m = m_0 * (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-0.5}$. Для нерелятивистского движения масса постоянна ($m = m_0$). Тогда

$$m_0 * \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E} + q[\vec{v} * \vec{B}] \quad (2.6)$$

Преобладающим движением является движение заряженных частиц под действием магнитного поля – силы Лоренца. Частицы в магнитосфере описывают спирали вокруг силовых линий геомагнитного поля, и движутся, как-бы наматываясь на них от одного магнитного полюса к другому.

Движение отдельных частиц в ловушке с магнитными зеркалами, которой является геомагнитное поле, складывается из вращения их вокруг силовых линий магнитного поля под действием силы Лоренца и движения вдоль силовых линий со скоростью $v_{||}$. Сохранение первого адиабатического инварианта – магнитного момента частицы

$$\mu = mv_{\perp}^2 / 2B \quad (1.24)$$

где v_{\perp} и m – перпендикулярная магнитному полю составляющая скорости частицы и ее масса, обеспечивает удержание большинства частиц в поле, ввиду их отражения от магнитных зеркал – областей усиленного геомагнитного поля вблизи полюсов.

Под действием электрического поля частицы медленно движутся к Земле в магнитном поле. Здесь происходит также сохранение и второго адиабатического инварианта

$$I_2 = m * \bar{v}_{||} * l / \pi \quad (1.25)$$

где $v_{||}$ – средняя скорость частицы вдоль магнитной силовой линии, l – длина силовых линий между точками отражения.

Это определяет нахождение заряженной частицы на одной определенной силовой линии магнитного поля, что формирует оболочку радиационного пояса.

Третий адиабатический инвариант – сохранение потока: магнитный поток через поверхность оболочки, образованный вращением силовой линии диполя вокруг оси, сохраняется, если временными и пространственными вариациями за время дрейфа частицы вокруг Земли можно пренебречь.

В плазмосфере магнитное поле удерживает как в ловушке потоки быстрых частиц с энергиями до сотен МэВ. Это протоны, электроны, альфа-частицы и ядра более тяжелых химических элементов. Они образуют так называемые радиационные пояса Земли (в иностранной литературе их называют поясами Ван Аллена) (рис. 1.6).

Во внутреннем радиационном поясе (расстояние, выраженное в земных диаметрах, соответствует магнитному параметру $L = r / R_{Земли}$) наблюдается наличие протонов высоких энергий до 800 МэВ и электронов с энергиями до 1 МэВ. С наружной стороны этот пояс ограничен магнитной оболочкой с $L=2-3$, пересекающейся с земной поверхностью на геомагнитных широтах $\sim 45^\circ$. На нижней границе внутреннего пояса ($L=1$) на высотах порядка 100-200 км заряженные частицы в результате частых соударений с атомами и молекулами атмосферы теряют свою энергию и рассеиваются в атмосфере (Гальпер, 1999; Сюняев, 1986).

Внешний радиационный пояс располагается между магнитными оболочками с $L=3,5$ и $L=7$ с максимальной плотностью потока частиц на $L \sim 4-4,5$. Здесь располагаются

электроны с энергиями до 100 кэВ. Зоны обоих радиационных поясов перекрыты поясом протонов малых энергий (до 10 МэВ) с магнитными оболочками $L=1,5\div 8$.

В начале 80-х гг. XX в. был открыт еще ряд радиационных поясов. Это, во-первых, стационарный пояс электронов высокой энергии (до 200 МэВ), располагающийся в зоне $L=1,2-1,5$. Кроме него был открыт стационарный пояс ядер кислорода, азота и неона ($L\sim 2$), являющихся аномальной компонентой космических лучей.

Современная картина общей структуры радиационных поясов Земли приведена на рис.1.6 ((Гальпер, 1998; Merabtime, et al., 2004).

Кроме этих стационарных поясов в магнитосфере Земли время от времени возникают квазистационарные пояса, происхождение которых обусловлено различными причинами. Это могут быть вспышки на Солнце: так в 1991 г. после солнечной вспышки возник квазистационарный пояс из электронов и протонов с $L=2,6$, просуществовавший два года (Гальпер, 1999).

В 60-е гг. XX века в результате взрывов ядерных устройств в космосе возник квазистационарный пояс из электронов малых энергий, просуществовавший более 10 лет.

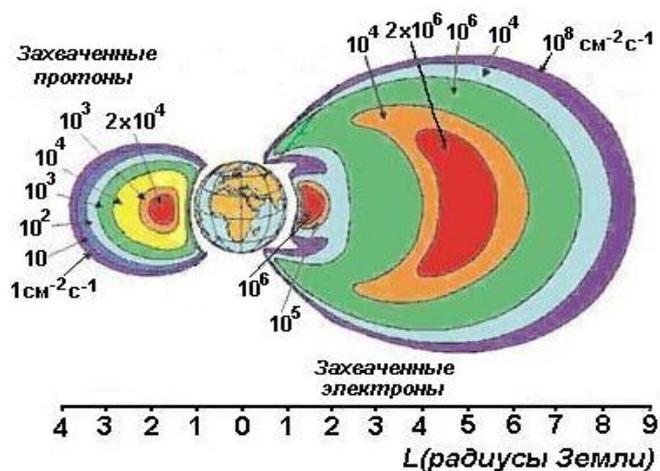


Рис. 1.6. Поток заряженных частиц в радиационных поясах Земли

Зона квазизахвата или зона авроральной радиации расположена за внешним поясом и имеет сложную структуру, обусловленную деформацией магнитосферы под воздействием солнечного ветра. Внешний пояс и пояс протонов малых энергий до высот 200-300 км подходят к земной поверхности на широтах около 60° . На широты выше 60° проецируется зона квазизахвата, совпадающая с областью максимальной частоты полярных сияний. Происхождение захваченных частиц с энергией, значительно превышающей энергию теплового движения атомов и молекул атмосферы, связано с действием нескольких механизмов: распадом нейтронов, созданных космическими лучами в атмосфере; инжекцией заряженных частиц благодаря быстрой конвекции во время магнитных суббурь; ускорением и медленным переносом частиц солнечного происхождения из внешних во внутренние области магнитосферы (через дневные полярные каспы, а также через нейтральный слой в хвосте магнитосферы с ее ночной стороны); частично также за счет захвата протонов и электронов солнечных космических лучей (Прохоров, 1983; Сюняев, 1986).

Процесс ускорения частиц идет с сохранением первого и второго адиабатического инвариантов, поэтому диффузия частиц из хвоста магнитосферы к Земле под действием стохастических возмущений электрического поля сопровождается набором энергии. При этом возникают области втекания и вытекания токов в атмосфере и ионосфере, образуются зоны продольных и поперечных токов, соответствующих зонам полярных сияний.

Наиболее существенным механизмом генерации частиц радиационных поясов является распад альбедных нейтронов, которые образуются при взаимодействии космических лучей с атмосферой. Эти нейтроны, двигаясь от Земли, распадаются на протоны с энергиями до 10^3 МэВ, электроны с энергиями до нескольких МэВ и электронное антинейтрино.

При осуществлении механизма радиальной диффузии плазма солнечного ветра попадает в магнитосферу со стороны хвоста, захватывается геомагнитным полем и совершает в нем колебательное движение между магнитными зеркалами на линии L , соответствующей ее энергии. При резком изменении давления солнечного ветра магнитное поле сильно меняется в короткий промежуток времени. Тогда нарушается условие адиабатичности (1.24.-1.25) и частица переходит на оболочку с меньшим L . При этом происходит увеличение энергии за счет изменения магнитного поля. Этот механизм обеспечивает магнитосферу протонами и электронами с энергиями до ~ 30 МэВ и формирует основную часть внешнего пояса.

Кроме них существуют еще несколько механизмов накачки радиационных поясов высокоэнергичными частицами.

Следует отметить, что взаимодействие магнитосферы с солнечным ветром происходит, главным образом, в результате диссипативных процессов. То есть в их отсутствие плазма и магнитное поле внутри магнитосферы находятся в (хотя и достаточно неустойчивом) динамическом равновесии. Флуктуации (например, магнитогидродинамические волны) соответствующего периода могут нарушать три адиабатических инварианта и таким образом удалять частицы из области захвата.

1.1.4. Сравнительные характеристики магнитосфер планет Солнечной системы

Магнитосферы планет Солнечной системы можно описывать теми же параметрами, что и земную. Принимая во внимание, что плотность солнечного ветра обратна расстоянию от Солнца, отношение радиусов Чепмена-Ферраро R_M планеты и R_{M3} Земли можно записать как

$$\frac{R_M}{R_{M3}} = \left(\frac{aM}{M_3}\right)^{0,5}, \quad (1.26)$$

где a – большая полуось орбиты планеты в а.е.

Основные параметры известных магнитосфер планет представлены в табл. 1.1. по данным (Кононович, 2001; Сюняев, 1983).

Таблица 1.1.

Магнитные поля и магнитосферы планет Солнечной системы

	Меркурий	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
Расстояние планеты от Солнца, а.е.	0,39	1	1,53	5,05	9,63
Радиус планеты, км* 10^3	2,43	6,38	3,4	71,6	60,0
Напряженность магнитного поля на (поверхности), Э	$2 \cdot 10^{-3}$	0,5	-	10	0,5
Дипольный магнитный момент, Гс*см ³	$5 \cdot 10^{22}$	$8 \cdot 10^{25}$	$2,5 \cdot 10^{22}$	$1,6 \cdot 10^{30}$	$4,4 \cdot 10^{28}$
Радиус Чепмена-Ферраро, в радиусах планеты	1.6	10	1,4	100	20
Перепад электростатического потенциала поперек магнитосферы, кВ	-	100	-	1000	200
Мощность диссипации энергии, Вт	-	$3 \cdot 10^{11}$	-	$2,5 \cdot 10^{13}$	10^{12}

Наиболее изучена магнитосфера Юпитера, размеры которой в сотни раз превосходят размеры самой планеты. Отличием магнитосферы Юпитера является ее совместное вращение с системой долгот II для средних широт и Красного Пятна. Радиационные пояса Юпитера были обнаружены задолго до полетов КА по их радиоизлучению, являющемуся синхротронным излучением релятивистских электронов на длинах волн 3-70 см. Интерференционная картина Юпитера в этом диапазоне имеет весьма характерную для радиационных поясов форму «бублика».

До последнего времени считалось, что полярные сияния на Юпитере вызваны быстрым вращением планеты и потоком плазмы, испускаемой спутником Ио. Этот спутник известен своей вулканической активностью - каждую секунду он выбрасывает в межпланетное пространство одну тонну вещества.

Однако сейчас стало ясно, что энергия передается магнитосфере планеты посредством солнечного ветра, а механизм возникновения полярных сияний подобен земному (*www.spacenews.ru – 07.04.2006*). Это объясняет, кроме всего прочего, и тот факт, что Юпитер имеет температуру выше расчетной.

Кроме того, при генерации альвеновских волн, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля Юпитера и многократно отражающихся от его ионосферы, возникает сильное радиоизлучение в декаметровом диапазоне. Это излучение является одним из самых сильных в Солнечной системе.

То же можно сказать и о процессах, происходящих в магнитосфере Сатурна, уступающей лишь магнитосфере Юпитера.

На процессы взаимодействия солнечного ветра и магнитного поля планеты оказывают влияние как размеры планеты, так и структура ее магнитного поля. Так, для планет, лишенных магнитного поля и атмосферы (ионосферы), все взаимодействие сводится к обтеканию солнечным ветром их поверхности с образованием с ночной стороны плазменной тени. Пример – Луна. В случае Венеры, имеющей ионосферу без магнитного поля, взаимодействие солнечного ветра с ионосферой образует ионопаузу. Магнитное поле Меркурия ввиду малых размеров планеты останавливает частицы солнечного ветра весьма близко от поверхности, хотя магнитосфера у планеты и образуется. Собственное магнитное поле Марса еще слабее, поэтому характер взаимодействия его с солнечным ветром зависит от солнечной активности. Если активность Солнца низкая, то магнитное поле находится под ионосферой. При высокой активности Солнца солнечный ветер отжимает ионосферу вниз. Тогда образуется картина взаимодействия, близкая к земной. В последнее время выяснилось, что на Марсе есть локальные магнитные поля (*www.spacenews.ru - 14.12.2005*). Эти магнитные "пятна" располагаются главным образом в южном полушарии. Поэтому весьма слабые полярные сияния на Марсе фиксируются преимущественно в этих районах.

Уран имеет магнитосферу. Она необычна тем, что ось симметрии ее наклонена почти на 60° к оси вращения (у Земли этот угол составляет 10°). Магнитное поле вблизи облаков составляет $13 \cdot 10^3$ нТл. Вероятно, магнитное поле вокруг планеты генерируется движениями в сравнительно поверхностных областях Урана, а не в его ядре. Источник поля - неизвестен; существование гипотетического электропроводящего океана воды или аммиака пока не подтверждено исследованиями.

Интенсивность поля на поверхности Урана в общих чертах сравнима с земной, хотя оно и сильнее изменяется в разных точках поверхности из-за большого смещения оси симметрии поля от центра Урана

Как у Земли, Юпитера и Сатурна, у Урана есть магнитный хвост, состоящий из захваченных полем заряженных частиц, растянувшийся на миллионы километров за Уран от Солнца. КА «Вояджер 2» регистрировал поле, по крайней мере, в 10-ти миллионах километров от планеты.

Магнитная ось Нептуна наклонена на 47° к оси вращения. Кроме того, ось симметрии магнитного поля Нептуна не проходит через центр планеты, а отстоит от него

более, чем на полрадиуса, что очень похоже на обстоятельства существования магнитного поля вокруг Урана. Поле, вероятно, создается движениями проводящего вещества (возможно, воды), расположенной в средних слоях планеты, выше ядра.. Соответственно, и напряжение поля непостоянно на поверхности в разных ее местах и меняется от трети земного до утроенного (в среднем $6,5 \cdot 10^3$ нТл). В какой-либо одной точке поверхности поле также непостоянно, как положение и интенсивность источника в недрах планеты. При подлете к Нептуну КА «Вояджер» двигался почти точно в направлении южного магнитного полюса планеты, что дало возможность провести ряд уникальных исследований. В частности, были обнаружены явления в атмосфере, схожие с земными полярными сияниями.

Можно также отметить, что подобное взаимодействие наблюдается между солнечным ветром и комой комет. Оно связано с тем, что ионы, образующиеся в голове кометы, составляют кометную ионосферу. Солнечный ветер обтекает ее, как ионосферу Венеры или Марса, образуя характерную ударную волну и формируя кометные хвосты.

Подводя некоторые итоги, можно отметить следующее.

Характер взаимодействия магнитных полей и ионосфер тел Солнечной системы с солнечным ветром имеет универсальный характер. Магнитосферы планет подразделяются на собственную магнитосферу, наведенную магнитосферу, комбинированную магнитосферу.

Собственная магнитосфера обладает таким магнитным моментом, который обеспечивает уравнивание динамического давления солнечного ветра за пределами ионосферы и, таким образом, образуется собственная магнитная область с силовыми линиями, свободная от солнечного ветра. **Таковую магнитосферу имеют Земля и большие планеты.** Магнитное поле Меркурия ввиду малых размеров планеты останавливает частицы солнечного ветра весьма близко от поверхности, хотя магнитосфера у планеты и образуется.

Наведенная магнитосфера обладает незначительным магнитным полем и плотной ионосферой. При взаимодействии ионосферы с солнечным ветром образуются электрические токи, создающие магнитное поле (закон электромагнитной индукции) и, соответственно, наведенную магнитосферу. Так для Венеры, имеющей ионосферу без магнитного поля, взаимодействие солнечного ветра с ионосферой образует ионопаузу. Ионы, образующиеся в голове кометы, составляют кометную ионосферу. Солнечный ветер обтекает ее, как ионосферу Венеры или Марса, образуя характерную ударную волну

Комбинированная магнитосфера имеет собственное магнитное поле, соизмеримое с величиной наведенного поля. Характер взаимодействия магнитного поля Марса с солнечным ветром зависит от солнечной активности. Если активность Солнца низкая, то магнитное поле находится под ионосферой. При высокой активности Солнца солнечный ветер отжимает ионосферу вниз. Тогда образуется картина взаимодействия, близкая к земной.

1.2. Внешняя часть околоземного космического пространства

Вне магнитосферы на расстояниях более ~ 20 земных радиусов в солнечном направлении состояние ОКП определяется параметрами межпланетной среды, основными компонентами которой являются: солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, космические лучи высоких энергий, межпланетная пыль и газ.

Солнечный ветер образуется при газодинамическом расширении солнечной короны в межпланетное пространство. Скорость расширения очень мала во внутренней короне, но быстро возрастает с высотой. На некотором расстоянии (критический радиус) тепловая энергия становится сравнимой с кинетической энергией расширяющейся плазмы. Здесь скорость расширения близка к скорости звука в плазме. Далее, на больших расстояниях, солнечный ветер становится сверхзвуковым.

В табл. 1.2. (Бруцек, Дюран, 1980) приведены параметры солнечного ветра, каким он является на границе ОКП. Средняя плотность числа частиц в солнечном ветре $n=10 \text{ см}^{-3}$. Состав солнечного ветра определяется, в основном, протонами и электронами. Однако, кроме них, здесь присутствуют ядра He^3 , He^4 , O , Ne , Si , Ar , Fe .

Таблица 1.2.

Параметры солнечного ветра в окрестностях Земли

Параметр	Значения		
	миним.	среднее	максим.
Поток (10^8 ион/см ² *с)	1,0	3,0	10 0
Скорость (км/с)	200	400	90 0
Плотность (ион/см)	4,0	6,5	10 0
Электронная температура (1000К)	5	200	10 00
Протонная температура (1000К)	3	50	10 00
Напряженность магнитного поля (гамм)	2,0	6,0	80
Альвеновская скорость (км/с)	30	60	15 0
Относительное содержание гелия	0,0	0,05	0,2 5

В первом приближении солнечный ветер, наблюдаемый вблизи орбиты Земли, состоит из трех независимых компонент (Курт, 1999; Пудовкин, 2000):

- спокойный солнечный ветер – постоянно существующий поток солнечной плазмы, заполняющий все Солнечную систему и далее вплоть до границы гелиосферы около 50-200 а.е.;
- квазистационарные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, ответственные за рекуррентные геомагнитные возмущения;
- спорадические высокоскоростные потоки – кратковременные, неоднородные, сложные по структуре потоки плазмы, ответственные за спорадические магнитосферные возмущения.

Развитие конвективной турбулентности в верхних слоях Солнца сопровождается генерацией интенсивных магнитозвуковых волн. Распространяясь в атмосфере Солнца, где плотность плазмы быстро уменьшается с высотой, звуковые волны трансформируются в ударные. Они эффективно поглощаются веществом, в результате чего температура последнего увеличивается до $1-3 \cdot 10^6$ в солнечной короне. При этом значительная часть протонов в короне не может удерживаться гравитационным полем Солнца. Это приводит к непрерывному расширению короны в окружающее пространство, то есть к генерации солнечного ветра. Уравнение, связывающее изменение скорости солнечного ветра с расстоянием от Солнца, полученное Паркером из уравнений движения, газового состояния и Бернулли, имеет вид

$$0,5 * v^2 - \frac{GM_{\text{Солнца}}}{r} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} * \frac{p_0}{\rho_0} * \frac{v_0 A_0}{vA} = 0,5 * v_0^2 - \frac{GM_{\text{Солнца}}}{r_0} + \frac{\alpha}{\alpha - 1} * \frac{p_0}{\rho_0}, \quad (1.27)$$

где v – скорость солнечного ветра,
 p и ρ - его давление и плотность,

α - показатель политропы, отличный от показателя адиабаты (5/3),

A – площадь поперечного сечения трубки потока,

индексом 0 отмечены значения переменных на некотором исходном состоянии r_0 от центра Солнца (Пудовкин, 2000).

Выбор между решениями в модели Паркера определяется условиями на бесконечности при $r/r_0 \gg 1$. Оптимальное решение соответствует переходу скорости расширения через значение скорости звука v_c на некотором критическом расстоянии r_c и последующему расширению со сверхзвуковой скоростью. Такое течение и является солнечным ветром.

Таблица 1.3.

Потоки и плотности энергии в спокойном солнечном ветре в ОКП

Плотность потока кинетической энергии	0,22 эрг/см ² *с
Плотность потока тепла, переносимого электронами	~ 0,01 эрг/см ² *с ~ 10 ⁻⁵ эрг/см ² *с
Плотность потока тепла, проводимого протонами	7*10 ⁻⁹ эрг/см ³
Плотность кинетической энергии	6*10 ⁻¹¹ эрг/см ³
Плотность тепловой энергии протонов	1,5*10 ⁻¹⁰ эрг/см ³
Плотность тепловой энергии электронов	10 ⁻¹⁰ эрг/см ³
Плотность энергии магнитного поля	

Для поддержания достаточно высокой температуры солнечного ветра в его теорию вводятся нетепловые источники энергии, прежде всего альвеновские волны, которые в ходе четырехволнового взаимодействия трансформируются в магнитозвуковые волны. Последние диссипируют в результате резонансного взаимодействия с протонами, которые при этом заметно нагреваются.

Вообще в солнечном ветре наблюдаются различные виды волн: ленгмюровские, вистлеры, ионнозвукковые и др. Часть альвеновских волн возбуждается в межпланетной среде. Генерация волн сглаживает отклонения функции распределения от максвелловского и приводит к тому, что солнечный ветер ведет себя как сплошная среда. В нем наблюдаются контактные и вращательные разрывы, характерные для замагниченной плазмы.

Современные модели солнечного ветра учитывают вариации корональной температуры с расстоянием, двухжидкостной характер среды (электронный и протонный газы), теплопроводность, вязкость, несферический характер расширения (Сюняев, 1983).

Высокоскоростной солнечный ветер имеет повышенную скорость (около 700 км/с), повышенную ионную температуру и пониженную плотность плазмы ($\approx 4\text{см}^{-3}$).

Рекуррентные потоки высокоскоростного солнечного ветра появляются в ОКП с периодом, равным периоду осевого вращения Солнца (27 суток). Эти потоки зарождаются на Солнце в области корональных дыр – обширных областях пониженной интенсивности излучения с температурой около $8 \cdot 10^5 \text{K}$ и плотностью 0,25 плотности спокойной короны.

Спорадические высокоскоростные потоки – кратковременные весьма интенсивные потоки, имеющие скорость до 1200 км/с и весьма большую долготную протяженность, обусловлены так называемыми корональными выбросами. При своем движении такой поток захватывает плазму спокойного солнечного потока, в результате чего перед его фронтом образуется движущаяся вместе с ним отошедшая ударная волна. Пространство между фронтом потока и фронтом отошедшей ударной волны заполнено относительно плотной и горячей плазмой.

Солнечный ветер обеспечивает основной отток тепловой энергии короны Солнца, так как теплопередача в хромосферу, электромагнитное излучение сильно

ионизированного вещества короны и электронная теплопроводность солнечного ветра недостаточны для установления термического баланса короны.

Солнечный ветер не играет сколько-нибудь заметной роли в энергетике Солнца, так как поток энергии, уносимой им, составляет $\sim 10^{-8}$ светимости Солнца.

Солнечный ветер простирается до расстояний порядка 100 астрономических единиц, где давление межзвездной среды уравнивает его динамическое давление. В результате образуется своеобразная полость, называемая гелиосферой. Солнечный ветер вместе с вмороженным в него магнитным полем препятствует проникновению в Солнечную систему галактических космических лучей малых энергий и приводит к вариациям космических лучей высоких энергий.

Межпланетное магнитное поле является унесенным солнечным ветром магнитным полем Солнца. На расстоянии около 20 радиусов Солнца от него расширение короны становится почти идеальным, но вращение Солнца закручивает силовые линии межпланетного магнитного поля в спирали Архимеда, располагающиеся на конусах, описываемых концом радиуса-вектора. На малых гелиографических широтах вектор магнитного поля практически параллелен плоскости солнечного экватора. Поле состоит из четного количества (обычно четырех) секторов или областей, в которых поле направлено преимущественно к Солнцу или от Солнца вдоль архимедовой спирали. Секторная граница, разделяющая поля противоположной полярности, обычно очень тонка. Она является следствием существования токового слоя, вращающегося вместе с Солнцем. Токовый слой создает скачок магнитного поля: выше него радиальный компонент магнитного поля имеет один знак, ниже – другой. Земля, находящаяся в плоскости эклиптики, оказывается то выше, то ниже токового слоя, попадая в секторы с противоположным направлением радиальной компоненты межпланетного магнитного поля.

Кроме того, первоначально практически дипольное магнитное поле Солнца (в минимуме активности) при удалении от него искажается. Солнечная плазма увлекает вмороженные в него силовые линии магнитного поля и сильно их вытягивает. Образуется азимутально-направленный токовый гелиосферный слой, в котором и наблюдаются наиболее мощные потоки солнечного ветра, вызывающие магнитные бури на Земле, изменение блеска комет и отрыв кометных хвостов (*Подгорный, 2003*).

Вдали от плоскости солнечного экватора секторная структура пропадает, и направление вектора межпланетного магнитного поля определяется полярностью магнитного поля на высоких гелиографических широтах в фотосфере Солнца.

Вблизи границ секторов образуется ударная волна, движущаяся к Солнцу. Увлеченная плазмой солнечного ветра, она также начинает двигаться в направлении от Солнца. Эти две волны, а также ударная волна от вспышек на Солнце и околопланетная ударная волна ускоряют заряженные частицы в ОКП (*Курт, 1999; Сюняев, 1983*).

Присутствие Луны в ОКП не искажает силовых линий межпланетного магнитного поля, только в пределах структуры, развивающейся в потоке на обратной стороне Луны. Межпланетные силовые линии пронизывают Луну, а электроны солнечного ветра поглощаются ею на подсолнечной стороне. В результате позади Луны образуется электронная тень, которой бы не было, если бы она обладала высокой проводимостью (*Акасофу, Чепмен, 1975*).

Космические лучи в межпланетном пространстве по происхождению разделяют на: галактические; метagalacticкие и солнечные космические лучи; рекуррентные потоки; заряженные частицы, ускоренные магнитосферами планет; аномальный компонент космических лучей. Они представляют собой ядра различных элементов. Наиболее многочисленны ядра атомов водорода ($\sim 85\%$) и гелия ($\sim 10\%$). Доля ядер всех остальных элементов не превышает $\sim 5\%$. Небольшую часть составляют электроны и позитроны (менее 1%). Плотность энергии космических лучей в Галактике составляет $\sim 0,5$ эВ/см³, что сравнимо с плотностями энергий межзвездного газа и галактического магнитного

поля. Время жизни космических лучей равно $\sim 3 \cdot 10^8$ лет и определяется либо их выходом из Галактики и гало, либо поглощением за счет неупругих взаимодействий с веществом межзвездной среды (Стожков, 2001).

Следует отметить, что интенсивность первичных космических лучей в ОКП практически постоянна, ее вариации определяются широтным эффектом. Ниже 50 км происходит увеличение интенсивности за счет вторичных космических лучей.

Распределение интенсивности космических лучей в ОКП выражается несколькими различными способами, поскольку они состоят из ядер с различными энергиями. Часто используется функция дифференциальной интенсивности $J(\varepsilon)$ ($\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$) или функция

интегральной интенсивности $J(> \varepsilon) = \int_{\varepsilon}^{\infty} J(\varepsilon) d\varepsilon$. Здесь $J(\varepsilon)$ – поток частиц космических

лучей с энергиями между ε и $d\varepsilon$. Приняты выражения (Акасофу, Чепмен, 1975)

$$J(\varepsilon) = (\gamma - 1) C \varepsilon^{-\gamma}, \quad (1.28)$$

$$J(> \varepsilon) = C \varepsilon^{-(\gamma-1)}. \quad (1.29)$$

Для протонов космических лучей $\gamma \approx 2,5$ и $C \approx 0,5$ ($4 < \varepsilon < 16$ ГэВ) и для α -частиц $\gamma \approx 2,5$ и $C \approx 3 \cdot 10^{-2}$ ($2 < \varepsilon < 10$ ГэВ).

Основным источником космических лучей внутри Галактики являются взрывы сверхновых звезд. Космические лучи ускоряются на ударных волнах, образующихся при этих взрывах, и приобретают энергию до 10^{16} эВ. Космические лучи еще больших энергий (до 10^{21} эВ) образуются в Метагалактике. Кроме того, дополнительным источником космических лучей сверхвысоких энергий могут быть ядра активных галактик.

В состав **галактических космических лучей** входят протоны, электроны, ядра легких элементов с максимальными энергиями до $\sim 10^{16}$ эВ. Основная их часть до орбиты Земли практически не долетает, рассеиваясь на неоднородностях межпланетного магнитного поля. Остаточный поток галактических космических лучей в ОКП составляет $\sim 0,06 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Следует отметить, что поток галактических космических лучей ежегодно уменьшается на 0,01-0,08% в год, что можно интерпретировать взрывом близкой сверхновой несколько десятков тысяч лет назад (Стожков, 2001). Эти предположения имеют подтверждения как в виде наблюдаемого на небесной сфере в радиодиапазоне «галактического шпура» (Сюняев, 1983), так и в повышенном содержании космогенных изотопов углерода, хлора и бериллия в атмосфере и льдах в период, относящийся к 53 тысячам лет назад (Кочаров, 1996; 2000).

За исключением нерегулярных столкновений с неоднородностями межпланетного магнитного поля, частицы космических лучей движутся по направлению к Солнцу, описывая спирали вокруг силовых линий магнитного поля со структурой спиралей Архимеда, и затем обратно от Солнца после поворота в зеркальной точке. В то же время они принимают участие во вращении архимедовой спирали с Солнцем. Поэтому в любой точке межпланетного пространства, не вращающейся вместе со спиральной структурой, имеется слабый поток космических лучей в направлении вращения. В результате наблюдающиеся на Земле потоки обнаруживают слабую модуляцию, дневные вариации. Направление усиления потока составляет $\sim 90^\circ$ по часовой стрелке с прямой Солнце-Земля.

Солнечные космические лучи возникают во время вспышек на Солнце, когда испускаются протоны с энергией 10-100 МэВ (иногда до 15 ГэВ) и электроны от 40 кэВ (в исключительных случаях регистрируются релятивистские электроны с энергиями до 12 МэВ).

Следует отметить, что магнитосферы планет ускоряют заряженные частицы и наполняют ими межпланетное пространство. Здесь наиболее мощным источником заряженных частиц является магнитосфера Юпитера, поставляющая электроны с энергиями до 30 МэВ на расстояния в 10 а.е.

Аномальный компонент космических лучей представляет собой частично ионизированные атомы гелия, кислорода, азота и неона с удельной энергией до 100 МэВ/нуклон. Плотность их потоков растет с удалением как от Солнца, так и от плоскости солнечного экватора. Образуются они на периферии гелиосферы.

Космические лучи с энергиями $<10^{12}$ эВ, испытывают воздействие межпланетных магнитных и электрических полей, и их движение в Солнечной системе достаточно хаотично. Поскольку плотность магнитных неоднородностей сильно зависит от солнечной активности, интенсивность космических лучей внутри гелиосферы, соответственно, и в ОКП, определяется ее уровнем. Понижение уровня галактических метagalactic космических лучей (эффект Форбуша) наблюдается именно в периоды повышенной солнечной активности.

Космическое рентгеновское и гамма-излучение, проходящее через ОКП, достаточно слабо (мощность излучения от гамма-вспышки в начале 2005 г. составила в районе Земли $0,3$ эрг/см²). Хотя ряд исследователей считает, что в прошлом система Земля-ОКП могла подвергаться импактным воздействиям

Основными источниками **космической пыли** в Солнечной системе являются кометы. Общая масса пыли оценивается здесь в $\sim 10^{17}$ кг. Основная часть пыли ($\sim 2/3$) сосредоточена в частицах массой 10^{-3} - 10^{-5} г и сильно концентрируется в плоскости эклиптики на расстояниях до ~ 3 а.е. (*Божокин, 2002*). На больших расстояниях по данным КА "Galileo" существует поток пылинок массой порядка 10^{-13} г плотностью $\sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ м⁻²с⁻¹ (*Astronet.ru, 2000*).

В 1992 г. открыты периодические потоки пыли в виде частиц диаметрами 5-10 нм, исходящие из системы Юпитера. Их источником являются вулканы, которые в большом количестве представлены на спутнике Юпитера Ио.

В 2004 г. КА "Cassini" открыты пылевые частицы размерами 2 – 50 нм в системе Сатурна (*News.Battery.Ru. 20.01.2005*),

Кроме того, открыт также поток межзвездных пылинок, пересекающий Солнечную систему со скоростью, большей 3-й космической, и идущий с того же направления, что и поток межзвездного газа (*Murray, et al., 2003*). Источником этой пыли размерами 5 – 35 микрон являются как звезды спектральных классов А, G, В, так и протозвездные системы типа β Живописца.

В ОКП космическая пыль сосредоточена в зонах, занимаемых противосиянием, зодиакальным светом, F-компонентом солнечной короны, в точках либрации системы Земля-Луна, выпадает в виде метеоров в атмосферу и на поверхность Земли.

В процессе движения межпланетная пыль испытывает ряд воздействий со стороны электромагнитного и корпускулярного солнечного излучения, межпланетного магнитного поля, космических лучей и т.д. В результате частички пыли могут приобретать электрический заряд, собственное осевое вращение. Равновесный электрический потенциал межпланетной пыли определяется балансом между процессами выбивания фотоэлектронов солнечными фотонами и захвата частицами электронов солнечного ветра. В районе земной орбиты он составляет около +11,5 В (*Акасофу, Чепмен, 1975*).

Можно добавить, что солнечный ветер в значительной степени определяет концентрацию частиц космической пыли в ОКП, действуя как своеобразный чистильщик ближнего космоса (*Касименко, Рыклова, 1995*).

Нейтральный газ в Солнечной системе образован атомами водорода и гелия, проникающими из межзвездного пространства. Это поток межзвездного ветра – горячего ($T \sim 10^4$ К, $n \sim 0,1$ см⁻³) газа, движущегося со скоростью порядка 20 км/с из области созвездий Скорпиона-Центавра (*Баранов, 2000*). Размер зоны горячего атомарного водорода составляет 5 а.е. в указанном направлении движения Солнца, 10 а.е. в поперечном и 25 а.е. – в противоположном. Для атомарного нейтрального гелия размеры такой зоны меньше: радиус сферической каверны для него составляет 0,3 а.е. В районе орбиты Земли сильная

неоднородность распределения газа обусловлена суммарным влиянием притяжения Солнца, его УФ-излучения, солнечного ветра.

Наконец, важными компонентами внешней части ОКП в связи с развитием технических возможностей цивилизации стали потоки от различных видов передатчиков энергии, отходы космической деятельности.

Контрольные вопросы

1. В чем сходство и отличие классической экологии и экологии околоземного пространства?
2. В чем состоят различия и задачи теоретической и прикладной экологии ОКП?
3. Как соотносятся между собой экология ОКП, охрана и рациональное использование ОКП?
4. Сформулируйте значимость экологии ОКП как науки в эпоху выхода человечества в околоземное космическое пространство.
5. Какова структура околоземного космического пространства?
6. Можно ли расширить границы ОКП, например, до орбиты Венеры?
7. Вывести уравнение теплового баланса Земли, используя различные исходные данные. Откуда в нем берется множитель $\frac{1}{4}$?
8. Определить параметры движения заряженной частицы в магнитосфере Земли.
9. Вывести формулы, определяющие адиабатические инварианты магнитосферы.
10. Проиллюстрировать вывод формулы Паркера для связи скорости солнечного ветра с расстоянием от Солнца законами механики, газового состояния и течения жидкостей.

Глава II.

Осколки естественных космических тел и техногенные отходы в околоземном космическом пространстве

Изучение загрязнения околоземного пространства как естественными (астероиды, кометы, метеоры, космическая пыль), так и искусственными (обломки космических аппаратов, образующие так называемый космический мусор) объектами имеет в настоящее время важнейшее значение как для астрономии и исследований космического пространства, так и для экологии Земли как планеты и безопасности жизни на ней. Здесь можно говорить не только об ущербе от падения тел естественного и искусственного происхождения, но даже и о возможности заражения земной природы радиоактивными и биологическими материалами.

Отношение потока искусственных объектов к потоку естественных объектов в околоземном пространстве зависит от размеров объектов. Равенство потоков приходится на размеры объектов, близких к 1 мм. Для меньших размеров преобладает поток естественных, для больших – искусственных объектов, причем для размера 1 см это отношение составляет величину ~ 40 , для размера 10 см - $\sim 10^5$ (Назаренко, Чернявский, 1995; Рыхлова, 1995).

В процессе движения в Солнечной системе межпланетная пыль испытывает ряд воздействий со стороны электромагнитного и корпускулярного солнечного излучения, межпланетного магнитного поля, космических лучей и т.д. В результате частички пыли могут приобретать электрический заряд, собственное осевое вращение. Равновесный электрический потенциал межпланетной пыли определяется балансом между процессами выбивания фотоэлектронов солнечными фотонами и захвата частицами электронов солнечного ветра. В районе земной орбиты он составляет около +11,5 В (Акасофу, Чепмен, 1975). Попадая в ОКП частицы пыли испытывают воздействие со стороны геомагнитного поля, плазмы магнитосферы и т.д.

В ОКП космическая пыль сосредоточена в зонах, занимаемых противосиянием, зодиакальным светом, F -компонентом солнечной короны, в точках либрации системы Земля-Луна, выпадает в виде метеоров в атмосферу и на поверхность Земли.

Нижними поясами естественного мусора в ОКП можно считать два пояса пылинок метеорного и вулканического происхождения, служащих центрами концентрации водяного пара (Куликовский, 2002). Один из них находится на высоте около 80 км, где отмечен минимум температуры ($\sim 133\text{K}$) и образуются серебристые облака. Второй – выше 115 км, в области, с которой начинают светиться метеорные тела.

Максимум распределения частиц космической пыли в ОКП по размерам близок к 200 мкм (Ануфриев, Болтенков, 2004; Ипатов, 2004).

Можно добавить, что солнечный ветер в значительной степени определяет концентрацию частиц космической пыли в ОКП, действуя как своеобразный чистильщик ближнего космоса (Касименко, Рыхлова, 1995).

Данные о потоке частиц космического мусора на орбитах высотой 400-600 км, полученные по анализу следов их столкновений с панелями СБ (Бургасов, Надирадзе, 2002) и наблюдениям ярких метеоров на высотах 100-120 км (Муртазов, 2003), представлены на рис. 2.1. Естественно, в первом случае присутствует как поток техногенных, так и естественных частиц, и его суммарная величина выше среднего по ОКП в отсутствие метеорных потоков.

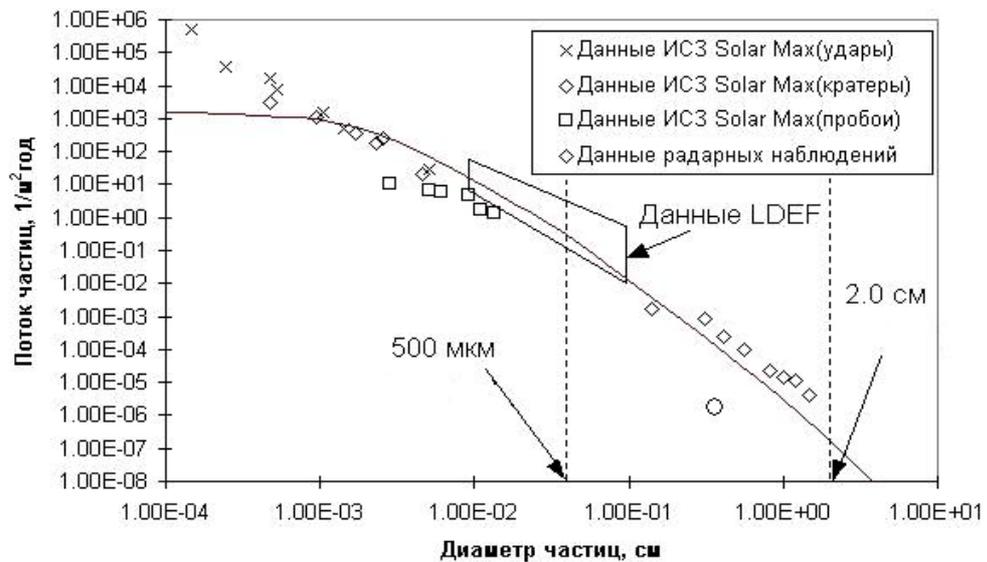


Рис. 2.1. Поток частиц космического мусора в ОКП в функции размеров частиц (○ - среднее для крупных частиц потока Персеиды – Муртазов, 2003)

Существует целый ряд поясов естественного мусора и на более высоких орбитах. В целом ряде работе (Гулак, 1983; Смирнов и др., 2001) рассмотрены результаты регистрации фрагментов космической пыли в околоземном пространстве на искусственных спутниках Земли. На рис. 2.2. (Гулак, 1983) представлены результаты регистрации метеороидных частиц в окрестностях Земли, показывающие их неравномерное распределение в пространстве. Обращает на себя внимание весьма большая концентрация метеорной пыли в районе геостационарных орбит, а также провалы (по аналогии с распределением орбит астероидов главного пояса – люки), в которых такие частицы отсутствуют.

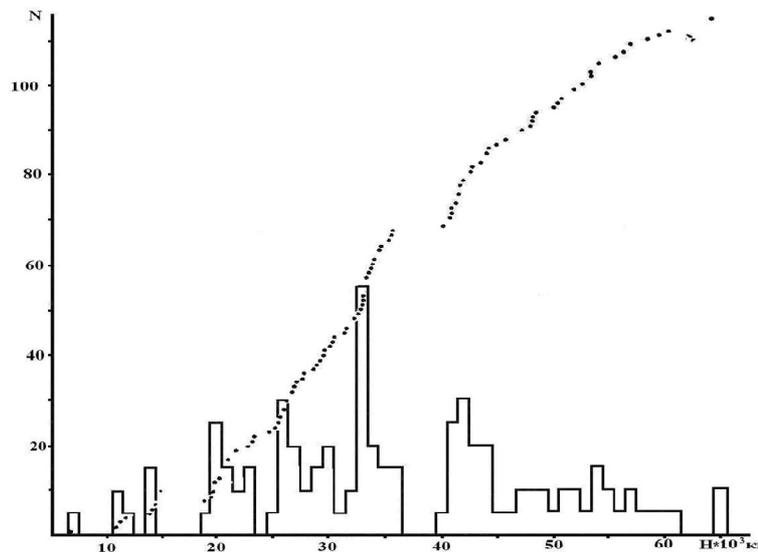


Рис. 2.2. Распределение космической пыли в ОКП

Важно отметить наличие пылевых облаков естественного мусора, расположенных в точках либрации L_4 и L_5 системы Земля-Луна на расстоянии лунной орбиты - так называемые «облака Кордылевского» (Левантовский, 1974; Freitas, Valdes, 1983), имеющие размеры порядка земного шара, но весьма низкую плотность – около $2 \cdot 10^{-5}$ г на

1 км³. Общая масса этих облаков пыли оценивается в 10⁴ тонн. Образование и плотность облаков Кордылевского весьма заметно зависят от солнечной активности и связанной с ней интенсивностью солнечного ветра.

К естественной составляющей ОКП можно отнести также противосияние и натриевый хвост Луны, сведения о котором весьма скудны.

Модель пространственного распределения метеорных тел в плоскости эклиптики в ОКП установлена в нашей стране ГОСТом 256.45.128-85 в 1985 г. Эта модель характеризует распределение в плоскости эклиптики метеорных тел массой 10⁻⁶ – 10² г на удалении от поверхности Земли до 10⁶ км и метеорных тел массой 10⁻⁹ – 10⁻⁶ г на расстояниях 200 – 1000 км.

Естественная составляющая космического мусора, как будет показано ниже, представляет собой, главным образом, смесь частиц метеорного, кометного и астероидного происхождения. Кроме этого некоторая его часть – пыль, образованная в системах планет-гигантов, а также межзвездная пыль.

ГОСТ Р 25645.167-2005 устанавливает модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества размером более 0,1 см на удалении от поверхности Земли от 200 до 2000 км в произвольный момент времени с 2000 г. по 2025 г. Стандарт предназначен для: - использования в расчетах при определении условий функционирования и полета космических аппаратов в околоземном пространстве; - разработки мероприятий по обеспечению экологической безопасности при создании и эксплуатации орбитальных средств; - обоснования и оценки эффективности мероприятий и рекомендаций, направленных на ослабление антропогенного воздействия на космическую среду; - обоснования параметров и условий применения наземной и бортовой аппаратуры, предназначенной для измерения характеристик техногенного вещества в околоземном космическом пространстве

2.1. Основные источники естественного мусора в ОКП

2.1.1. Астероиды

Между орбитами Марса и Юпитера, на расстояниях от 2,2 до 4,5 астрономических единиц от Солнца, располагается главный пояс астероидов. В нем к настоящему времени определены орбиты около трех десятков тысяч малых планет размерами от нескольких сотен метров до сотен километров, а открыты к июню 2004 г. более 220 тысяч астероидов. Кроме того, несколько сотен астероидов, имея сильно вытянутые орбиты, заходят в перигелии внутрь земной орбиты и, имея вероятность столкнуться с Землей, представляют для нее так называемую «астероидную (космическую) опасность».

Движение астероидов подчиняется законам движения планет Кеплера. В современной интерпретации их можно записать в следующем виде (Кононович, 2001).

I-й закон: под действием сил тяготения одно небесное тело движется относительно другого по одному из конических сечений, гиперболы, параболы или эллипсу (в предельном случае – по прямой или окружности). В случае Солнечной системы Солнце находится в одном из фокусов орбиты небесного тела.

В полярных координатах радиус-вектор планеты определяется из общего уравнения конических сечений с полюсом в фокусе кривой

$$r = \frac{p}{(1 + e \cos \varphi)}, \quad (2.1)$$

где $p = \frac{C}{GM}$ - так называемый параметр, e – эксцентриситет кривой второго порядка, C – секторная скорость планеты (модуль вектора ее момента скорости), M – в нашем случае масса Солнца, G – постоянная тяготения.

Для эллиптической орбиты при $0 < e < 1$

$$r = \frac{p}{(1 - e \cos \varphi)} \quad (2.2.)$$

Если $e=1$, ветви кривой уходят в бесконечность при $\varphi=\pi$ (или $\varphi=0$ для уравнения вида 2.2). При $e>1$ существуют две асимптоты при $\cos\varphi=-1/e$ (гипербола). При $e=0$ орбита - окружность.

В этой формулировке первый закон Кеплера справедлив не только для планеты или астероида, обращающихся по эллипсу вокруг Солнца, но и для любой кометы с параболической или гиперболической орбитой.

II-й закон: радиус-вектор, характеризующий положение движущегося тела относительно неподвижного центрального в задаче двух тел, всегда лежит в неизменной плоскости орбиты и за равные промежутки времени описывает площади равной величины.

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{C}{r^2}. \quad (2.3)$$

III-й закон: отношение квадрата сидерического периода обращения планеты к кубу средней полуоси ее эллиптической орбиты есть величина, определяемая только массой Солнца.

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}. \quad (2.4)$$

Распределение больших полуосей орбит известных астероидов приведено на рис. 2.3. Отсюда видно, что большинство астероидов (по крайней мере, из известных сейчас) расположено в главном поясе.

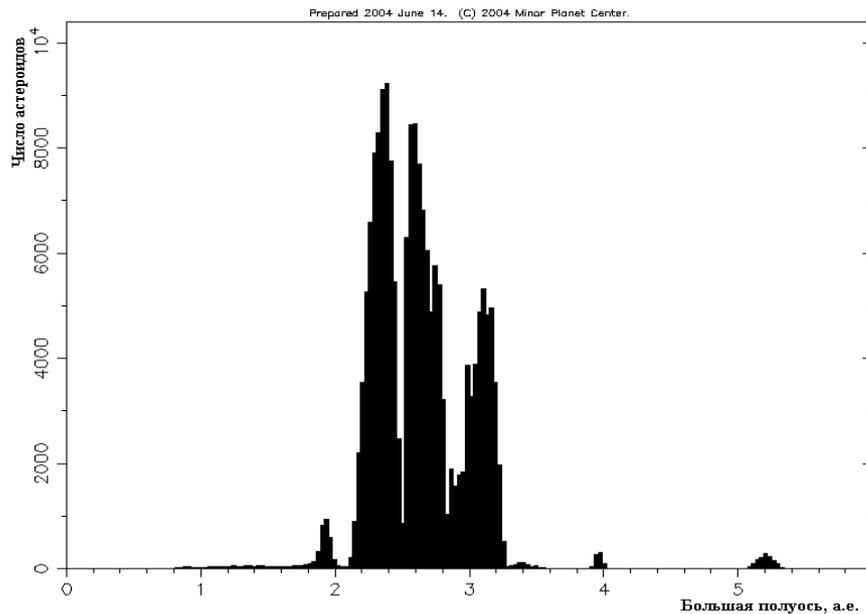


Рис. 2.3. Распределение известных астероидов по большим полуосям

Длительное гравитационное влияние (более 4 млрд. лет) Юпитера на астероиды главного пояса привело к тому, что имеется целый ряд «запретных» орбит или даже зон, на которых малых планет практически нет, а если они туда и попадают, то не могут находиться там продолжительное время. Их называют пробелами или люками Кирквуда (рис. 2.3.) Такие орбиты являются резонансными, поскольку движущиеся по ним астероиды испытывают сильное гравитационное воздействие со стороны Юпитера. Периоды обращения, соответствующие этим орбитам, находятся в простых отношениях с периодом обращения Юпитера (например, 1:2; 3:7; 2:5; 1:3 и др.). Если какой-либо астероид или его фрагмент в результате столкновения с другим телом попадает на

резонансную или близкую к ней орбиту, то большая полуось и эксцентриситет его орбиты достаточно быстро меняются под влиянием гравитационного поля планеты-гиганта. В этом случае астероид либо уходит с резонансной орбиты и может даже покинуть главный пояс астероидов, либо попадает под столкновения с соседними телами. Таким образом, соответствующий пробел Кирквуда «очищается» от любых объектов.

С другой стороны, очевидно, что астероиды с периодом обращения, соответствующим отношению 1:1, находятся прямо на орбите Юпитера. Но они движутся на удалении от него, равном радиусу орбиты, с опережением или отставанием на 60° в точках Лагранжа» L_4 и L_5 , (греки и троянцы).

В отличие от троянцев, которые могли постепенно накопиться в окрестностях точек Лагранжа в течение длительной столкновительной эволюции разных астероидов, есть семейства астероидов с очень близкими орбитами входящих в них тел, которые образовались, скорее всего, в результате относительно недавних распадов соответствующих им родительских тел. Это, например, семейство астероида Флора, насчитывающее около 60 членов, и ряд других (Обрубов, 2000).

В конце прошлого века за орбитой Нептуна был открыт еще один пояс астероидов – так называемый пояс Койпера. Первый объект пояса Койпера диаметром около 280 км был открыт в 1992 г. и получил обозначение 1992 QB1. К 2005 г. было открыто уже более тысячи транснептуновых объектов (рис. 2.4). По параметрам орбит их разделили на несколько классов (Уральская, 2003):

- классические объекты пояса Койпера; их почти круговые орбиты лежат в области 40-50 а.е. от Солнца, а плоскости орбит наклонены к эклиптике менее чем на 40° . Эти объекты не испытывают сильного влияния больших планет; их орбиты остаются практически неизменными;

- резонансные объекты пояса Койпера, или плутино (т.е. «плутончики»). Большие полуоси их орбит близки к 39,5 а.е., а значит их орбитальный период, как и у Плутона (248 лет), соотносится с орбитальным периодом Нептуна как 3:2. Возможно, именно эта резонансная связь с планетой-гигантом служит стабилизирующим фактором для движения плутино. Некоторые плутино пересекают орбиту Нептуна, но никогда не сближаются с ним (как и сам Плутон).

- рассеянные (*scattered*) объекты, «бродяги», имеющие весьма вытянутые орбиты ($e=0,5-0,9$) с большой полуосью 60-100 а.е.; некоторые из них удаляются от Солнца в афелии на 100-200 а.е., а объект 2000 CR105 - даже на 1300 а.е.;

- объекты пояса Казимирчак-Полонской между планетами-гигантами;

Объекты за Нептуном пока трудно отнести к какому-либо классу малых тел Солнечной системы - к астероидам или ядрам комет. Новооткрытые тела имеют диаметр 100-800 км (Эрис больше Плутона – ее диаметр около 2400 км при высоком альбедо, Седна сравнима по размерам с Плутоном – ~1600 км) и очень темную поверхность, что указывает на ее древний состав и возможное присутствие органических соединений.

В связи с открытием крупных астероидов в поясе Койпера 26-й Генеральная Ассамблея Международного астрономического союза в августе 2006 г. приняла новое определение понятия «планета»: 1) это тело обращается вокруг Солнца; 2) оно достаточно велико и массивно, чтобы принять шарообразную форму; 3) рядом с ее орбитой нет тел сравнимых размеров. В связи с этим теперь планет (классических планет) остается 8. Вводится новый класс объектов – «карликовые планеты - плутоны», прототипом которых является Плутон, а самым крупным представителем на сегодня – Эрис (*Eris* - 2003UB313), кроме них – Церера, Харон, Седна.

По различным оценкам, в поясе Койпера около $7 \cdot 10^4$ объектов с диаметрами более 100 км. В целом это скопление малых тел может оказаться в сотни раз массивнее пояса астероидов, расположенного между орбитами Юпитера и Марса, но уступает по массе гигантскому кометному облаку Оорта, простирающемуся на тысячи астрономических единиц от Солнца.

Возможно, пояс Койпера представляет остаток протопланетной туманности, из которой сформировалась Солнечная система.

Имеется целый ряд работ, в которых показано, что при определенных условиях объекты пояса Койпера могут попасть во внутренние области Солнечной системы и стать, таким образом, опасными для Земли (Ипатов, 2000; Маров, Ипатов, 2005).

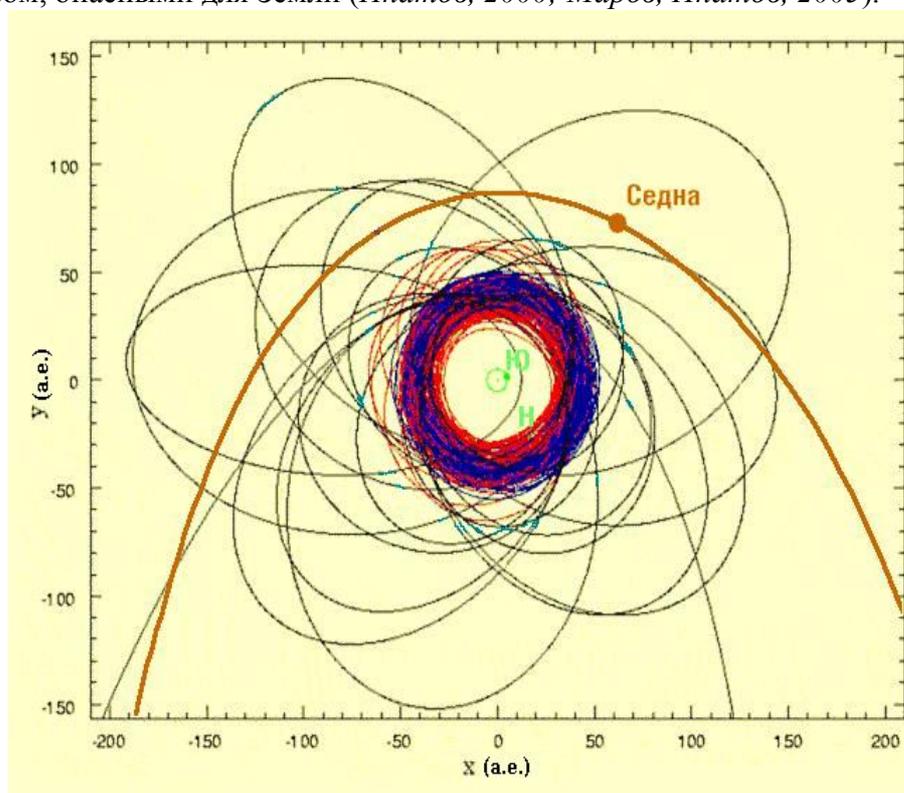


Рис. 2.4. Внешние окраины Солнечной системы. Красный цвет - орбиты плутино, синий - орбиты классических объектов пояса Койпера, черный - орбиты рассеянных объектов пояса Койпера (ApJ Letters, 16.03. 2004)

Среди астероидов, сближающихся с Землей (NEOs – *Near Earth Objects*), выделяют четыре группы объектов (Сокольский, 1992). Всего их к 2006 г. открыто около 4000, потенциально опасных для Земли (имеющих размеры более 1 км) – более 800 (*Near Earth Object Program*).

1. Астероиды типа Амура. К ним относятся астероиды с перигелийными расстояниями 1,33 а.е., но большими, чем афелийное расстояние Земли (1,017 а.е.). Их орбиты подходят к Земле с внешней стороны, никогда ее не пересекая. Таким образом, они не представляют опасности столкновения с Землей в ближайшем будущем.
2. Астероиды типа Аполлона. Объекты с перигелийными расстояниями, меньшими 1,017 а.е. и большими полуосями орбит, превышающими 1 а.е. Их орбиты проникают внутрь орбиты Земли и столкновение их с Землей возможно.
3. Астероиды типа Атона. Большие полуоси орбит менее 1 а.е., но превышающие перигелийное расстояние Земли (0,983 а.е.). Столкновение с Землей возможно.
4. Астероиды типа Х. Орбиты находятся полностью внутри орбиты Земли. Единственный достоверный астероид такого типа открыт еще в 1998 г. Вероятность обнаружения этих объектов современными наблюдательными средствами ничтожна. Опасности для Земли в ближайшем будущем не представляют.
5. Астероиды в резонансных точках орбиты Земли.

Таким образом, потенциальную опасность столкновения с Землей представляют только астероиды, для которых кроме определенной величины большой полуоси орбиты такого астероида, перигелийного и афелийного расстояний, орбита должна пересекать плоскость земной орбиты так, чтобы точка пересечения была на расстоянии 0,983-1,017

а.е. от Солнца. Этим условиям удовлетворяют орбиты астероидов типа Аполлона и Атона. С другой стороны, орбиты астероидов группы Амура могут весьма быстро за 100-1000 лет эволюционировать в NEOs (Маров, 2005).

Общее количество астероидов с диаметром, превышающим 1 км, и пересекающих орбиту Земли, оценивается от 1500 (Toon, Zahnle, 1994) до 2000 (www.nature.ru, 2001). Однако, для астероидов главного пояса, периоды которых соизмеримы с периодом обращения Юпитера (находящиеся в люках Кирквуда), его возмущающее действие резко возрастает. Такие объекты могут быть выброшены из главного пояса, и попасть в разряд астероидов, сближающихся с Землей.

Размеры известных астероидов, пересекающих орбиту Земли варьируются в пределах 6 м–40 км. Одно из последних падений XX века – январь 2000 г. в районе озера Тагиш (Канада). Метеорит, являвшийся по предположениям осколком астероида типа D (немногочисленное семейство красно-черных астероидов с весьма низким альбедо), имел диаметр около 6 метров, массу порядка $2 \cdot 10^8$ кг (www.nature.ru. - 27.08.01). Похожие параметры имел, видимо, и Витимский метеорит (комета?), упавший в сентябре 2002 г. к северу от Байкала.

В минувшем столетии несколько астероидов прошли совсем близко от Земли, в том числе даже на расстоянии 0,007 а.е., что составляет чуть более 1 млн. км. Последним астероидом XX столетия, пролетевшим вблизи Земли, был объект 2000YA (прошел 24.12.2000 г. со скоростью 30 км/с на расстоянии 800 тыс. км от Земли) (www.nature.ru. 24.12.00).

В XXI веке уже наблюдалось несколько астероидов, пролетевших мимо Земли ближе Луны.

По своим физическим характеристикам астероиды разделяют на несколько групп (табл. 2.1), внутри которых объекты имеют сходные отражательные свойства поверхности (Аллен, 1977; Боярчук, 1999; Маров, 2005; Adushkin, Nemchinov, 1994), причем каждая из таких групп имеет аналог метеоритного вещества.

Многочисленные результаты фотометрических и спектральных наблюдений выявили существенные различия в отражательных, спектральных и цветовых характеристиках астероидов, на которые решающее влияние оказывает положение астероида внутри пояса. В соответствии с этими свойствами астероиды подразделяют на 18 классов, вещество многих из которых имеет аналоги среди метеоритного вещества.

Таблица 2.1

Основные таксонометрические типы астероидов

Тип	Альбедо	Минералогия	Метеоритный аналог
C	Низкое 0,03-0,07	силикаты+непрозрачный материал (углерод)	углистые хондриты
S	умеренное	силикаты+металл	железо-каменные
M	умеренное	металл с примесями	никеле-железные эк- статитовые хондриты
E	Высокое 0,10-0,25	нейтральные силикаты	акстатитовые ахондриты
R+Q	от умерен- ного до высокого	оливин+пироксен+металл	обычные хондриты
V	умеренное	пироксен+фелдспар	нет
A	умеренное	оливин+металл	брахиниты

Наиболее распространенными астероидами являются астероиды типов C, S и M. В главном поясе соотношение астероидов этих типов составляет 7:5:1, однако, для

сближающихся с Землей астероидов это соотношение совершенно меняется: 3:7:1. Причем среди астероидов, сближающихся с Землей, имеются астероиды типа Q, а в главном поясе эти типы вообще отсутствуют.

Поверхность астероидов несет на себе следы интенсивной ударной бомбардировки. КА *NEAR*, совершивший в 2001 г. первую посадку на поверхность астероида Эрос, обнаружил кроме уже известных ударных кратеров на его поверхности большое количество каменных блоков размерами в несколько десятков метров и количеством в несколько тысяч, что свидетельствует о частых в прошлом столкновениях малых планет (Маров, 2005).



Рис. 2.5 Астероиды главного пояса Матильда (59х46 км), Гаспра и Ида, изображенные в одном масштабе

2.1.2. Кометы

Кометы являются, как считается, основными поставщиками пыли в Солнечной системе в районе земной орбиты.

подавляющее большинство комет состоит из твердого ядра, окруженного газопылевой оболочкой – комой. С приближением кометы к Солнцу под действием солнечного ветра и светового давления у нее образуется хвост, направленный, чаще всего, в сторону противоположную Солнцу. Длина хвостов в среднем составляет до 10 млн. км, в особых случаях – до 150 млн. км. Ядро по современным представлениям состоит из смеси водяного льда с замороженными в него легколетучими веществами и, возможно, крупными камнями. Размер ядер короткопериодических комет составляет 0,6-12,5 км, долгопериодических – от 1 до 33 км. Рекорд принадлежит комете Хейла-Боппа (рис. 2.6) 1995-97 гг. диаметр ядра которой по разным оценкам составлял от 45 до 100 км (Гнедин, 2005; Сазонов, 2000а). Сюда же можно, видимо, отнести и Хирон.



Рис. 2.6. *Комета Хейла-Боппа.*
Очень хорошо видно разделение хвоста на газовый и пылевой

Всего по данным каталога Б. Марсдена в период с 1059 г. до н.э. по 1995 г. зафиксировано появление 2335 комет.

Общее количество комет в Солнечной системе по разному оценивается разными авторами и эти оценки дают числа в пределах 10^{12} - 10^{15} (Боярчук, 1999; Герасимов, Мушаилов, 2000; Цицин, 2000; Чурюмов, 2002а,б).

По параметрам орбит кометы разделяются на три группы.

1. Короткопериодические кометы.

Периоды обращения вокруг Солнца < 20 лет, средний – 8,3 г., среднее значение большой полуоси орбиты 3,4 а.е., перигелийного расстояния - 1,6 а.е.

2. Среднепериодические кометы.

Периоды от 20 до 200 лет при среднем – 81 год. Среднее значение большой полуоси орбиты 38 а.е., среднее значение перигелийного расстояния 0,9 а.е. В дискообразном поясе Эджворта-Койпера находится, по разным оценкам, кроме $\sim 10^5$ ледяных тел размерами 10-500 км также до $\sim 10^9$ кометных ядер размерами около 20 км и суммарной массой, составляющей 10% массы Земли (Маров, 2005).

3. Долгопериодические кометы.

Периоды обращения вокруг Солнца больше 200 лет. Среднее значение перигелийного расстояния 1,1 а.е.

Долгопериодические кометы являются, в основном, выходцами из внешнего сферического пояса Оорта (20 тыс. а.е. ÷ 100 тыс. а.е.), образовавшегося из планетезималей, выброшенных из области планет-гигантов в период образования Солнечной системы. Отток комет из него компенсируется их приходом из более плотного внутреннего сферического облака Хиллса с большими полуосями орбит 1 тыс. а.е. ÷ 20 тыс. а.е. Масса облака Хиллса на два порядка может превышать суммарную массу тел облака Оорта (ожидаемое число кометных ядер в облаке Хиллса $\sim 10^{13}$ - 10^{14} - Герасимов, Мушаилов, 2000). Наряду с этими резервуаром кометных тел могут считаться пояса Казимирчак-Полонской между орбитами планет-гигантов (между Ураном и Нептуном, к примеру, сохранилось до 0,5% планетезималей) (Цицин, 2000).

В настоящее время поток комет из облака Оорта в окрестности Солнца составляет, как считают, около 5 комет в год.

Долгопериодические кометы от значения меры их орбитальной энергии подразделяются на классы, из которых можно выделить так называемые *sungrazers* - семейство комет Крейца (более 300 комет), имеющих исключительно малые перигелийные расстояния – эти участки их орбит «царапают» Солнце, то есть проходят частично во внешней солнечной атмосфере – короне (Savage, 2002).

Подавляющее большинство комет обращается вокруг Солнца по вытянутым эллиптическим орбитам. Сейчас известно около 700 долгопериодических комет с периодами обращения более 200 лет. Известно также около 30 комет, весьма близко приближающихся к Солнцу в перигелии. Примерно 15% всех известных комет приходят из периферических районов Солнечной системы и имеют орбиты, близкие к параболическим. Наклоны орбит долгопериодических комет к плоскости эклиптики распределены хаотически.

Наклоны орбит коротко- и среднепериодических комет (периоды менее 200 лет) к плоскости эклиптики малы. Таких комет известно свыше 200. Предполагается, что короткопериодические кометы произошли из долгопериодических в результате эволюции орбит последних под возмущающим действием больших планет, главным образом, Юпитера. Соответственно, группа комет семейства Юпитера намного более многочисленна, нежели других больших планет, так как гравитационные возмущения от него в 10 раз больше, чем от Сатурна и в 100 раз больше возмущений от всех остальных планет. Есть предположение (обоснованное еще Всехсвятским), что некоторые короткопериодические кометы являются продуктами вулканической деятельности Ио и Тритона.

На рис. 2.7 показано распределение известных комет по величине их афелийного расстояния в сравнении с расстояниями больших планет (Боярчук, 1999; Инамов, 2000).

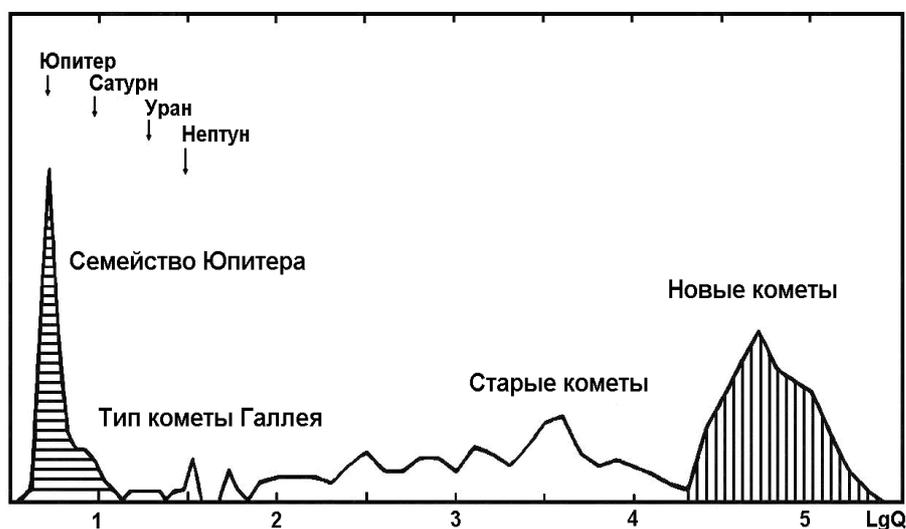


Рис. 2.7. Распределение афелийных расстояний Q известных комет

Особую область занимают «новые» кометы с почти параболическими орбитами. Небольшое их количество, возможно, приходит из межзвездной среды, и эти кометы не являются членами Солнечной системы. Вообще, проблема захвата Солнечной системой межзвездных комет чрезвычайно актуальна и активно рассматривается многими исследователями (Томанов и др., 1994; Bagrov, Perov, 2001).

Оценка количества комет, сближающихся с Землей, более трудна, чем астероидов. Орбиты комет, как правило, очень неустойчивы и быстро меняются. Причина этого в

возмущениях со стороны планет и быстрая потеря кометами своей массы. К тому же, до сих пор неизвестен механизм происхождения комет. От того, как произошли (или в настоящее время происходят) кометы, зависит мера обусловленной ими доли астероидно-кометной опасности. Вместе с тем известно, что долгопериодические околопараболические кометы обладают в районе земной орбиты большими скоростями, чем короткопериодические кометы и астероиды. Орбиты долгопериодических комет ориентированы случайным образом по отношению к плоскости эклиптики. В связи с этим возможны их лобовые соударения с Землей с относительными скоростями до 72 км/с. Это может составить энергию порядка 10^5 Мт тротилового эквивалента.

Кометы, принадлежащие разным группам, представляют разную опасность с точки зрения столкновения с Землей. Для того, чтобы столкновение с Землей было возможно, комета должна иметь перигелийное расстояние, меньшее 1 а.е. Анализ показывает, что этим как раз и отличаются долгопериодические кометы.

Сейчас известно 13 комет и 15 остатков комет семейства Юпитера с перигелийными расстояниями, меньшими 1 а.е. По некоторым оценкам, общее их количество с размерами головы более 1 км может составлять около 800.

Характерное время до соударения с Землей потенциально опасной кометы семейства Юпитера составляет 770 млн. лет, скорость соударения – около 23 км/с.

Это же время для кометы типа Галлея составляет около 6 млрд. лет, скорость соударения – 45 км/с.

Количество долгопериодических и «новых» комет в Солнечной системе может достигать нескольких миллионов. В среднем ежегодно появляется одна такая комета с диаметром ядра свыше 15 км. Характерная скорость соударения с Землей для этих комет составляет 53 км/с.

Следует отметить, что вопрос о наличии вблизи Земли мини-комет, широко обсуждавшийся на рубеже 90-х гг. XX в. (Yeates, 1989), видимо, получил свое решение (Боярчук, 1999). Мини-кометы – это рыхлые ледяные тела, покрытые слоем пыли, размерами порядка 10 м, массой около 100 т. При попадании в атмосферу Земли с частотой около 10 в год (хотя, есть и другое мнение – Сазонов, 2000а) взрываются. Энергия взрыва оценивается от нескольких до сотен килотонн.

2.1.3. Метеорное вещество

Наконец, орбиту Земли ежегодно пересекают несколько десятков метеорных потоков, состоящих из тел малого размера: менее 0,1 см – пылевой составляющей и от 0,1 см до 100 м – метеороидов. В настоящее время известно около 20 главных метеорных потоков с часовыми числами 20-140 метеоров в час (табл. 2.2). Кроме них выделяют до 6000 малых метеорных потоков или ассоциаций (Обрубов, 2000).



Рис. 2.8. Метеорный поток

Воздействие метеорного потока на ОКП, атмосферу и, в конечном итоге, на Землю определяется его шириной, скоростью метеоров относительно Земли и числом крупных объектов в потоке.

Таблица 2.2. дает представление о скорости и пространственной плотности частиц в основных метеорных потоках, пересекающих земную орбиту в течение года, а также в спорадических потоках, появление которых непредсказуемо.

Достаточно полные данные о метеороидах самых мелких размеров позволяют выделить среди них 5 популяций (Боярчук, 1999):

1. Внутренние;
2. Астероидные;
3. Гало-метеороиды;
4. Метеороиды с большим наклоном орбиты (*i*-метеороиды);
5. Эксцентриситетные или *e*-метеороиды.

Таблица 2.2

**Средняя пространственная плотность основных метеорных потоков
в районе земной орбиты**

Поток	Период активности	Визуальное часовое число в максимуме	Скорость относительно Земли, км/с	Средняя плотность, км ⁻³	Родительская комета
Квадрантиды	1-4 января	50	41	$44 \cdot 10^{-9}$	Мачхолца 1986 VIII
Лириды	19-24 апреля	5	48	$8 \cdot 10^{-9}$	Тэтчер 1861 I
η -Аквариды	1-8 мая	20	66	$7 \cdot 10^{-9}$	Галлея 1910 II
Персеиды	15 июля-25 авг.	60	60	$15 \cdot 10^{-9}$	Свифта-Туттля 1862
Тауриды	15 сент.-1 дек.	(5)	30	$28 \cdot 10^{-9}$	Энке 1971 II
Дракониды 1933 1946	8-10 октября	$5 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^4$	50	$1,8 \cdot 10^{-4}$ $3,6 \cdot 10^{-4}$	Джиакобини-Циннера
Ориониды	18-26 октября	20	66	$1 \cdot 10^{-9}$	Галлея 1910 II
Леониды 1866	14-20 ноября	(5)	72	$1 \cdot 10^{-9}$ $8 \cdot 10^{-7}$	Темпеля-Туттля 1866
Геминиды	7-15 декабря	(5)	72	$132 \cdot 10^{-9}$	
Спорадические потоки			11,2-72	$1,1 \cdot 10^{-6}$ - $1,2 \cdot 10^{-5}$	

В своем большинстве массы метеороидов заключаются в пределах $10^{-7} \pm 10^7$ г. Однако, такой метеороид, как Тунгусское тело ($\sim 10^{12}$ г), а также осколки кометы Шумейкеров-Леви 9, влетевшие в атмосферу Юпитера в июле 1994 г., увеличивают этот диапазон до 10^{16} - 10^{17} г. Кроме того, микронная фракция естественного мусора и частицы, появляющиеся в результате термоэрозии болидных хвостов, быстро тормозящиеся в верхних слоях атмосферы и затем медленно (до двух лет) оседающие в атмосфере, расширяют диапазон масс пылевых частиц в ОКП до 10^{-6} - 10^{-7} г (Турский, 2000). Более мелкие частицы тормозятся в атмосфере раньше, чем нагреваются до температуры испарения и начинают светиться.

Радианты метеорных потоков имеют неравномерное распределение на небесной сфере. Различаются шесть основных областей направлений потоков метеорных тел на Землю (рис.2.9).

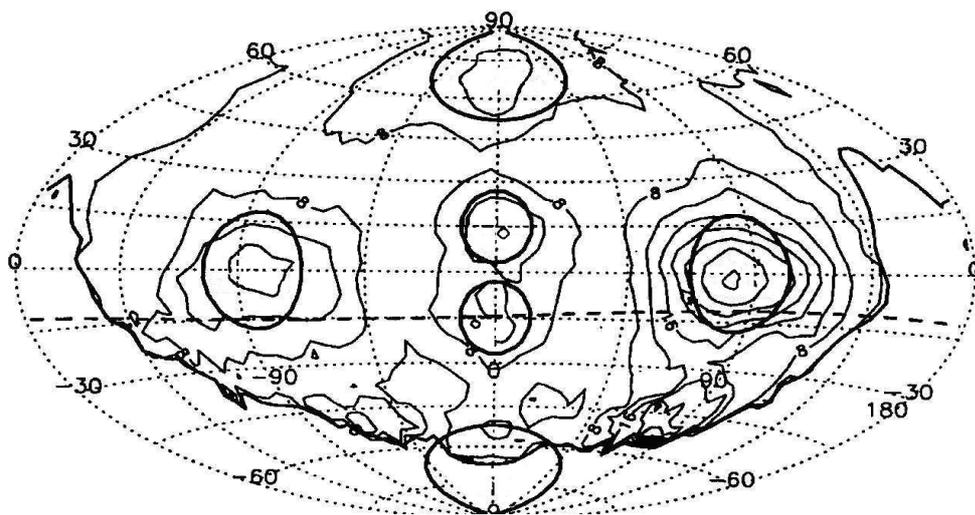


Рис. 2.9. Расположение основных радиантов метеорных потоков на небесной сфере: I - направление на Солнце; II – противосолнечное направление; III – северная тороидальная составляющая; IV – южная тороидальная составляющая; V – северная составляющая апекса орбитального движения Земли; VI – его южная составляющая

Неисследованным является до сих пор вопрос о существовании и наблюдениях метеоров галактического происхождения и предпринимаются попытки выделения радиантов межзвездных метеорных потоков, располагающихся в районах апекса и антиапекса Солнца (Перов, Багров, 2001; Bagrov, Perov, 2001).

Связь метеорных потоков с кометами (табл. 2.2), остатками которых они являются, очевидна. Спокойный распад комет на большой дуге орбиты в окрестностях перигелия при сублимации замерзших газов – наиболее вероятный путь образования метеороидного роя. Хотя не исключается возможность образования роя при катастрофических процессах разрушения ядра кометы под действием приливных, центробежных или иных сил и при возможных столкновениях его с астероидами или крупными метеороидами (Обрубов, 2000).

Примером может служить яркая вспышка кометы Галлея 1986 г.

Характерной особенностью кометы Хейла-Боппа 1995-97 гг. была ее необычайная активность. Начиная с момента обнаружения астрономы регистрировали непрерывно извергающиеся из ее ядра газовые и пылевые струи (джеты), а также сферические и конические выбросы и оболочки, арочные структуры и другие образования, состоящие из газовых молекул и пылевых частиц. Многими наблюдателями отмечалось существование четырех и более оболочек газовой и пылевой материи.

В 2006 г. космический телескоп NASA [Spitzer](#), работающий в инфракрасном диапазоне, впервые позволил разглядеть пылевой след, оставляемый в пространстве распадающейся кометой Швассмана-Вахмана 3 (под действием солнечного света пыль нагревается и переизлучает в инфракрасном диапазоне) и состоящий как из мелких частиц миллиметрового размера, так и из относительно крупных камней (рис. 2.10)

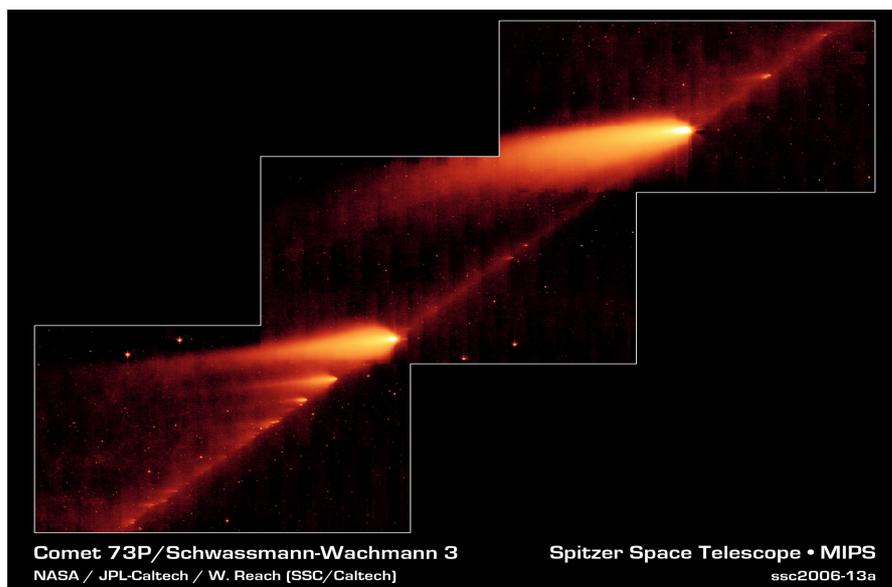


Рис. 2.10. Распад кометы Швассмана-Вахмана 3

В 1908 г. произошло столкновение Земли с Тунгусским телом, которое как предполагают некоторые авторы, являлось фрагментом ядра кометы Энке, но принадлежало уже метеорному потоку β -Тауриды, прародительницей которого и являлась комета (*Бронитен, 2000*).

Плотность железных метеоритов $\approx 7,6 \text{ г/см}^3$, каменных $\approx 3,5 \text{ г/см}^3$, рыхлых каменных $\approx 2,2 \text{ г/см}^3$.

Хотя метеороидные частицы близки по химическому составу к каменным и железным метеоритам, они тормозятся в атмосфере так, будто плотность их весьма мала: среднее значение плотности метеороидов в метеорных потоках составляет $0,28 \text{ г/см}^3$, что свидетельствует в пользу их кометного происхождения. Таким образом, размеры метеороидов варьируются в пределах от 10^{-5} см до $\sim 10 \text{ км}$.

Здесь следует отметить, что в отличие от космической пыли ядра комет имеют рыхлую структуру и с потерей летучего компонента разваливаются на многочисленные осколки.

Метеоры, болиды и астероиды располагаются в Солнечной системе примерно в одной и той же области. Это означает, что метеорные потоки связаны не только с кометами, но и с астероидами. Примером может служить Хирон - первый открытый объект (1977 г.) пояса Койпера. Его первоначально считали астероидом, однако через 10 лет после открытия он резко начал увеличивать свой блеск, то есть повел себя как комета. К настоящему времени накоплено достаточно фактов, свидетельствующих о том, что Хирон является гигантской кометой с диаметром ядра до 200 км.

Значительная часть метеороидов сосредоточена в метеорных потоках. Но метеорные потоки имеют достаточно ограниченный срок существования. Так как метеорные частицы распределены по всей длине орбиты потока, то гравитационное воздействие больших планет оказывается для каждой частицы различным. Этот эффект приводит к достаточно быстрому размыванию потока (несколько десятков тысяч лет).

Единого мнения об образовании метеорных потоков не существует. Однако общепризнанны следующие механизмы их образования (*Боярчук, 1999*):

1. Выброс вещества при дезинтеграции кометных ядер (сублимация, взрывные процессы, полное разрушение ядер);
2. Одновременное образование комет и метеорных потоков при дезинтеграции более крупных тел;

3. Дробление астероидов при столкновениях.

Так, метеорный комплекс Таурид, образовавшийся, как считалось при разрушении ядра кометы Энке, включает в себя также несколько астероидов группы Аполлона (*Worlds in interaction, 1996*). Сейчас в этом комплексе найдены 14 астероидов и крупный метеороид, разделенные на две группы, образовавшиеся около 20 тыс. лет назад. Размеры макротел комплекса Таурид составляют 0,5-2,0 км. Объекты комплекса Таурид могут сталкиваться с Землей.

В табл. 2.4 приведены данные о связи некоторых астероидов с метеорными потоками (*Волощук, 1995*).

Таблица 2.3

Связь астероидов с метеорными потоками

Астероид	Метеорный поток	Астероид	Метеорный поток
1566 Icarus	Arietids, Taurids-Perseids	2201 Oljato	Canids, χ -Orionids
1620 Geographos	March Virginids, Φ -Bootids	3200 Phaethon	Geminids, Day Sextantids, Canis Minorids, δ -Leonids
1862 Apollo	η -Librids, χ -Scorpiids	4015 Wilson-Harrington	δ -Cygnids
2062 Aten	ω -Draconids, Φ -Bootids	1937 UB (Hermes)	χ -Piscids, ε -Arietids, δ -Arietids, δ -Piscids
2101 Adonis	Capricornids-Sagittarids, χ -Sagittarids, χ -Capricornids, Scorpiids-Sagittarids, δ -Capricornids, α -Capricornids	4179 Toutatis	κ -Aquarids

В последнее десятилетие подробно проработаны механизмы, способные изменить орбиту астероида и сделать его опасным для Земли.

Ранее механизм трансформации орбит астероидов основного пояса в вытянутые и пересекающие земную орбиту приписывался гравитационным возмущениям Марса. Согласно современным представлениям, существует возможность резкого увеличения эксцентриситета орбиты астероида под действием резонансных возмущений Юпитера.

Моделирование показало, что высокоскоростные столкновения и планетные возмущения могут вызвать появление в районе земной орбиты значительного числа осколков астероидов из основного пояса. Моделируя выброс осколков с поверхности 2355 нумерованных астероидов, удалось выявить список астероидов - наиболее эффективных потенциальных поставщиков метеоритов. Результат согласуется с заключением, что большинство метеоритов и околоземных астероидов может происходить от небольшой части астероидов. Один из лучших кандидатов - 200-километровый астероид (6) Геба. Орбита одного из смоделированных осколков этого астероида оказалась очень близка к орбите метеорита Пшибрам. Кроме того, на Гебе есть кратер, возникновение которого можно объяснить столкновением с километровым астероидом. Частота возможных столкновений такого рода – одно за 20 млн. лет. То есть такие столкновения – довольно редкое явление и, по мнению многих ученых, не могут обеспечить наблюдаемое число околоземных объектов. (*Обрубов, 2000*)

Кроме притяжения Солнца и больших планет метеороиды испытывают влияние сил различной негравитационной природы. В литературе описано более двух десятков эффектов, которые могут изменять как физические характеристики метеороидов, так и оказывать влияние на их движение.

Наиболее существенное влияние на движение метеороидов крупнее 0,001 г могут оказать эффекты, связанные с давлением солнечного излучения, а на изменение их масс - столкновения с микрометеороидами спорадического фона.

Эффектом Пойнтинга-Робертсона называют тормозящую силу, возникающую при поглощении и переизлучении метеороидом солнечных фотонов и пропорциональную его орбитальной скорости. Наиболее ярко эффект проявляется для частиц размерами 0,5-100 мкм (Мартынов, 1971). Вследствие этого секториальная скорость ($r^2 \frac{d\varphi}{dt}$) метеороида

непрерывно убывает пропорционально углу поворота радиуса-вектора. Действие эффекта Пойнтинга-Робертсона (и его корпускулярного аналога – протонов солнечного ветра) проявляется в вековом уменьшении большой полуоси и эксцентриситета орбиты метеорной частицы. В итоге частица, двигаясь по спирали, упадет на Солнце. Время падения пропорционально размеру частицы. Для круговой орбиты оно составляет

$$\tau = 6,5 * 10^6 * a * \rho * r_0^2 \text{ лет,} \quad (2.5)$$

если исходный радиус орбиты r_0 (а.е.). Для железного метеороида с плотностью $\rho=8$ г/см³ и размерами $a=10$ мкм время падения $\tau \approx 5 * 10^4$ лет с расстояния земной орбиты, для рыхлой частицы кометного происхождения с $\rho=8$ г/см³ $\tau=6500$ лет. Падение частицы, имеющей первоначальную эллиптическую орбиту, произойдет еще быстрее.

Открытие эффекта Пойнтинга-Робертсона подтвердило вывод о том, что метеороидные рои не могли образоваться в тот же период, что и кометы или астероиды, а являются продуктами их относительно недавней дезинтеграции.

Самые мелкие метеоритные частицы выметаются из Солнечной системы световым давлением, и наличие их в районе земной орбиты обусловлено распадом ядер комет.

2.2. Отходы техногенного происхождения в околоземном космическом пространстве

Наиболее близкой и значительно более актуальной для экологии такой динамической системы, как система «Земля–ОКП», является проблема искусственного (техногенного) космического мусора.

В первые годы освоения космического пространства вопрос о его загрязнении и влиянии этого загрязнения на земную природу вообще не ставился. Околоземная область функционирования искусственных космических объектов достаточно обширна: ее объем составляет величину порядка $10^{14} - 10^{15}$ км³. Но все же, активная антропогенная деятельность в последние годы стала весьма ощутимо сказываться и здесь.

В первом приближении оценки загрязнений среды можно сделать для трех существенно различных зон (Ивлев, 2001):

- . загрязнение поверхности Земли, нижней и средней атмосферы при запуске ракет,
- . загрязнение мезосферы и ионосферы,
- . загрязнение ближнего космоса.

Распределение частиц разных размеров в нижней части ОКП, захватывающей ионосферу, экзосферу и частично магнитосферу, представлено на рис. 2.7 (Дмитриев, Шитов, 2003).

По данным Совета национальной безопасности США, на орбитах высотой от 200 до 5500 км к 2010 г. скопится 12 тыс. т. мусора, что составит 1,2% от общего веса газа в верхней атмосфере.

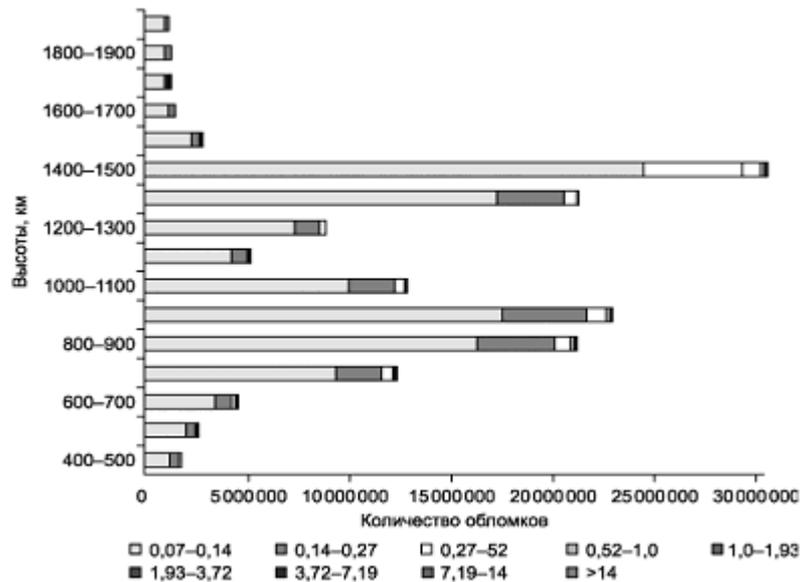


Рис. 2.11. Распределение мусора в нижней части ОКП

С 1957 г. на различные околоземные орбиты и в далекий космос запущено около 22 000 искусственных космических объектов. Более половины из них снизились и сгорели в атмосфере. Около 7 000 остается на орбитах.

В результате взрывов и разрушений верхних ступеней ракет, самих спутников на околоземных орбитах общее число объектов диаметром более 1 см (то есть, начиная с доступных наблюдениям на низких орбитах радиолокационными средствами) оценивается в 30–70 тысяч единиц общей массой свыше 3 тысяч тонн.

Среди отслеживаемых службами контроля космического пространства функционирующие искусственные космические объекты составляют около 6%, окончившие активную работу – 21%, тела ракет – 16%, мусор от запусков – 12%, осколки – 45%. По оценкам Стратегического Командования США 2005 года (www.spacenews.ru – 06.07.2005) на околоземных орбитах обращаются более 13 тыс. искусственных объектов. Из них примерно 7% составляют действующие спутники, 13% - бесхозные корпуса ракет. Количество неотслеживаемых объектов с поперечниками от 1 мм до 1 см оценивается в $3,5 \cdot 10^6$. Таким образом, наибольшее количество объектов, находящихся на орбитах, это как раз и есть космический мусор. Образуется он, главным образом, в результате разрушений искусственных космических объектов, более 20 лет находящихся на орбите: каждый разрушившийся объект дает в среднем от 6 до 50 осколков, хотя бывают и значительные отклонения в сторону увеличения числа осколков (*Orbital Debris, 1995; Orb. Debr. Q.N., 2000*).

Говоря о распределении искусственного космического мусора в околоземном пространстве, можно отметить его нахождение в зоне наиболее заселенных орбит. Таких наиболее заселенных зон две: геостационарные орбиты на высотах около 40 тысяч км от Земли и орбиты на высотах 800–1000 км. Можно еще отметить зону пилотируемых полетов на высотах около 300 км и солнечно-синхронные орбиты. Геостационарная орбита наиболее плотно заселена объектами в количестве около 600 (из них более 100 – российские – 2002 г.).

Ежегодно к ним прибавляется около 20–30 новых плюс значительное количество обломков как от вспомогательного оборудования, так и старых разрушившихся спутников. К ним по засоренности примыкают солнечно-синхронные орбиты. На высотах 800–1000 км долгое время располагалась основная масса спутников с ядерными

энергетическими устройствами на борту, поскольку здесь они могут существовать сотни лет до полного исчезновения продуктов ядерного распада.

В структуру техногенного космического мусора входят также продукты экспериментов в космосе, попадающие после разрушения объектов на орбиты и падающие на Землю: продукты распада вещества космических ядерных реакторов, продукты технологических и биологических экспериментов, большое число частиц окиси алюминия, попадающих в космос и верхнюю атмосферу в результате работы реактивных двигателей, остатки ракетного топлива, окислителя и т.д. (*Jackson, Bernhard, 1997*).

Кроме того, процессы газовой выделенности и сублимации материалов в вакууме приводят к образованию около КА облака собственной внешней атмосферы, в состав которого входят также твердые частицы, отрывающиеся от поверхности аппарата, продукты выхлопа двигателей, газы и твердые частицы, попадающие в космическое пространство из внутренних отсеков КА за счет утечек, при шлюзовании и т.д. (*Физика косм. простр., 1997*).

Плотность собственной внешней атмосферы КА величины порядка 10^{-8} - 10^{-10} кг/м³, тогда как плотность атмосферы Земли на высотах пилотируемых полетов $\sim 10^{-12}$ кг/м³.

Каждая из фракций антропогенного загрязнения распространяется в ОКП под действием различных процессов.

Крупные фрагменты и осколки космического мусора разлетаются в ОКП по различным орбитам, создавая вокруг Земли искусственный пояс, который может существовать длительное время, испытывая вековые возмущения вследствие аэродинамического сопротивления разреженной атмосферы, плазмы магнитосферы и солнечного ветра. Одним из существенных факторов эволюции этого пояса являются взрывы пассивных или действующих ИСЗ и их столкновения с другими ИСЗ или космическим мусором. Динамика их движения описывается кеплеровскими уравнениями движения с учетом сопротивления среды и взаимных столкновений. Постепенно часть осколков, находящихся на низких орбитах, теряет высоту и сгорает в атмосфере. Наиболее крупные фрагменты могут выпасть на поверхность Земли.

Микрочастицы, образуемые в ОКП в результате взрывов, выбросов двигателей ракет-носителей, распространяются в виде некоторого рассеивающего облака. На высотах 200-500 км облака таких частиц с размерами от долей микрона до сотен микрон находятся на орбите от нескольких часов до нескольких суток. Эволюция микрочастиц во многом носит статистический характер, учитывая их более высокую числовую плотность и, соответственно, более высокие вероятности взаимных столкновений. Уход их с орбиты и рассеяние в пространстве вызывается значительным атмосферным торможением. В конечном итоге микрочастицы также попадают в плотные слои атмосферы и тормозятся. Часть из них пополняет пылевую фракцию на высотах мезосферы, другие опускаются в более низкие слои.

Распространение газовой фракции в общем случае описывается кинетическими уравнениями больцмановского типа (*Шематович, 1993*). После установления теплового равновесия с окружающей средой происходит перенос и диффузия газового облака под действием атмосферных процессов. При этом наряду с динамикой важную роль играют процессы химического взаимодействия между веществом выброса ракет-носителей и составляющими атмосферы.

При оценке степени засоренности ОКП техногенными объектами, расчете вероятности их взаимных столкновений, анализе экологических последствий загрязнения и связанных с ним процессов, возникает потребность построения высотно-широтного распределения объемной плотности космических объектов (*Назаренко, 1993*) на заданный момент времени $\rho(h, \varphi)$, где h - высота объекта над поверхностью Земли, φ - географическая широта. Для анализа объемной плотности, учитывая большое число объектов в ОКП, используется статистическая плотность распределения космических объектов по высоте и широте

$$q(h, \varphi) = \frac{\partial^2 N(h, \varphi)}{\partial h \partial \varphi}. \quad (2.6)$$

Здесь $N(h, \varphi)$ – число объектов с текущими значениями высоты $h(t)$ и широты $\varphi(t)$, которое находится в области $h(t) < h$, $\varphi(t) < \varphi$. При естественном предположении, что распределение искусственных космических объектов по долготе является равномерным, знание распределения $q(H, \varphi)$ позволяет легко определить объемную плотность числа космических объектов

$$\rho(h, \varphi) = \frac{q(h, \varphi)}{2\pi(h + R_{\text{земли}})^2 \cos \varphi}. \quad (2.7)$$

Функция $q(H, \varphi)$ и общее количество техногенных объектов (N) в исследуемой области пространства связаны соотношением

$$N = \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} q(h, \varphi) dh d\varphi. \quad (2.8)$$

Естественной информационной основой построения высотно-широтного распределения техногенных объектов в ОКП является использование достаточно полного каталога орбитальных данных космических объектов. В работах (Назаренко, 1993; Назаренко, Чернявский 1995) представлены полученные на математической модели данные о количестве образовавшихся, сгоревших и оставшихся искусственных объектов на интервале прогноза с 1960 по 2004 год. Ожидаемый объем каталога в 2004 г. для объектов с высотами до 2000 км составляет около 7000. В прогнозируемых данных четко выражены два максимума плотности объектов на высотах 800-1000 и 1300-1500 км. Качественно и количественно результаты моделирования хорошо совпадают, а также показывают, что на больших высотах число объектов растет быстрее, чем на малых. Тенденция к стабилизации числа объектов заметна только на высотах до 600 км.

На рис. 2.12 показано высотное распределение плотности потока искусственных объектов размерами от 10 см. Наибольшая плотность потока наблюдается на низких околоземных орбитах в области высот 800-1000 и 1300-1500 км, достигая одного тела в кубе со стороной около 300 км. Следующий пик в высотном распределении плотности потока наблюдается в области геостационарной орбиты (высота ~36000 км), однако абсолютное значение плотности потока искусственных объектов здесь на 2 порядка ниже, чем на низких орбитах.

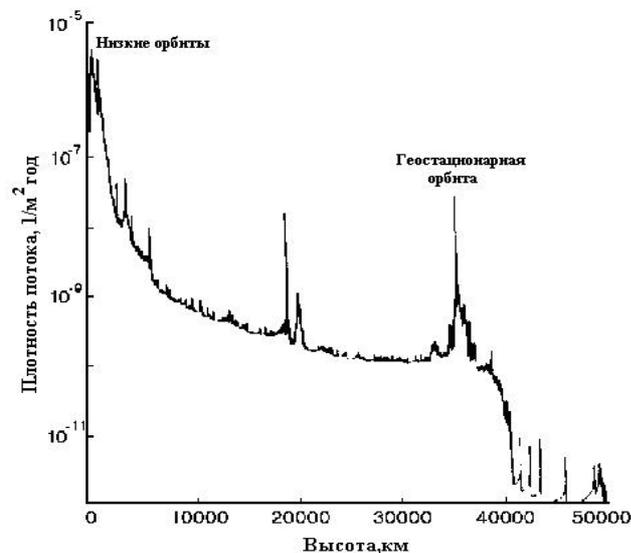


Рис. 2.12. Плотность потока мусора техногенного происхождения в ОКП

Можно перечислить основные модели орбитального мусора, используемые различными службами в настоящее время (*Назаренко, 2001*):

- NASA: используя специальные программы для моделирования эволюции мусора от различных источников и проводя непосредственную экспериментальную проверку, построено несколько моделей техногенного мусора в ОКП;

- ESA применяет модель, описывающую поток искусственного и естественного мусора размерами частиц более 1 микрона в ОКП относительно заданных пользователем орбит;

- Росавиакосмос: в качестве стандартной принята модель SDPA. Отличительной характеристикой модели является метод моделирования динамики среды техногенного мусора, позволяющий эффективно отслеживать влияние различных факторов, в частности, активности Солнца. Текущее состояние загрязнения ОКП характеризуется зависимостью концентрации космического мусора от высоты и широты точки и статистическими распределениями величины и скорости частиц в инерциальной системе координат. Эти характеристики построены на базе комплексного использования доступной измерительной информации и различных априорных данных (*Назаренко, 2001*);

- BNSA: Учитывается влияние на техногенный мусор атмосферного торможения, гармоник потенциала гравитационного поля Земли, Луны и Солнца, давление солнечного излучения (*Меццержков, 2001*).

В работе (*Пудовкин О.Л., 2000*) введено понятие техногенной космической обстановки, которое представляет целостное, включающее в себя множество техногенных космических тел, образование, состояние которого определяется условиями их нахождения на орбитах и факторами разного рода, а свойства не сводятся к свойствам этих тел в отдельности и не вытекают из данных свойств. Она является открытой системой, погруженной в среду, которая воздействует на нее. Факторы и условия такого воздействия подразделяются на активные (события на орбитах ИСЗ) и пассивные (воздействия физических параметров ОКП).

Техногенные космические тела являются, таким образом, основными объектами техногенной космической обстановки.

Классификация техногенных космических тел по различным их признакам, от типов орбит до свойств саморазрушения представлена на рис. 2.13 (*Пудовкин О.Л., 2000*).



Рис. 2.13. Классификация техногенных тел в ОКП

Вопросы к главе II

1. Вывести III закон Кеплера, используя закон всемирного тяготения.
2. Приведите доводы в пользу того, что Плутон может являться не большой планетой Солнечной системы, а всего лишь объектом пояса Койпера.
3. Провести качественный расчет давления солнечного излучения на поверхности небесных тел.
4. Сопоставить плотность потока техногенных отходов в ОКП на разных высотах с плотностью потока естественных частиц в разные сезоны.
5. Проанализируйте рост техногенного загрязнения ОКП.

ГЛАВА III.

Процессы в ОКП и их взаимосвязь с процессами в биосфере – физические основы экологии ОКП

3.1. Глобальное воздействие на систему «ОКП-биосфера» источников космического происхождения

В ОКП поступает как энергия, выделяемая биосферой в ИК-диапазоне, так и энергия, образующаяся в результате техногенной деятельности человечества. В той или иной степени в ОКП попадают побочные продукты жизнедеятельности био – и техносферы, а также грязь от природных катастроф и т.д.

Поскольку экология является наукой о взаимодействии, в настоящей главе рассмотрены и проанализированы процессы взаимодействия между различными компонентами околоземного пространства, космоса и окружающей им био- и техносферы. Сюда входят процессы, обусловленные взаимодействием естественных космических и техногенных излучений с веществом и полями ОКП, процессы, сопровождающие загрязнение ОКП.

Все эти процессы выводят ОКП из состояния динамического равновесия. Однако, благодаря наличию достаточно большого количества отрицательных обратных связей ОКП возвращается к состоянию равновесия. Все процессы, протекающие в ОКП, оказывают воздействие на биосферу планеты, с которой у ОКП также существует большое количество как отрицательных, так и положительных (усиливающих воздействие) обратных связей.

Изучение перечисленных процессов и составляет, по мнению автора, физические основы экологии ОКП.

3.1.1. Солнце – основной источник глобального воздействия на систему «ОКП-биосфера»

Отметим в очередной раз, что основным источником глобального воздействия на Землю является Солнце, с которым наша планета имеет прямые или опосредованные связи через околоземное пространство.

Коротковолновая энергия, попадающая от Солнца к Земле, переизлучается последней в инфракрасном диапазоне. Плотность энергии абсолютно черного излучения $\varepsilon_e = \sigma T^4$, где T – температура излучающего тела (в данном случае T_C солнечной фотосферы и T_3 Земли). Плотность энтропии абсолютно черного излучения (Ландау, Лифшиц, 1995) $\varepsilon_s = \frac{4}{3} \sigma T^3$. Отсюда

$$\varepsilon_s = \frac{4}{3} * \frac{\varepsilon_e}{T}. \quad (3.1)$$

Тогда скорость производства (экспорта) энтропии для Земли равна

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{4}{3} * \varepsilon_e * \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_3} \right). \quad (3.2)$$

Подставив соответствующие температуры, получим $\frac{dS_e}{dt} = -6 * 10^{14}$ Вт/К (Трухин и др., 2005; Эбелинг и др., 2001). Такому значению полного экспорта энтропии соответствует плотность потока энтропии на поверхности Земли (при плотности потока

энергии $\sim 230 \text{ Вт/м}^2$ $\varepsilon_S \approx -1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Он компенсирует среднюю плотность производства энтропии (10^{-3} - $10^{-4} \text{ Вт/м}^2\text{К}$) в нижних слоях атмосферы.

Далее, поток энергии от земного ядра к поверхности составляет $\sim 0,2 \text{ Вт/м}^2$ (Жарков, 1983). Считая, что температура ядра Земли составляет 10^3 - 10^4 К , а на поверхности порядка 300 К , то экспорт энтропии за счет теплового потока Земли имеет порядок $\sim 10^{11} \text{ Вт/К}$. Таким образом, основную роль в экспорте энтропии играет солнечное излучение.

Основным компонентом ОКП, формирующим магнитосферу, отвечающим за строение радиационных поясов, ионосферы, за ход процессов в ближнем космосе является геомагнитное поле.

Геомагнитное поле можно представить складывающимся из главного магнитного поля Земли и компонентов, образованных внешними влияниями (Акасофу, Чепмен, 1975; Трухин и др., 2005). Поле внешних источников

$$H_B = S + L + D + \delta H, \quad (3.3)$$

где S – периодическое поле, обусловленное влиянием Солнца, L – периодическое поле, связанное с влиянием Луны, D – часть поля возмущений, связанная с внешними источниками, δH – нециклическая вариация в спокойные периоды от внешних источников.

То есть, вариации земного магнитного поля обусловлены приливными воздействиями как Солнца, так и, хотя и в значительно меньшей степени, Луны (регулярные плавные вариации в магнитоспокойные дни и вариации неправильного характера в магнитовозмущенные дни).

Изменения геомагнитного поля, связанные с воздействием на него различных внешних факторов, во многом (а часто и в основном) определяют ход процессов в ОКП и биосфере.

Начиная с работ А.Л. Чижевского стало понятно, что 11-летний цикл активности Солнца (или 22-летний цикл его магнитной активности) определяет периодичность многих процессов в биосфере.

Здесь мы отметим связь между параметрами, характеризующими состояние ОКП, и солнечной активностью. Эта связь проявляется намного заметней и ярче подобных связей с биосферой (рис. 3.1. – Мартынов, 1971).

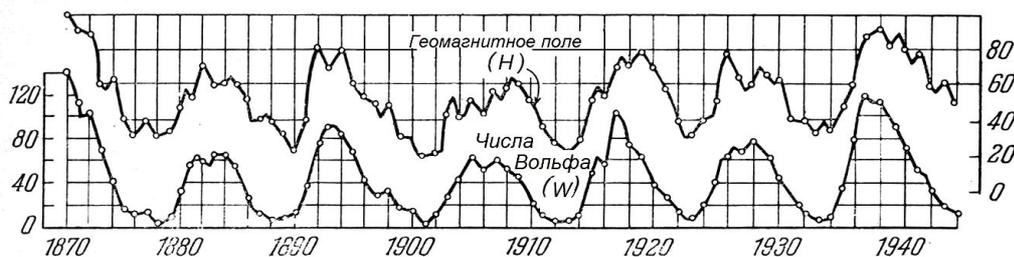


Рис. 3.1. Корреляция между напряженностью геомагнитного поля (H) и числами Вольфа (W)

Достаточно сказать, что в течение 11-летнего цикла солнечной активности на Солнце происходит около 37000 вспышек (по данным за 22 цикла солнечной активности – 1986-1996 гг.) и порядка 500 магнитных бурь (Ораевский, Кузнецов, 2002).

В табл. 3. 1 (Владимирский, Кисловский, 1982) перечислены показатели внешней среды, изменяющиеся при вариациях солнечной активности (без учета влияния последней на погоду и тропосферную циркуляцию).

Авторы отмечают, что ряд показателей здесь могут не являться экологически значимыми. Это: а) вариации интенсивности солнечного излучения в радиочастотном

«окне прозрачности» (всплески радиоизлучения от больших вспышек, шумовые бури) ввиду того, что уровень фона искусственного происхождения в этом диапазоне примерно на три порядка выше факторов естественного происхождения; б) медленные изменения напряженности магнитного поля Земли; в) вариации космических лучей ввиду их редкости и малости по сравнению с радиоактивностью земной природы.

Таблица 3.1.

Физические факторы, зависящие от солнечной активности

<i>Процесс</i>	Максимальное изменение в цикле солнечной активности	Продолжительность (в скобках – частота следования)
Излучение Солнца в оптическом диапазоне	Практически не изменяется	
Излучение Солнца в радиоволновом диапазоне	До 10^{-17} Вт*м² для мощной вспышки	Часы или сутки для меньшей интенсивности (раз в 1 месяц)
Солнечные космические лучи	До сотен процентов (при мощной вспышке)	Около 1 часа (раз в 2-5 лет)
Геомагнитная активность	До 10^{-3} Гс (главная фаза большой бури)	Десятки часов (раз в 1 месяц)
Электромагнитное поле низкие частоты сверхнизкие частоты	До сотен микровольт на метр До десятков вольт на метр	Десятки часов (постоянно) Часы (постоянно)
Изменения электро- статического поля Земли	10-30%	11-летний цикл?
Вариации галактических космических лучей - при Форбуш эффекте - за 11-летний цикл	5% До 20%	Сутки (раз в 1 месяц) - - - - -
Колебания концентрации радона в приземной атмосфере	В 5 раз (при больших бурях)	Сутки (раз в 1 ме- сяц)
Инфразвуковые колебания (около 0.03 Гц)	До 10 дн*см ⁻² (при боль- ших бурях на средних широтах)	Десятки часов (раз в 1 месяц)
Вариации УФ-излучения вблизи 290 нм	До 10%	11-летний цикл

Излучение в рентгеновском и УФ - диапазонах определяет состояние нижнего слоя ОКП (частично мезосферы на высотах более 65 км и термосферы высоты 90-400 км). В оптическом и, частично, инфракрасном диапазонах сосредоточена основная часть (до 95%) спектральной плотности излучения. Эта часть солнечной радиации трансформируется при энергообмене в средней и нижней атмосфере. Энергообмен является важнейшим фактором для общего течения процессов в этих областях, а значит и причиной множества частных гидрометеорологических явлений. Известная связь гидрометеорологического режима с общей циркуляцией атмосферы и связь общей циркуляции атмосферы с солнечной деятельностью приводят к широкому распространению физико-географических проявлений солнечной активности. Имеют место систематические экзогенные явления. Появляющиеся здесь многочисленные задачи и проблемы решаются в рамках метеорологии, климатологии, гидрологии и физической географии (Кокоуров, 2003).

В дальнейшем был выявлен целый спектр частот солнечных процессов, коррелирующих с частотами процессов в биосфере (Владимирский, Темурьянц, Мартынюк, 2004 – табл. 3.2).

Таблица 3.2

Основные периоды (годы) ритмов параметров околоземной среды

Геомагнитные индексы	Солнечная активность	Процессы в природе
1,47	1,5	
2,15	2,1	Сидерический период Марса, вариации солнечного диаметра, солнечный ветер
2,8	3	
3,7	4	Солнечный ветер
4,3		
5,2	5,5	
7,1	7,2	
10,5	11	Есть еще 9,6 года
12,5		Сидерический период Юпитера 11,9 г.
16,1		
22,0	22,0	Период смены полярности магнитного поля Солнца
35	35	Цикл Брикнера в климате
60,0	55	
80	80	Сидерический период Урана 84,01 г.
	130	
	178	Сидерический период Нептуна 164,8 г.
	200±15	
	263	Сидерический период Плутона 250,6 г.
	320±20	

В состоянии околоземного космического пространства и магнитосферы определяющую роль играет истечение корональной плазмы (солнечный ветер).

Сейчас считаются установленными основные типы энергетических потоков (частиц и излучения) от Солнца, воздействие которых приводит к тому или иному характеру возмущенности в околоземной среде (магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли): а) потоки сравнительно плотной ($n \sim 1 \div 70 \text{ см}^{-3}$ на орбите Земли) квазинейтральной и низкоэнергичной ($E < 10 \text{ кэВ}$) плазмы солнечного ветра, вызывающие магнитосферные и ионосферные бури с длительностью от 1 сут и более; б) потоки энергичных ($E \sim 10 \div 100 \text{ МэВ}$) «вспышечных» протонов малой плотности ($n \sim 10^{-10} \div 10^{-7} \text{ см}^{-3}$) длительностью порядка нескольких часов, вызывающие явление «поглощения в полярной шапке»; в) всплески потоков ультрафиолетового излучения от солнечных вспышек, вызывающие изменения концентрации в различных областях ионосферы, с характерным временем порядка 1 час; г) всплески потоков мягкого и жесткого рентгеновского излучения от вспышек, вызывающие внезапные ионосферные возмущения в D-области ионосферы, характерное время - несколько минут (Ковалевский, 1976; Еселевич, 2005).

Наиболее сильную глобальную перестройку магнитосферы и ионосферы вызывают потоки СВ типа (а), состоящие из двух больших классов: квазистационарные потоки СВ, время жизни источников которых более суток, и спорадические потоки СВ, источники которых характеризуются величиной менее суток. В свою очередь квазистационарный СВ подразделяется на два типа: быстрый СВ, истекающий из области корональных дыр и достигающий на орбите Земли $V \sim 400 \div 800 \text{ км/с}$ и медленный СВ, текущий в поясе стримеров или цепочках стримеров, с $V \sim 250 \div 400 \text{ км/с}$. Пространственное распределение квазистационарных потоков СВ в гелиосфере показано на рис. 3.2 (Еселевич, 2005). Основными источниками спорадического СВ являются выбросы корональной массы включающие в себя эруптивное волокно и возможно, вспышки.



Рис. 3.2. Вид Солнца и гелиосферы от Земли

Солнечный поток, величина которого определяет солнечную активность, состоит из нескольких компонент (Застенкер, Зеленый, 2003):

- электромагнитного излучения (главным образом, видимого света с небольшой добавкой инфракрасного и радиоизлучения), несущего основную часть энергии и мало изменяющегося во времени;

- спорадического ультрафиолетового и рентгеновского излучений, а также энергичной части солнечного радиоизлучения, изменяющихся в широком диапазоне - в сотни и тысячи раз и появляющихся только на короткое время при возмущениях (например, в солнечных вспышках);

- потока заряженных частиц с энергиями от сотен кэВ до сотен МэВ (солнечные космические лучи), также возникающего только эпизодически во время очень сильных солнечных вспышек;

- солнечного ветра - сильно изменяющегося (в десятки раз) потока плазмы, состоящего из ионов и электронов в равной концентрации.

Здесь можно привести пример торможения искусственных космических объектов и космической пыли верхней атмосферой и ионосферой. Их орбиты испытывают сложный комплекс вариаций, связанных, главным образом, с солнечной и геомагнитной активностью. Важнейшими из них являются вариации, обусловленные 11- и 22-летним циклом солнечной активности. Плотность плазмы и нейтрального газа на высоте нескольких сотен километров в периоды максимума солнечной активности увеличивается в десятки раз по сравнению с минимумом: в 1958 г. плотность атмосферы на высоте 500 км была в 50 раз выше, чем в эпоху минимума 1964-65 гг. (Касименко, Рыхлова, 1995). Кроме того, заметными вариациями являются полугодовая (минимум в январе, максимум в июле), суточная, геомагнитная (связанная с геомагнитными бурями). Среднее значение изменений плотности нижней атмосферы в этих вариациях приведено в табл. 3.3 (Касименко, Шематович, 1990).

Таблица 3.3

Относительное изменение плотности плазмы в ОКП, связанные с солнечной и геомагнитной активностью

Тип изменений	11-летний цикл	Полугодовая вариация	Суточная вариация	Геомагнитная вариация
Диапазон изменений	20	3	6	8

Следует отметить, что для высоких орбит, где влияние атмосферы уже не существенно, солнечный ветер способствует переходу космических объектов и фрагментов космического мусора на более высокие орбиты.

Понятно, что наиболее заметным фактором воздействия на ОКП и биосферу являются **солнечные вспышки**, сопровождающиеся испусканием большого количества заряженных частиц. Самые энергичные из солнечных космических лучей достигают околоземного пространства через ~10 мин. после максимума вспышки.

Результатом сильных и средних по интенсивности солнечных хромосферных вспышек являются следующие явления:

- дополнительная ионизация ионосферы, увеличение плотности и температуры нейтрального газа и плазмы;
- внезапное прекращение радиосвязи на частотах 5-20 МГц (15-60 м) через дневную половину земного шара (эффект Мегеля-Деллинджера);
- полное прекращение отражений от ионосферных слоев и усиление поглощения радиоизлучения космических источниках на волнах 10-15 м;
- внезапное усиление атмосферных помех или сигналов от очень удаленных станций на очень длинных волнах (>10 км);
- понижение высоты ионосферного слоя D;
- магнитные бури, наступающие обычно не позднее двух суток после хромосферной вспышки, но чаще всего через 17-21 час;
- усиление потока мягкой составляющей космических лучей на поверхности Земли с небольшим запозданием против начала вспышки;
- эффект Форбуша – значительное ослабление на 5-10 суток интенсивности космических лучей после начала магнитной бури;
- полярные сияния, обычно совпадающие по времени с магнитными бурями, и другие ионосферные возмущения;
- нарушения озонового слоя.

Протоны и α -частицы, ускоренные до десятков и сотен Мэв, являются главным источником радиационной опасности во внешней магнитосфере. Они также вызывают и кратковременные ухудшения радиационной обстановки во внутренней магнитосфере, в

том числе и на высотах, используемых для [пилотируемых полетов](#). Наиболее глубоко в магнитосферу энергичные частицы проникают в полярных каспах. В приэкваториальных районах действие лоренцевой силы со стороны геомагнитного поля изменяет траекторию движения частиц на спиральную и уводит их в сторону. Поэтому трассы полетов КА, проходящие в высоких широтах, значительно более опасны с точки зрения риска радиационного поражения, чем низкоширотные. Это касается и авиации. На высотах 9-11 километров годовая доза, обусловленная общим фоном космической радиации, получаемая экипажами, оборудованием и часто летающими пассажирами, должна контролироваться по правилам, установленным для радиационно опасных видов деятельности. Лайнеры «Конкорд», поднимавшиеся на еще большие высоты, имели на борту счетчики радиации и летели, отклоняясь к югу от кратчайшей северной трассы перелета между Европой и Америкой, если текущий уровень радиации превышал безопасную величину (Петрукович, Зеленый, 2001а).

Во время геомагнитной бури внезапному изменению подвергается вертикальная составляющая геомагнитного поля. Такое внезапное начало бури означает приход ударной волны из межпланетного пространства к Земле. Далее планета погружается в плазму и магнитное поле за фронтом ударной волны (начальная фаза). Она продолжается от 30 минут до нескольких часов. В этой фазе напряженность геомагнитного поля на низких широтах больше, чем перед внезапным началом бури, а в полярных областях наблюдаются увеличенные и весьма иррегулярные флуктуации. Магнитосфера подвергается воздействию больших флуктуаций плазмы и поля солнечного ветра с характерным временем от нескольких секунд до нескольких часов (Сюняев, 1986). На рис. 3.3 показано изменение положения магнитопаузы при воздействии на магнитосферу плазмы солнечной вспышки (Застенкер, Зеленый, 2003).

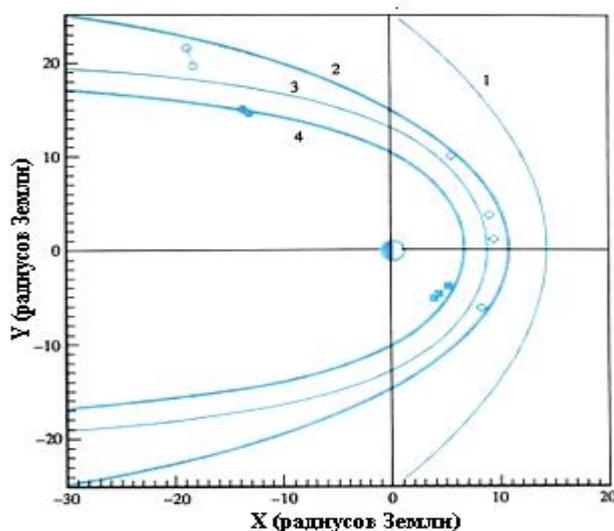


Рис. 3.3. Стандартные и необычные положения магнитопаузы во время сильных возмущений 10-11 января 1997 г.

1 - среднее (типичное) положение околоземной ударной волны; 2 - среднее (типичное) положение магнитопаузы; 3 - положение магнитопаузы в момент сильного сжатия 10 января по данным спутников ИНТЕРБОЛ-1 (светлые кружки) и Geotail (светлые ромбики); 4 - положение магнитопаузы в момент сильного сжатия 11 января по данным спутников ИНТЕРБОЛ-1 (темные кружки) и LANL-084 (темные квадратики). Координата X направлена к Солнцу, координата Y - в перпендикулярном направлении.

Также ударная волна вымывает мелкие фракции космического мусора естественного и техногенного происхождения из областей ОКП, где они скапливаются, то есть является своеобразным чистильщиком (*Касименко, Рыхлова, 1995*).

Через 2-4 суток после магнитной бури происходит перестройка барического поля тропосферы, что приводит к ее неустойчивости, нарушениям циркуляции атмосферы, развитию аномальных явлений в нижней атмосфере планеты.

Во время магнитных бурь возникают акустические колебания. Интенсивность этого низкочастотного излучения возрастает в десятки и сотни раз. Обычно через 4-6 часов после начала бури амплитуда инфразвуковых колебаний на средних широтах начинает плавно возрастать, достигает максимального значения, спустя несколько часов уменьшается. Генерируются эти инфразвуковые волны как при развитии полярных сияний, так и при развитии процессов в экосистемах (создающих постоянный акустический шум). Однако и они в некоторых полосах частот коррелируют с индексами солнечной активности.

В конце XX века появилось мнение, что кроме солнечных вспышек основным источником геоэффективных возмущений солнечного ветра, дающих заметное воздействие на земные процессы - магнитные бури, нарушения радиосвязи, интенсивные полярные сияния, являются корональные выбросы. Это, в какой-то степени, возврат к модели Чепмена - выбросу сгустков плазмы при возмущениях на Солнце - но уже на фоне постоянно присутствующего солнечного ветра (*Застенкер, Зеленый, 2003*).

При своем движении от Солнца корональные выбросы часто принимают форму замкнутых образований со своеобразным поведением плазмы и магнитного поля - магнитных облаков, приводящих к сильным (иногда экстремальным) возмущениям на Земле. Таким образом, выстраивается причинно-следственная цепочка - корональные выбросы массы образуют магнитные облака, которые приводят к возмущениям магнитосферы Земли.

Ионизированные слои F_1 и F_2 ионосферы между 200 и 400 км состоят в основном из равного количества ионов O^+ и электронов. Они погружены в нейтральный газ из O_2 , O , N_2 и He с концентрацией около 10^8 см^{-3} . В многокомпонентной плазме из электронов, ионов и нейтральных молекул, пронизанной геомагнитным полем, возникают различного рода колебания с различными частотами (*Прохоров, 1983*).

Плазменные (ленгмюровские) частоты электронов

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{4\pi N e^2}}{m_e} \quad (3.4)$$

и ионов

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{m_i}} \quad (3.5)$$

Гиромангнитные частоты электронов

$$\omega_H = \frac{e H_m}{m_e c} \quad (3.6)$$

и ионов

$$\Omega_0 = \frac{e H_m}{m_i c}, \quad (3.7)$$

где m_e , m_i – массы электрона и иона,

e – заряд электрона,

N – концентрация частиц,

H_m – напряженность геомагнитного поля.

Так как $m_i \gg m_e$, то $\omega_0 \gg \Omega_0$, $\omega_H \gg \Omega_H$. Например, для электронов $\frac{\omega_p}{2\pi} = 1.4 \text{ МГц}$, а

для ионов атомарного кислорода $\frac{\Omega_H}{2\pi} = 54 \text{ Гц}$.

Энергичные электроны вблизи ударной волны, движущейся перед корональным выбросом, возбуждают электрические ленгмюровские колебания межпланетной плазмы на ее собственной частоте ω_p .

За счет нелинейного взаимодействия плазменные колебания, в свою очередь, генерируют электромагнитные волны на плазменной частоте или на ее второй гармонике. Данные волны свободно распространяются во все стороны и улавливаются широкополосным приемником, установленным на борту космического аппарата, на частоте, определяемой плотностью частиц плазмы в том месте, где они возникли. Когда фронт коронального выброса находится не очень далеко от Солнца, где плотность порядка 10^4 см^{-3} , регистрируется излучение на частоте около 1 МГц, когда фронт пройдет примерно половину пути от Солнца к Земле - на частоте около 100 кГц. При приближении фронта коронального выброса к Земле, где плотность межпланетной плазмы около 10 см^{-3} , фиксируется радиоизлучение на частоте около 40 кГц.

После солнечных вспышек ионосфера, поглощая [солнечное рентгеновское излучение](#), нагревается и раздувается, не только тормозя космический мусор, но и создавая значительное дополнительное [аэродинамическое сопротивление](#) движению спутников и пилотируемых кораблей. Падение американской станции «Скайлэб», к примеру, явилось следствием крупнейшей солнечной вспышки, произошедшей в 1972 году. К счастью, во время спуска с орбиты [станции «Мир»](#) Солнце было спокойным, что облегчило работу российским баллистикам (Петрукович, Зеленый, 2001а).

14.07.2000 г. на Солнце произошел сильнейший корональный выброс. Достигнув Земли, он существенно разогрел верхнюю атмосферу, в результате чего увеличились объем и плотность последней. Японская рентгеновская обсерватория ASCA (перигей на высоте 440 км) войдя 15.07.2000 в эти слои потеряла ориентацию и перешла в «спящий» режим, из которого ее вывести не удалось (Звездочет, 2000, №3).

В динамике числа авиационных аварий обнаруживаются регулярности периодического характера и наличие у нее богатой спектральной структуры. Особенно заметно это стало после того, как ведущие авиационные кампании стали публиковать детальную статистику аварийности. Часть компонент спектра имеет, видимо, гелиогеофизическое происхождение. В частности, влияние известного квазидвухлетнего периода на различные земные процессы может быть не меньшим, чем сильных магнитных бурь. **Частота аварий в дни геомагнитных возмущений и бурь достоверно возрастает.** Аварии имеют тенденцию группироваться во времени, формируя более благоприятные и неблагоприятные (в смысле безопасности полетов) периоды. Эти результаты открывают путь к прогнозированию периодов повышенной частоты аварийных ситуаций (Конрадов и др., 2004).

Плазма наиболее эффективно поглощает радиоволны только вблизи своей [резонансной частоты](#), зависящей от плотности заряженных частиц и равной для ионосферы примерно 5-10 МГц (эффект Мегеля-Деллинджера). [Радиоволны](#) более низкой частоты отражаются от границ ионосферы, а волны более высокой - проходят сквозь нее, причем степень искажения радиосигнала зависит от близости частоты волны к резонансной. Спокойная ионосфера имеет стабильную слоистую структуру, позволяя за счет многократных отражений принимать радиосигнал диапазона коротких волн (с частотой ниже резонансной) по всему земному шару. Радиоволны с частотами выше 10 МГц свободно уходят через ионосферу в открытый космос. Здесь эффект многократного отражения УКВ- и FM-радиостанции доступны только в окрестностях передатчика, а частоты в сотни и МГц используются для космической связи. Во время [солнечных вспышек](#) и [магнитных бурь](#) количество заряженных частиц в ионосфере увеличивается неравномерно, чем создаются плазменные сгустки и «лишние» слои. Это приводит к генерации собственного широкополосного шумового излучения магнитосферой и ионосферой, а также к непредсказуемому отражению, поглощению, искажению и преломлению радиоволн, что создает значительные затруднения в работе систем наземной

и космической связи и навигации. В приполярных районах и зонах [аврорального овала](#) ионосфера связана с наиболее динамичными областями магнитосферы и поэтому наиболее чувствительна к приходящим от Солнца возмущениям. Магнитные бури в высоких широтах могут практически полностью блокировать радиоэфир на несколько суток (Петрукович, Зеленый, 2001б).

Во внешнем радиационном поясе наиболее эффективно удерживаются энергичные электроны. Население этого пояса очень нестабильно и многократно возрастает во время магнитных бурь за счет вброса плазмы из внешней магнитосферы. Именно по внешней периферии этого пояса проходит геостационарная орбита, незаменимая для размещения спутников связи. Поскольку радиационная доза, создаваемая электронами, не столь велика, то на первый план выходит проблема электризации спутников. Любой объект, погруженный в плазму, должен находиться с ней в электрическом равновесии. Поэтому он поглощает некоторое количество электронов, приобретая отрицательный заряд и соответствующий потенциал, примерно равный температуре электронов в эВ. Появляющиеся во время магнитных бурь облака горячих (до сотен кэВ) электронов придают спутникам дополнительный и неравномерно распределенный, из-за различия электрических характеристик элементов поверхности, отрицательный заряд. Разности потенциалов между соседними деталями спутников могут достигать десятков киловольт, провоцируя спонтанные электрические разряды, выводящие из строя электрооборудование (*Физика косм. простр.*, 1997). Наиболее известным следствием такого явления стала поломка во время одной из магнитных бурь 1997 года американского ИСЗ *TELSTAR*, оставившая значительную часть территории США без пейджерной связи (Петрукович, Зеленый, 2001б). Целую серию нарушений в работе бортовых систем (в частности, на научном спутнике *Polar*) или даже выходов из строя (научный спутник *Equator-S* и коммуникационный спутник *Galaxy 4*) вызвал приход к Земле магнитного облака 1 - 4 мая 1998 г. (Застенкер, Зеленый, 2003).

На распределение концентраций электронов и ионов и их температуру оказывают заметное влияние изменения интенсивности солнечного коротковолнового излучения в течение солнечного цикла. С этим связаны изменения температуры и распределение нейтральных компонентов верхней атмосферы и ионосферы. Движения масс воздуха в верхней атмосфере (крупномасштабная циркуляция, крупномасштабные волновые движения, турбулентные процессы перемешивания нейтральных молекул и атомов, ветры, приливные движения) также оказывают влияние на перенос заряженного компонента верхней атмосферы. С динамическими процессами связаны характерные вариации электронной плотности в ионосфере, которые увеличиваются в периоды магнитных бурь.

В результате на низких и средних широтах концентрация ионов в максимуме области *F* изменяется в пределах $3 \cdot 10^5 \pm 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ в зависимости от различных геофизических условий (широты, местного времени, солнечной и магнитной активности и др.).

На высоких широтах картина может быть совершенно иной. Во время полярных сияний интенсивные потоки электронов и ионов с энергиями порядка нескольких кэВ, вторгающихся в полярную ионосферу из плазменного слоя магнитосферы, вызывают значительную и неравномерную ионизацию полярной верхней атмосферы.

Другим важным фактором, определяющим неустойчивость полярной ионосферы, является перенос ионов на большие расстояния поперек геомагнитного поля, происходящий вследствие дрейфа плазмы в крупномасштабном электрическом поле магнитосферного происхождения.

При взаимодействии магнитосферы с солнечным ветром, ввиду наличия флуктуаций в последнем, в магнитосфере генерируется широкий спектр электромагнитных волн с низкими и супернизкими частотами 10^{-3} -10 Гц, которые свободно доходят до поверхности Земли.

Достаточно большую роль в геомагнитных возмущениях играет межпланетное магнитное поле, главным образом, его южный компонент, перпендикулярный плоскости

эклиптики. А со сменой знака радиального компонента межпланетного магнитного поля связана асимметрия потоков солнечных космических лучей, вторгающихся в полярные области, изменения направления конвекции магнитосферной плазмы и другие явления.

Далее, при изменении направления межпланетного поля из северного полушария в южное увеличение темпа пересоединения его силовых линий и силовых линий земного магнитного поля на дневной магнитопаузе приводит к быстрому накоплению энергии в магнитосфере. В результате увеличивается хвост магнитосферы. Дальнейшее увеличение энергии магнитосферы приводит к развитию магнитосферной суббури, которая приводит к перестройке конфигурации магнитосферы и диссипации накопленной энергии. В фазе развития суббури в момент взрывного пересоединения линий межпланетного и земного магнитного полей происходит резкая интенсификация полярных сияний и электроджетов в ионосфере. При этом сначала дуги полярных сияний возникают в районе местной полуночи, а затем быстро распространяются к западу и в сторону экватора. Продолжительность полярных сияний практически близка к продолжительности суббури и может составлять время от десятков минут до 2 часов. Они происходят на геомагнитных широтах 67° - 70° – в так называемых зонах полярных сияний, а также распространяются в направлении запад-восток на расстояние до 5 тыс. км в виде дуг. Ширина зон полярных сияний составляет около 6° . Максимум появления полярных сияний, соответствующий данному моменту геомагнитного местного времени, происходит в овалах полярных сияний, располагающихся асимметрично вокруг северного и южного магнитных полюсов: $\sim 23^{\circ}$ от геомагнитного полюса в ночном секторе и 15° в дневном секторе. Визуальное полярное сияние содержит зеленую ($\lambda=557,7$ нм) и красную ($\lambda=630,0/636,4$ нм) эмиссионные линии атомарного кислорода и молекулярные полосы N_2 , возбуждаемые частицами солнечного и магнитосферного происхождения. Эти эмиссии высвечиваются на высотах от 100 км и более, однако, энергия излучения в инфракрасной и УФ-области спектра превосходит энергию оптического излучения.

Частота появления полярных сияний коррелирует с солнечным циклом, 27-дневным циклом, временем года и магнитной активностью.

На высотах порядка 1-3 радиусов Земли сложные плазменные процессы вызывают ускорение частиц плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля до энергий 1-10 кэВ. Источником энергии для таких процессов являются области с быстрыми движениями и турбулентностью магнитосферной плазмы, генерирующие продольный электрический ток, замыкающийся через проводящую ионосферу в овале полярных сияний. Когда продольный ток становится слишком сильным, в плазме возникают процессы ускорения заряженных частиц вдоль магнитных силовых линий. Ионы из ионосферы при этом ускоряются вверх. Ускорение происходит под действием электрического поля, направленного вдоль магнитного, таким образом, что плазменный слой на высотах в несколько радиусов Земли находится под отрицательным потенциалом относительно ионосферы как в Северном, так и в Южном полушарии (дуги полярных сияний почти симметричны на обоих концах магнитной силовой линии). Пучки заряженных частиц, выбрасываемых с этих высот в магнитосферу, образованы протонами и ионами верхней атмосферы O^+ и He^+ . Часть этих ионов захватывается в пояс кольцевого тока и в итоге может попасть в радиационные пояса, откуда могут в итоге через хвост магнитосферы выбрасываться в межпланетное пространство. Ускоренные к Земле электроны переносят из магнитосферы в ионосферу отрицательный заряд, что соответствует продольному току, направленному вверх, с плотностью в несколько $мкА/м^2$. Учтя ширину и длину дуги полярного сияния можно получить общий ток полярной зоны в несколько кА. Рядом с дугой течет примерно такой же продольный ток, но направленный вниз, что соответствует оттоку тепловых ионосферных электронов вверх, в плазменный слой магнитосферы. Из-за мощной ионизации верхней атмосферы пучком электронов в дуге полярного сияния ее проводимость резко возрастает. Плазма в этих слоях ионосферы излучает ввиду этого волны как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне. От возникающих здесь

цугов сжатий и разрежений в концентрации электронов ионосферной плазмы на высотах 90-120 км способны отражаться радиоволны метрового диапазона (Сюняев, 1986).

Процессы развития суббури приводят к генерации километрового радиоизлучения в ОКП общей энергией до $\sim 10^9$ Вт, что составляет до 1% мощности диссипации энергии при суббуре.

Авроральную активность сопровождает большое число явлений, таких, как авроральные рентгеновские лучи, поглощение космического излучения, мерцания радиозвезд, спорадический слой *E*, геомагнитные микропульсации и т.д.

Можно сказать, что полярные сияния являются сигналом воздействия космоса через околоземное пространство на биосферу (Александров, 2001). С появлением в ОКП заряженных частиц солнечного и галактического происхождения изменяется содержание и электрический потенциал атмосферы, нагрев ионосферной плазмы возбуждает волны в атмосфере. Из-за дополнительной ионизации в ионосфере появляются значительные электрические токи, магнитные поля которых искажают геомагнитное поле. Эти процессы прямо влияют на погоду и здоровье людей. Через полярные сияния и связанные с ними процессы в ОКП космос воздействует на биосферу Земли.

Кроме того, магнитные вариации генерируют вторичные электрические токи в проводящих слоях литосферы Земли, в соленой воде и в оказавшихся поблизости искусственных проводниках. Наводимая разность потенциалов невелика и составляет примерно несколько вольт на километр (максимальное значение было зарегистрировано в 1940 году в [Норвегии](#) и составило около 50 В/км), но в протяженных проводниках с низким сопротивлением - линиях связи и электропередач, трубопроводах, рельсах железных дорог - полная сила индуцированных токов может достигать десятков и сотен ампер. Наименее защищены от подобного влияния воздушные низковольтные линии связи, например, телеграфные линии. Заметное воздействие геомагнитная активность оказывает на железнодорожную автоматику в приполярных районах. В трубах [нефтепроводов](#), тянущихся на многие тысячи километров, индуцированные токи могут значительно ускорять процесс коррозии металла. В линиях электропередач, работающих на [переменном токе](#) частотой 50-60 Гц, индуцированные токи, меняющиеся с частотой менее 1 Гц, практически вносят только небольшую постоянную добавку к основному сигналу и должны были бы слабо влиять на суммарную мощность. Однако после аварии, произошедшей во время сильнейшей магнитной бури 1989 года в канадской энергетической сети и на трансформаторе АЭС в Нью Джерси выяснилось, что даже небольшая добавка постоянного тока может вывести из строя трансформатор, предназначенный для преобразования переменного тока, в котором постоянная составляющая тока вводит его в неоптимальный режим работы с избыточным магнитным насыщением сердечника. Это приводит к избыточному поглощению энергии, перегреву обмоток и в конце концов к аварии всей системы (Трухин и др., 2005). Последовавший анализ работоспособности всех энергетических установок Северной Америки выявил и статистическую зависимость между количеством сбоев в зонах повышенного риска и уровнем геомагнитной активности (рис. 3.4. - Петрукович, Зеленый, 2001б).

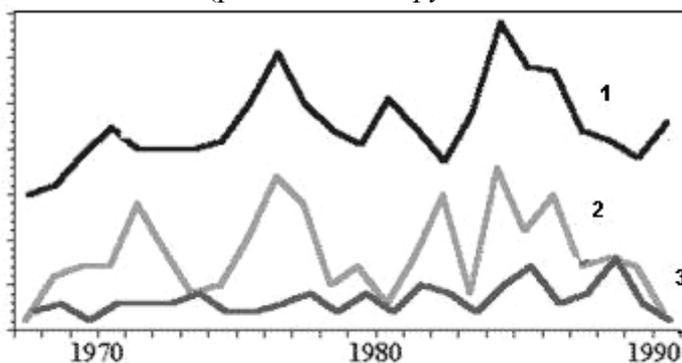


Рис. 3.4. Число аварий в энергосетях США в районах повышенного риска (близких к авроральной зоне) возрастает вслед за уровнем геомагнитной активности. В годы минимума активности вероятности аварий в опасных и безопасных районах практически уравниваются.

(1. уровень геомагнитной активности; 2. число аварий в геомагнитно-опасных районах; 3. число аварий в безопасных районах)

В общем, взаимодействие экосистем с ОКП в настоящее время надежно установлено. Здесь и связь между величинами и ходом солнечной и геомагнитной возмущенности, ходом целого ряда процессов в атмосфере, океанах, литосфере. Это носит периодический характер, связанный, главным образом с различными периодами солнечной активности, основным 22-летним (включающим два 11-летних цикла), 27-дневным и т.д. Скачкообразные изменения в природной среде связаны с триггерным механизмом взаимодействия (Серафимов, 1991; Сюняев, 1986), применимым к системам, находящимся в состоянии неустойчивости, близкому к критическому (например, магнитосфера). Здесь небольшое изменение критического параметра приводит к изменению энергетического состояния всей системы, что ведет к возникновению новых явлений. Например, явление образования внетропических циклонов при геомагнитных возмущениях. В этом случае энергия геомагнитного возмущения, полученная из ОКП, преобразуется в тепловую, которая разогревает тропосферу. В результате в последней развивается вертикальная неустойчивость с энергией, более высокой, чем энергия первоначального возмущения, приводящая к развитию атмосферных неустойчивостей.

Существует мнение (Кокоуров, 2003), что солнечная активность может проявляться даже как геологический фактор. Эти проявления могут объясняться крупными вариациями экзогенных явлений, определяемых, в частности, метеорологическими процессами и палеоклиматическими колебаниями (таяние или образование ледников).

Следует отметить, что идея о прямом влиянии солнечной активности на состояние погоды многими геофизиками отвергается. В данном случае мощность атмосферных процессов на несколько порядков превышает поток энергии, попадающий в ОКП с солнечным ветром. В связи с этим представляется крайне маловероятным, чтобы солнечная активность могла существенно влиять на состояние нижней атмосферы (Пудовкин, 19996).

Здесь, видимо, можно говорить о вторичных (триггерных) механизмах такого влияния.

Во-первых, в ОКП и далее в атмосферу попадают наиболее энергичные протоны, генерируемые во время солнечных вспышек. В то же время связанные со вспышками магнитные поля экранируют ОКП от галактических космических лучей (Форбуш-эффект). Наложение этих процессов создает сложную и неоднозначную вариацию интенсивности потоков частиц, попадающих в атмосферу Земли.

Далее, усиление или ослабление потока вторгающихся в атмосферу частиц в результате еще не до конца выясненных физико-химических процессов вызывает уменьшение (увеличение) прозрачности атмосферы и тем самым модулирует поступление солнечной энергии в нижнюю атмосферу.

Изменение потока поступающей солнечной энергии вызывает изменение температуры воздуха и высот изобарических поверхностей в атмосфере, обуславливая тем самым заметные изменения крупномасштабной циркуляции последней.

Таким образом, оказывается, что энергия, необходимая для создания атмосферного оптического экрана, на несколько порядков меньше амплитуды вызываемых этим экраном вариаций потока солнечной энергии, поступающей из ОКП в нижнюю атмосферу (Пудовкин, 19996; Hauglustaine, 1990).

3.1.2. Процессы в ОКП, обусловленные действием космических лучей и жестких электромагнитных излучений

Отметим, что поток космических лучей, попадающих в ОКП, подвержен значительным вариациям. Амплитуда вариаций первичных космических лучей зависит как от энергии самих частиц, так и от напряженности и направления межпланетного магнитного поля. Эффект Форбуша, представляющий собой кратковременное понижение интенсивности космических лучей (на 50% в межпланетном пространстве и на 20-30% вблизи поверхности Земли), вызывается рассеянием заряженных частиц магнитными полями, выносимыми из атмосферы Солнца высокоскоростными потоками солнечного ветра. Таким образом, этот эффект наблюдается в периоды максимумов солнечной активности и во время солнечных вспышек. Он подтверждается также данными экспериментальной палеоастрофизики: во время маундеровского минимума солнечной активности (1640-1710 гг.), когда пятна на Солнце практически отсутствовали, наблюдалась вариация интенсивности галактического космического излучения – форбуш-эффект (Кочаров, 2002). Наиболее здесь оказался выраженным период в 22 года, соответствующий периоду переполюсовки магнитного поля Солнца (рис. 3.5).

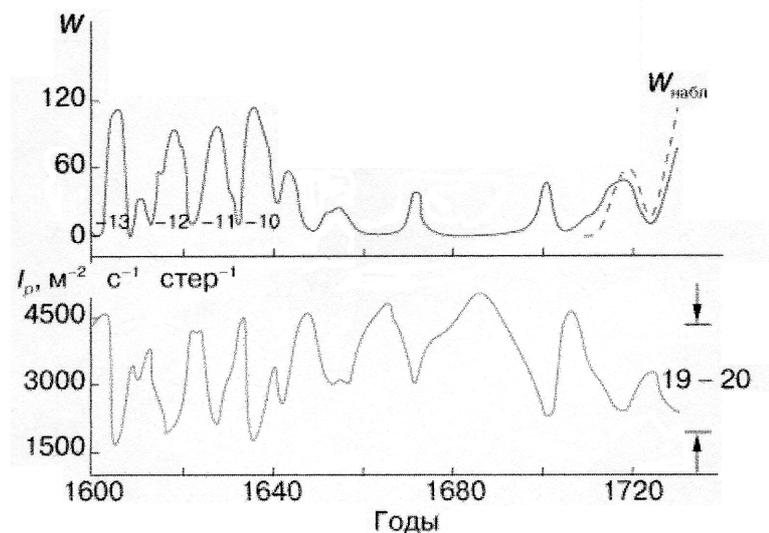


Рис. 3.5. Активность Солнца в числах Вольфа (W) и интенсивность галактических космических лучей (I_p) в эпоху маундеровского минимума

Таким образом, 11-летний (а также 22-летний) период проявления Форбуш-эффекта является надежно установленным.

Попадая в геомагнитное поле, частицы под действием лоренцевой силы отклоняются от практически прямолинейной траектории. На заданную широту вблизи Земли с данного направления приходят частицы с энергией, превышающей некоторое пороговое значение (эффект геомагнитного обрезания). Воздействие геомагнитного поля усиливается с уменьшением географической широты. В табл. 3.4 представлены данные по этому эффекту для заряженных частиц различного происхождения (Аллен, 1977).

Таблица 3.4

Магнитная широта обрезания потоков частиц в ОКП различного происхождения

$I_g E$ (эВ)	Геомагнитные частицы			Потоки полярных областей			Космические лучи		
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Протоны	85	83	80	77	72	65	54	18	0

Электроны	-	87	86	84					
-----------	---	----	----	----	--	--	--	--	--

Поскольку основной составляющей космических лучей являются протоны, общий заряд их потока является положительным. С этим связана восточно-западная асимметрия космических лучей: из-за отклонения в геомагнитном поле с запада приходит больше частиц, чем с востока.

При прохождении заряженных частиц космических лучей и фотонов высокой энергии через вещество имеют место процессы, обусловленные электромагнитным взаимодействием их с электронами и ядрами атомов среды (*Добротин, 1954*).

1. Частица или фотон постепенно тормозится за счет потери энергии на отрыв электронов от атомов (ионизация и образование δ -электронов) и возбуждение атомов.
2. Фотон может вырвать электрон из атома, передав ему свою энергию, то есть вызвать фотоэффект.
3. При взаимодействии фотона и электрона может произойти рассеяние фотона с передачей части его энергии электрону – комптон-эффект.
4. При взаимодействии с ядром атома заряженная частица может резко затормозиться, испустив при этом квант тормозного излучения.
5. Фотон высокой энергии в поле ядра атома может образовать электронно-позитронную пару, передав этим частицам свою энергию.

Частицы, движущиеся со скоростью, превышающую фазовую в данной среде, испытывают дополнительное торможение, связанное с испусканием черенковского излучения. Однако, его доля в суммарном балансе потерь энергии частицами космических лучей достаточно мала, и поэтому редко рассматривается при описании процесса прохождения космических лучей через ОКП и атмосферу.

Первичные космические лучи проходят ОКП и верхние слои атмосферы практически без столкновений с атомами и ионами. Для протонов, составляющих большинство в первичных космических лучах, средний пробег без столкновений составляет ≈ 70 г/см² (количество граммов вещества, заключенного в столбе сечением 1 см²). Для α -частиц средний пробег ≈ 25 г/см², для более тяжелых ядер еще меньше (*Сюняев, 1986*). Толща атмосферы, равная среднему пробегу протонов, соответствует высоте над поверхностью Земли 20 км. Поэтому первые столкновения первичных космических лучей с ядрами атмосферных газов происходят на нижней границе ОКП – высотах 20-25 км.

Протоны космических лучей разрушают атомы азота и кислорода и порождают каскад вторичных частиц (рис.3.6), поток которых условно разделяют на три компонента: электронно-фотонный (1), мю-мезонный (2) и нуклонный (3).

Именно ионизация атмосферы вторичным излучением регистрируется наземными приборами.

Космические лучи оказывают значительное влияние на процессы ионизации составляющих ионосферы и атмосферы и обеспечивают электризацию нижних слоев атмосферы. Баланс образующихся при этом ионов описывается линейным уравнением (*Стожков, 2001*)

$$q = b * n \quad (3.8)$$

где q - скорость образования ионов, n - их концентрация, b - коэффициент линейной рекомбинации ионов в атмосфере

Установление правильного вида уравнения, описывающего баланс ионов в атмосфере, крайне важно для расчетов климатических моделей Земли. Учет этого влияния весьма важен при проведении расчетов климатических моделей Земли (*Кочаров, 19996*).

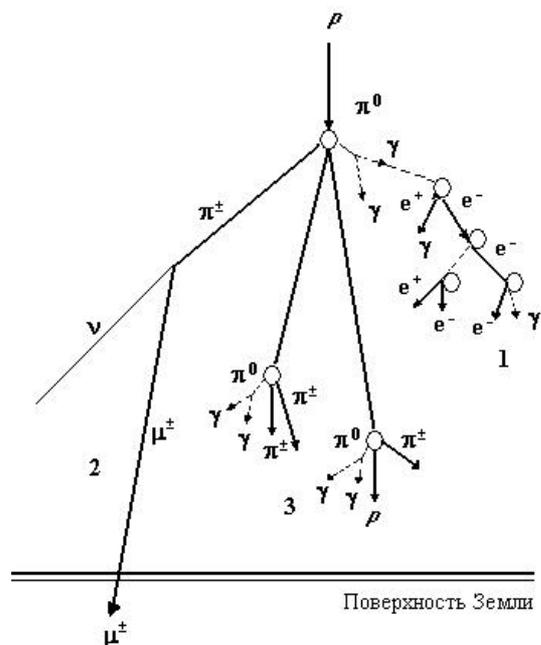


Рис. 3.6. Взаимодействие космических лучей с атмосферой Земли на нижней границе ОКП (О - ядра атомов атмосферы)

Ионы, образованные космическими лучами, обеспечивают проводимость атмосферы. Ток, текущий в атмосфере, является одним из основных элементов глобальной электрической цепи, которая поддерживает постоянный отрицательный заряд Земли $6 \cdot 10^5$ К. Генератором электрических зарядов в атмосфере являются разряды грозных облаков. Грозные облака образуются на атмосферных фронтах, где происходит образование и разделение облачных зарядов. Источником зарядов грозных облаков являются положительные и отрицательные ионы, образующиеся в нижней атмосфере под действием космических излучений и естественной радиоактивности Земли. Эти ионы прилипают к аэрозольным частицам, концентрация которых велика в нижней атмосфере (более 10^4 см^{-3}). На заряженных аэрозольных частицах, постепенно по мере их подъема вверх восходящими потоками воздуха, вырастают водяные капли. Разделение отрицательных зарядов от положительных происходит вследствие того, что рост капель воды на отрицательно заряженных центрах конденсации идет в $\sim 10^5$ раз быстрее, чем на положительных. В результате этого процесса нижняя часть облака заряжается отрицательно, а верхняя положительно. Молниевые разряды возникают тогда, когда через облако проходит так называемый широкий атмосферный ливень - до 10^6 заряженных частиц, образованных высокоэнергичной космической частицей. По ионизованным трекам частиц широкого атмосферного ливня и происходят молниевые разряды.

Таким образом, космические лучи являются необходимой составной частью процесса образования грозного электричества и молниевых разрядов (Трухин и др., 2005).

Кроме того, имеются данные о том, что в период Форбуш-эффекта, когда уровень галактических космических лучей понижается, уменьшается количество осадков, площадь облаков над планетой и, соответственно, альбедо (Пудовкин, 1996; Hauglustaine, Gerard, 1990).

Отсюда можно сделать предположение, что вековое уменьшение потока космических лучей (связанное, как указывалось выше, с взрывом близкой сверхновой), может быть одним из механизмов, вызывающих глобальное потепление на Земле (Кочаров, 19996, 2001; Стожков, 2001).

Ионы, образовавшиеся в верхней тропосфере под действием высокоэнергичных солнечных космических лучей и сконденсировавшийся на них водяной пар, могут вызвать экспериментально зарегистрированные изменения высотного профиля нижней атмосферы. Это приводит к появлению приземных и приподнятых тропосферных волноводов, играющих важную роль в распространении радиоволн. Это может явиться подтверждением нелинейного механизма воздействия солнечной активности на метеопараметры, когда малое внешнее их воздействие, не превышающее 0,1% солнечной постоянной, приводит к 10%-ному уменьшению общего количества энергии, поступающей в атмосферу (Гончаренко, Кивва, 2002).

Выше было показано, что вторжение протонов в ОКП вызывает заметное снижение содержания озона на его нижней границе и увеличение концентрации NO_2 . Поглощение солнечной радиации двуокисью азота вызывает резкое потепление в нижней части ОКП и, соответственно, похолодание в тропосфере. Согласно подобной модели (Пудовкин, 1996) интенсивные потоки космических лучей могут вызвать заметное похолодание на Земле, подобное явлению «ядерной зимы».

Это подтверждается исследованиями воздействия частиц солнечного ветра на климатические характеристики планеты.

На рис. 3.7 приведена схема, иллюстрирующая воздействие солнечных космических лучей на состояние климата Земли (Ogurtsov et al., 2002).

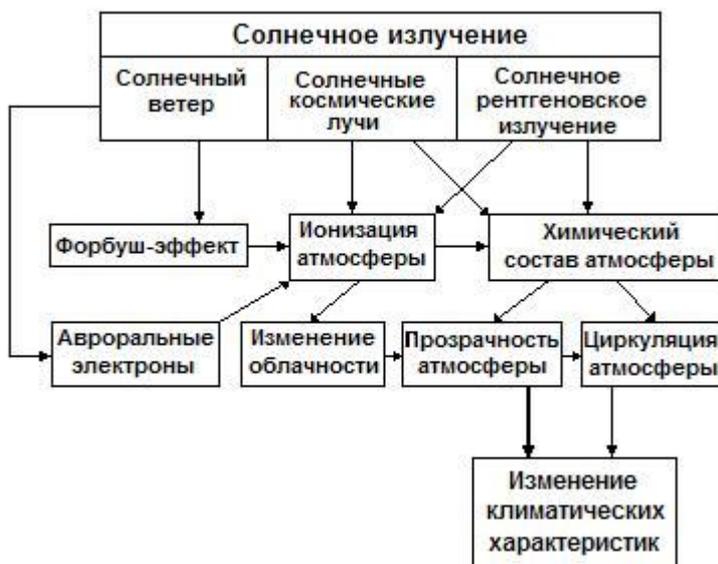


Рис. 3.7. Механизм воздействия солнечного ионизирующего излучения на климатические характеристики атмосферы Земли

В последние годы астрофизиками активно изучаются транзиентные источники гамма-излучения объектов, природа которых окончательно не установлена. По одной из моделей - это сильно замагниченные нейтронные звезды - магнитары. Перестройка их магнитного поля и приводит к вспышкам. Согласно другим представлениям – это могут явления в объектах внегалактического происхождения или вспышки гиперновых.

27 декабря 2004 года в Солнечную систему пришло гамма-излучение от объекта, находящегося в центральной области Галактики. В периоды активности данных объектов от них регистрируется в год несколько вспышек со светимостью $\sim 10^{33}$ - 10^{34} Вт в мягком гамма-диапазоне. Вспышка от источника SGR 1806-20 была гораздо мощнее, порядка 1 эрг/см²с (возможно в несколько раз больше, т.к. все наблюдавшие за данным событием приборы зашкалило). Вспышка была настолько сильной, что наблюдалось ее отражение от Луны. Это неожиданно много для данного класса объектов и слишком много для

высокочувствительных орбитальных обсерваторий, но для Земли 1 эрг на квадратный сантиметр – очень маленькая энергия, которая не могла серьезно повлиять на какие-либо протекающие на нашей планете процессы (хотя изменение ионизации верхних слоев атмосферы было отмечено) и, тем более, угрожать жизни на планете (www.astronet.ru - 23.02.2005).

Кроме того, в последнее время популярным стало обсуждение глобального воздействия на биосферу в различные геологические периоды потока космических лучей больших энергий и гамма-излучения, образованного при взрывах **близких сверхновых** (Кочаров, 2002; Benitez et al., 2002). В свое время этот вопрос поднимался еще И.С. Шкловским (1976).

Так, ряд авторов считает, что причиной массового вымирания, произошедшего примерно 450 млн. лет назад - в конце Ордовикского периода, - был мощный гамма-всплеск, вызванный взрывом сверхновой в относительной близости от Солнечной системы. Тогда по данным палеобиологии исчезли приблизительно 60% видов морских беспозвоночных (News.Battery.ru – 18.04.2005).

Современные модели гамма-всплесков утверждают (Thomas B. C. et al., 2004), что за последний миллиард лет Земля могла быть облучена гамма-всплеском, произошедшим в нашей Галактике, с расстояния не более 2 кпк. Эффект подобного облучения был исследован в двумерной модели атмосферы. При всплеске с экспозицией 100 кДж/м² длительностью 10 секунд содержание озона в среднем уменьшалось на 35% (в некоторых областях на 55%). Начальный уровень озона восстановился примерно через 5 лет.

Недавно была высказана простая и красивая идея (Smith et al., 2003): атмосферы Земли и Марса задерживают основную часть жесткого излучения от различных космических источников (в первую очередь от Солнца). Однако заметная доля энергии этих частиц может быть переизлучена вторичными электронами в результате процессов комптоновского рассеяния и рентгеновского фотопоглощения в биологически и химически активное ультрафиолетовое излучение (рис. 3.8). Доля переизлученной энергии может достигать 1% даже с учетом воздействия озонового слоя, т.е. солнечные вспышки оказывали на первичные земные организмы гораздо более сильное мутационное воздействие, чем считалось ранее

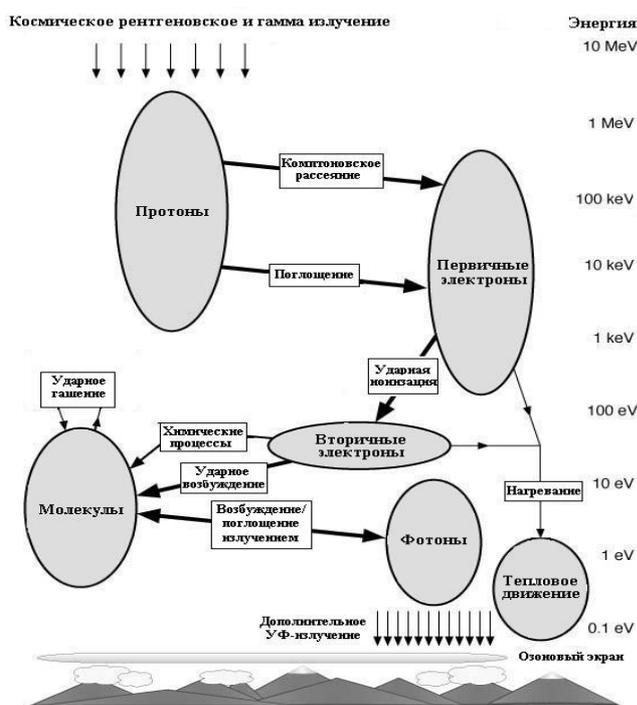


Рис. 3.8. Образование УФ-радиации под действием жестких космических излучений

В подтверждение этому в последнее время были получены данные, что при достижении рентгеновских вспышек Солнца марсианских окрестностей, они заставляют ионосферу планеты вырабатывать дополнительные ионы и электроны (www.spacenews.ru, – 23.02.2006).

Это еще раз подтверждает предположение, что потоки ионизирующих излучений, включающих космические лучи и электромагнитные излучения могли играть важную роль в становлении климата Земли и образовании и эволюции на ней биологической жизни.

3.1.3. Природа процессов в биосфере, вызванных космическими воздействиями

Все основные исследования природы процессов, возникающих в биосфере в результате космических воздействий тем или иным образом связаны с воздействиями Солнца.

Поскольку гелиофизические факторы влияют на ход важных и широко распространенных физико-химических процессов (в частности, протекающих в водных растворах), они должны воздействовать на многие стороны биологических явлений, что находит отражение в соответствующих изменениях показателей жизнедеятельности большинства живых организмов (*Горшков, 1995*).

Для спорадических возмущений солнечного происхождения (вспышек, внезапных магнитных бурь и т.д.) дело обстоит так, как будто в среде обитания появляется какой-то сигнал, на который реагирует организм. Свойства этого сигнала таковы, что он сопутствует и вспышкам, и магнитным бурям, возрастает с возрастанием географической широты, имеет сезонную зависимость (*Владимирский, Кисловский, 1982*).

Вместе с тем, природа физического механизма воздействия солнечной активности на биосферу до сих пор не раскрыта. Используя опыт космических исследований можно совершить прорыв в понимании физического механизма воздействия солнечной активности (трансформированной в ОКП) на земные явления и процессы (*Иванов-Холодный, 2000*).

В биосфере Земли последствия взаимодействия связаны с динамикой популяций животных, эпидемий, эпизоотий, количеством сердечно-сосудистых заболеваний.

Основным агентом-переносчиком перепадов космической погоды в биосферу, который сейчас не вызывает сомнений, являются электромагнитные поля низких и крайне низких частот. Особенно важны здесь квазипериодические вариации параметров этих полей с периодами, близкими к периодам важнейших биологических ритмов (*Владимирский, 2004*).

Перепады напряженности низкочастотных колебаний электромагнитного поля Земли, от спокойного к возмущенному весьма велики. К тому же, в этой области частот находится и «окно прозрачности» ионосферы. В этом диапазоне регистрируются короткопериодические колебания магнитного поля Земли – микропульсации. Они подразделяются на два класса: почти синусоидальные P_c и широкополосные P_i . Их важным свойством является зависимость амплитуды от широты: с увеличением широты и приближением к зоне максимальной повторяемости полярных сияний амплитуда колебаний растет (причем, обратно пропорционально частоте колебаний). Кроме того, микропульсации P_c обладают высокой проникающей способностью, а микропульсации P_i возникают не только во время магнитных бурь, но и в период развития солнечных вспышек одновременно с внезапным атмосферным возмущением. Спектр частот геомагнитных пульсаций заключен в пределах от 10^{-5} до 10^2 Гц с амплитудами 10^{-3} - 10^{-7}

Э. Некоторые типы пульсаций отмечаются одновременно на всем земном шаре. Иногда пульсации имеют региональный характер (*Ларин, 2001*).

Со стороны более высоких частот, чем у микропульсаций, ионосфера непрозрачна. Уровень напряженности геомагнитного поля здесь определяется на средних широтах атмосфериками, на высоких – УНЧ излучением магнитосферы, которое частично приходит из ионосферы. Существование постоянного фона атмосфериков связано с распространяющимся на большие расстояния излучением разрядов молний (максимум частот около 10 кГц). Эффекты сверхдальнего распространения радиоволн на этих частотах обусловлены наличием своеобразного волновода, образованного двумя проводящими поверхностями – ионосферой и поверхностью Земли. Благодаря ему же излучение электрических разрядов от центров грозовой активности в экваториальной зоне может фиксироваться в любой точке земной поверхности на средних широтах.

Со стороны более низких частот к полосе микропульсаций примыкают области периодических и циклических вариаций геомагнитного поля, связанные частично с собственными колебаниями Земли, а также частично с собственными колебаниями Солнца с периодом 2 часа 40 мин.

Есть основания считать, что высокочастотная область биоэффективных частот (~ГГц) обусловлена преимущественно вынужденным резонансом микромасштабных структур организма (ионы, аминокислоты, мембраны и т.п.), а низкочастотная (ОНЧ-УНЧ диапазон) – параметрическим резонансом крупномасштабных систем (сердце, мозг, кровеносная система и т.п.). Биоэффективные частоты определяются собственными частотами соответствующих систем организма и могут быть вычислены при знании масштабных факторов и характерных скоростей в рассматриваемой системе. Сравнение вычисленных биоэффективных частот с экспериментально выявленными показывают их хорошее соответствие друг другу (*Хабарова, 2004*).

Частоты биоритмов человеческого организма лежат, главным образом, в инфразвуковой и суперинфразвуковой области (*Мазур, Иванов, 2004*). Ритмы головного мозга: α -ритм имеет период ~0,07 с, β - 0,03 с, Δ - 0,3 с. Период глотательных движений составляет ~4 с, цикл сердечной деятельности – 0,8 с, период вдоха-выдоха – около 6 с, период, соответствующий частоте распространения нервных импульсов – около 0,02 с, средний период изменения биотоков в мышцах – 0,03 с.

Как в геофизических, так и в биологических процессах периоды колебаний менее суток, также как и колебательные процессы в других диапазонах спектра биологических ритмов, могут представлять собой синхронизованные с внешними факторами автоколебания. Основными здесь являются собственные колебания атмосферы-ионосферы (12 часов и гармоника), гравитационные собственные колебания Солнца (существование которых, по мнению некоторых специалистов, еще окончательно не доказано) – 180 мин, 160 мин и 120 мин, близкие к высоким гармоникам суток и собственным сейсмическим колебаниям Земли (60 мин, 44 мин и др.). В среде обитания эти колебания часто присутствуют в микровариациях атмосферного давления и низкочастотных электромагнитных полей. Согласно современным биофизическим представлениям, вариации этих экологических переменных воспринимаются организмами и могут сыграть роль «датчика времени» для некоторых биологических микроритмов. Эти соображения могут быть полезны при интерпретации ряда биологических результатов. Возможно, внутрисуточные периодичности риска заболеваемости соответствуют одному из подобных геофизических ритмов. Период 120 мин найден в активности мелких грызунов, наблюдаемых на обширных территориях. Некоторые биологические микроритмы, вероятно, представляют собой свободные автоколебания, никак не связанные с временной структурой среды обитания. Не исключено, однако, что близость α -ритма мозга человека

к фундаментальной частоте ионосферного волновода (8 Гц) не является случайной (Владимирский, Конрадов, 2004).

К примеру, в нижней части области E на высотах 85-95 км в период действия активных метеорных потоков на ночной стороне Земли появляется спорадический слой E_s , образованный ионами металлов Mg^+ , Fe^+ , Ca^+ с примесью Si^+ , Na^+ , Al^+ , Ni^+ (Иванов-Холодный, 1990; Трухин и др., 2005).

Его параметры следующие. Плотность потока энергии колеблется в пределах 10^{-5} - 10^{-7} Вт/м². Усредненный период пульсаций 0,02-0,05 Гц (Муртазов, 2004). Можно отметить в связи с этим, что проблема воздействия на биологические организмы инфразвуковых излучений сверхмалой мощности приобретает в последнее время некоторую актуальность (Владимирский, 2004).

Более энергетически заметным является процесс генерации инфразвуковых колебаний в атмосфере как следствие взаимодействия солнечного ветра с плазмой ОКП и атмосферой (Негода, Сорока, 2001; Сорока и др., 2004). Анализ спектров инфразвука показывает наличие частот с периодами характерными для солнечной активности 27 суток, 24 часа, 12 часов. Энергия инфразвука возрастает при падении солнечной активности.

Сценарий связи солнечной активности с инфразвуком в атмосфере сводится к схеме рис.3.9. Изменения солнечной радиации приводят к модуляции галактических космических лучей. Этот модулированный поток при взаимодействии с нижней атмосферой изменяет ее прозрачность путем образования аэрозолей и вариаций малых составляющих атмосферы (NO_x , H_2O , O_3 и др.). Изменения оптической прозрачности приводят к пространственным вариациям поглощения солнечной энергии в атмосфере. Вследствие этого в различных зонах атмосферы образуются температурные градиенты и тепловые неустойчивости, порождающие инфразвуковые колебания. Образовавшийся инфразвук может влиять на флуктуации интенсивности взаимодействия космических лучей с атмосферными аэрозолями. На рис.3.8 это отображено введением обратной связи. Инфразвуковые колебания могут усилить модуляцию прозрачности и эффект оптико-акустического преобразования в атмосфере.

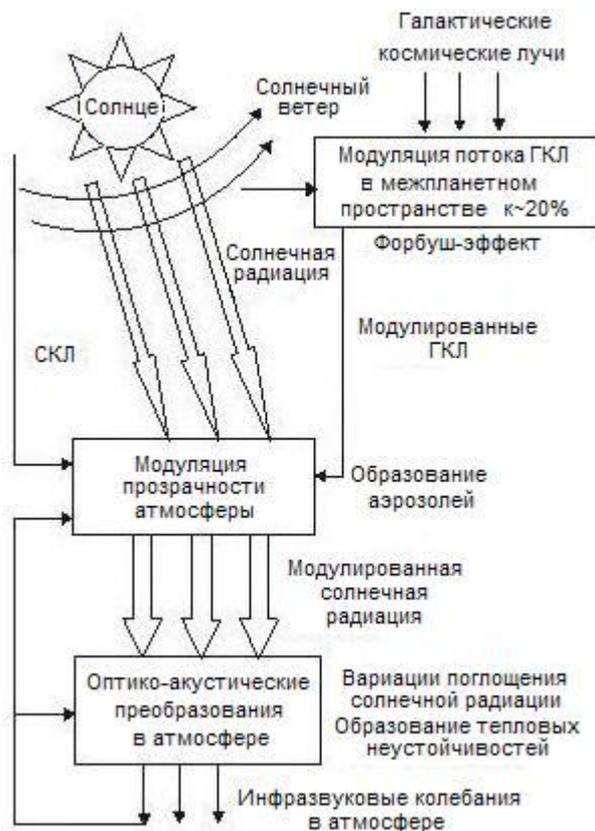


Рис. 3.9. Модель образования инфразвуковых акустических колебаний в атмосфере

Можно представить несколько схем воздействия солнечной активности на биосферу через компоненты околоземного пространства, как иллюстрацию действия и других источников (рис. 3.10-3.13 - Владимирский, Кисловский, 1982).

Здесь видно, что солнечная активность может оказывать влияние на биосферу не только через возмущения природного геомагнитного поля, но и посредством других физических агентов. Несомненно, определенное значение имеют вариации приземного ультрафиолетового излучения около 290 нм, происходящие вследствие динамических изменений в озоновом слое. Имеются основания предполагать, что солнечная активность оказывает достаточно сильное влияние на биологические организмы и через воздействие на изменения фона инфразвуковых акустических шумов, а также низкочастотных колебаний электрического поля Земли.

Вместе с тем, взаимодействие околоземной среды с солнечным излучением различных видов, другими факторами естественного происхождения происходит в течение всей эволюции Земли. Геофизика не имеет данных о том, что когда-либо ОКП под действием естественных причин полностью изменяло свои свойства и переходило в состояние с совершенно новыми параметрами, резко изменяя свое воздействие на биосферу (Муртазов, 2004б).

Таким образом, основными причинами, которые могут необратимо вывести ОКП из состояния динамического равновесия, могут стать техногенные воздействия. При этом следует иметь в виду, что их уровень постоянно нарастает и прямо зависит от экспоненциального роста потребления энергии человечеством.



Рис. 3.10. Воздействие солнечной активности на биосферу через сверхнизкочастотные колебания электромагнитного поля



Рис. 3.11. Воздействие солнечной активности на биосферу при деградации озонового слоя и увеличении интенсивности ультрафиолетовой радиации



Рис. 3.12. *Воздействие солнечной активности на биосферу при генерации инфразвуков в полярных сияниях*



Рис. 3.13. *Воздействие солнечной активности на растительные организмы при проникновении к поверхности электрического поля*

3.2. Техногенное воздействие на физическое состояние ОКП

3.2.1. Общая характеристика антропогенных воздействий на состояние ОКП

Весьма серьезным фактором заражения ОКП являлись не так давно испытания ядерного оружия. С 1945 по 1961 гг. в атмосфере взорвано более 400 ядерных зарядов общей мощностью до 550 Мт. Этим самым в атмосферу поднято 12 т радиоактивных продуктов, что вызвало сильнейшие геомагнитные возмущения и привело к почти необратимым изменениям в ионосфере, резко повысило ее радиоактивность (Дмитриев, 1995). Реальность воздействия таких испытаний на состояние озонового слоя была

подтверждена наблюдениями содержания озона в начале 60-х гг. XX в., когда ядерные взрывы проводились регулярно.

В то время в результате взрывов ядерных устройств в космосе возник квазистационарный пояс из электронов малых энергий, просуществовавший более 10 лет. Эффекты уменьшения содержания озона в верхней атмосфере после взрывов отмечались в течение нескольких лет.

Техногенное электромагнитное излучение является одним из видов глобального воздействия на ОКП, загрязняющим атмосферу и определяющим «космическую погоду» (Климов и др., 2000; Дмитриев, 1995). Основное воздействие на ОКП связано с потреблением человечеством электроэнергии: работой ЛЭП, крупных предприятий с большим энергопотреблением, радио- и телесвязи. Например, гармонические волны от ЛЭП могут создавать на определенных силовых линиях магнитного поля Земли «сток» низкоэнергичных частиц. Он образует заметную асимметрию в распределении электронов с энергией 2.5 кэВ в интервале долгот 50-110° з.д. над крупными промышленными объектами с развитыми энергетическими сетями (Климов и др., 2000). Электромагнитное излучение проводов ЛЭП, генерируемое стекающими частицами, варьируется в зависимости от дней недели и времени суток. Так называемый эффект уикенда (более равномерное распределение токов на Земле в конце недели и резкое возрастание их в понедельник в районах ЛЭП и крупных промышленных центров) наблюдается в виде вариаций техногенного электромагнитного поля даже в районе геостационарной орбиты. Излучение высоковольтных ЛЭП приводит к изменениям в ионосфере: в атмосферу проникают энергичные электроны из радиационных поясов, создавая новые зоны ионизации.

Естественное излучение в окрестностях Земли складывается из ряда компонентов: радиоизлучения атмосферных электрических помех, теплового радиоизлучения Земли, космического радиоизлучения, радиоизлучения Солнца и планет. В XX в. мощность техногенного радиоизлучения Земли значительно превзошла ее естественное радиоизлучение и стало самым заметным в Солнечной системе в полосе частот, больших 30 МГц (излучения на более низких частотах эффективно экранируются ионосферой). Только в США работают более 20 млн. передатчиков (Дмитриев, 1995).

Взаимодействие волн в условиях нелинейности приводит к нарушению принципа суперпозиции и возникновению «Люксембург-Горьковского эффекта» - кроссмодуляции. Нагрев ионосферы в поле мощной радиоволны может вызвать параметрическую неустойчивость в ионосфере, что приводит к аномально большому поглощению радиоволн и расслоению плазмы. В области резонанса $\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_H^2}$ образуются сильно вытянутые вдоль \vec{H} неоднородности ионосферы с продольным масштабом 1 км, поперечником 0,5 – 100 м, в принципе перспективные для дальней УКВ-связи (Прохоров, 1983).

В частности, в последнее время выявлена взаимосвязь появления сполохов полярных сияний с моментами включений мощного коротковолнового радиопередатчика (www.phys.web.ru, 18.01.2002). В поле очень мощных радиоволн разогрев настолько велик, что происходит электрический пробой газа. Наиболее распространенные передатчики в диапазоне частот 4 кГц÷2 МГц значительно нагревают ионосферу и изменяют параметры плазмы. Миллисекундные импульсы передатчика мощностью 2 МВт возбуждают плазменные волны, стимулируют эмиссии частиц и вызывают электромагнитные волны низкой частоты (Климов и др., 2000), способные отрицательно воздействовать на живые организмы. Таким образом осуществляется обратная связь между антропогенным воздействием на ОКП и его воздействием на биосферу.

Идея организации сверхдальней связи путем создания горячих неоднородностей ионосферы УКВ или лазерным излучением вполне реализуема, однако оценки

необходимых уровней энергии показывают, что проект явно не проходит по экологическим нормам влияния на окружающую среду. Снижение высоты слоя для искусственного зеркала до 30-60 км на границу между ионосферой и стратосферой, при котором мощность накачки можно несколько уменьшить, также неприемлемо из-за опасности катастрофической деградации озонного слоя в этих активированных областях за счет интенсивного образования оксида азота при высокочастотном разряде (Дмитриев, Шитов, 2003). Также экологически опасным для ОКП может явиться использование сверхмощных станций для РЛС-мониторинга космического мусора.

Необходимо проведение экологической экспертизы при реализации любых технических проектов в ионосфере – нижней области ОКП. При испытаниях первой советской водородной бомбы на о. Новая Земля с мощностью только 0,1 от номинальной по всему миру были обнаружены временные нарушения дальней коротковолновой радиосвязи, что свидетельствовало о значительном изменении концентрации электронов по слоям ионосферы.

С учетом такого влияния ионосферы на радиосвязь во всем мире исследованиям этой оболочки Земли уделяется большое внимание. На постоянной основе эксплуатируются «ионосферные патрули», осуществляющие вертикальное и наклонное зондирование ионосферы радиолокаторами и лазерами. Создание и эксплуатация спутниковых среднеорбитальных (высота орбит около 20 тыс. км) радионавигационных систем (СРНС) типа GPS (США) и «Глонасс» (Россия) требует постоянного мониторинга состояния ионосферы для поддержания гарантированной точности навигации и определения координат на поверхности Земли подвижных объектов (Скорик, 2004).

Потоки энергии техногенных воздействий на ОКП и биосферу в целом достаточно велики (табл. 3.5) и тенденции их роста вряд ли будут меняться в сторону уменьшения.

Таблица 3.5

**Сравнение потоков энергии в ОКП от Солнца и Земли
природного и техногенного характера**

Источник энергии	Область вторжения	P , Вт	Способ переноса	f , кГц
1. Оптический диапазон Солнца	Лобовая часть земной магнитосферы	10^{17}	ЭМИ*	—
2. Солнечный ветер	Дневной касп и хвост земной магнитосферы	10^{11} – 10^{12}	ПЧ	0–300
3. Молнии	Атмосфера и нижняя ионосфера	10^7	ЭМИ	0.2–30
4. Землетрясения, взрывы	Литосфера, атмосфера, нижняя ионосфера	—	ПЧ, АВ, ЭП	—
5. ЛЭП	Литосфера, атмосфера, нижняя ионосфера	$3 \cdot 10^7$	ЭМИ	0.05–5
6. ОНЧ-передатчики	Атмосфера, ионосфера	$4 \cdot 10^8$	ЭМИ	10–30
7. СВ и КВ-передатчики	Атмосфера, ионосфера	10^9	ЭМИ	0–5

Примечание. ЭМИ — электромагнитное излучение; ПЧ — потоки частиц вещества; АВ — акустические волны; ЭП — сейсмогенные электрические поля

После начала космической эры началось проведение активных экспериментов в ОКП: электрогенерация плазмы, электронные пушки (модификации состояния

ионосферы), взрывы, выбросы различных химических веществ и т.д. Тенденции последних трех-четырёх десятилетий свидетельствуют о том, что активные воздействия с небольшими количественными флуктуациями будут продолжаться и будет наращиваться их география. Время показало, что вплоть до конца второго тысячелетия шло возрастание научного и прикладного значения этих воздействий – рис. 3.14 (Дмитриев, 1993; Дмитриев, Шитов, 2003).

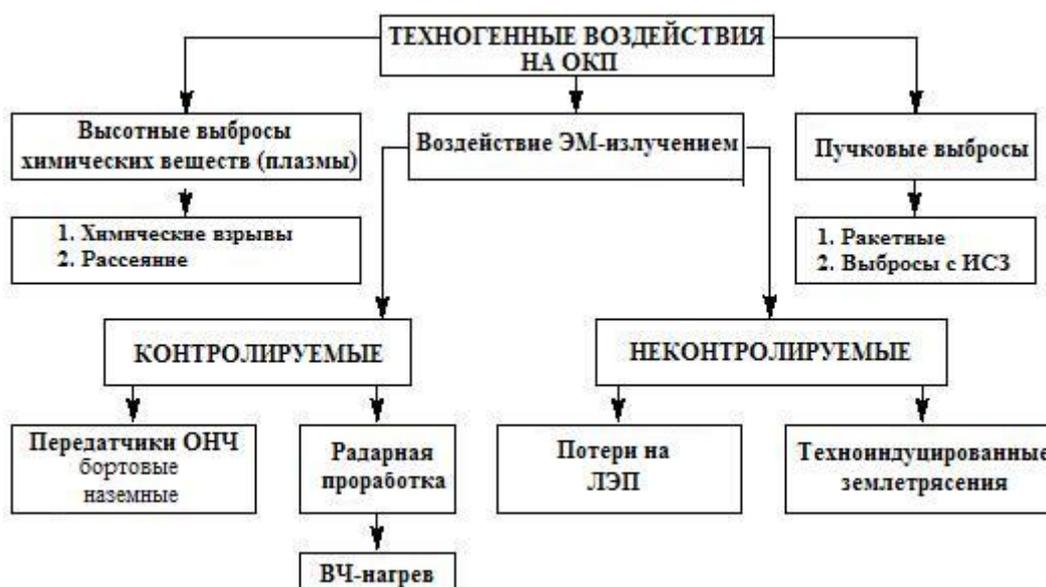


Рис. 3.14. Схема основных средств техногенного воздействия на ОКП (Дмитриев, Шитов, 2003)

3.2.2. Проблема техногенного воздействия на озоновый слой

Состояние атмосферного озонового слоя, как оказалось, также в достаточной степени зависит от процессов, протекающих в околоземном пространстве и техногенного воздействия на них. Проблема его нарушения явилась одной из первых проблем, связанных с техногенным загрязнением ОКП.

Это имеет особую важность ввиду того, что процессы в озоновом слое, оказывающие сильнейшее воздействие на биосферу происходят на границе ОКП и зоной биологической среды.

Уменьшение толщи озона на 1% приводит к повышению интенсивности УФ-излучения у поверхности Земли в средних широтах в среднем на 2%. Полное же изменение толщи озона за 11-летний солнечный цикл составляет 8%. Проблема стратосферного озона состоит из ряда взаимосвязанных проблем: 1) глобальной убыли озона – с конца 60-х гг. Земля потеряла от 3-4% до 12-14% озона – и процесс этот нарастает; 2) образования озоновых дыр (в 2000 г. озоновая дыра над Антарктидой достигла рекордных размеров в $28,3 \cdot 10^6$ км² – Rambler-Science, 2001), 3) кратковременных снижений на десятки процентов общего содержания озона. Наиболее часто снижение концентрации озона отмечалось над Исландией, Гавайскими островами и Красным морем, где наблюдается современный вулканизм и выделяются большие объемы восстановленных газов (рис. 3.15).

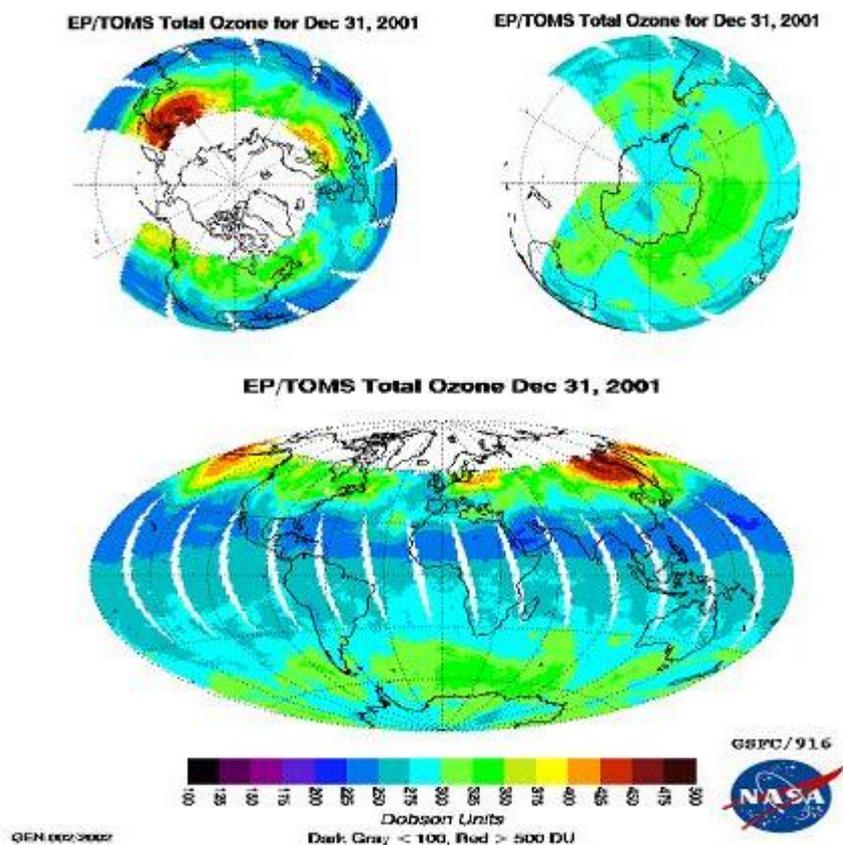


Рис.3.15. Картина распределения озона над земной поверхностью по данным службы “Earth Probe TOMS”

Добсона шкала – шкала, используемая для оценки общего содержания озона в атмосфере. Единица шкалы соответствует одной тысячной количества озона в вертикальном столбе атмосферы, численно равного толщине слоя и выражающегося в $\text{атм} \cdot \text{см}$ (рис. 3.16).

Толщина озонового слоя, приведенного к нормальным условиям ($p = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $t = 0^\circ \text{ C}$), в среднем для всей Земли составляет 2,5 – 3 мм (на высоких широтах до 4 мм, в экваториальной зоне – до 2 мм). Таким образом, в процентном отношении содержание озона в атмосфере ничтожно мало.

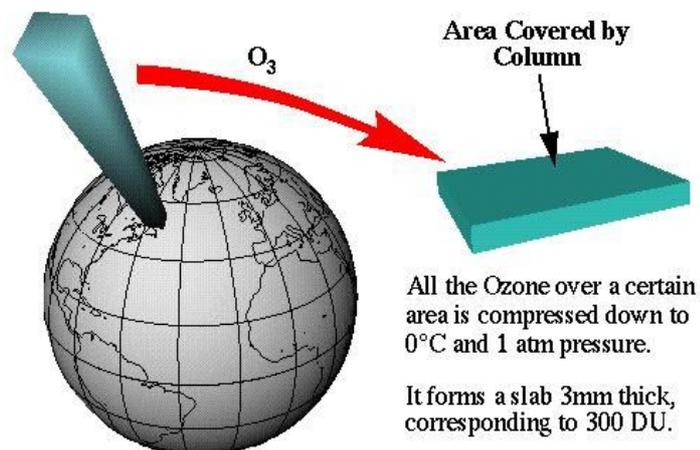


Рис. 3.16. Единица Добсона (сайт службы TOMS)

Основными поглотителями атмосферы коротковолновой части УФ-излучения Солнца являются атомы водорода, гелия, азота, кислорода, озона. Водород является основным поглотителем УФ-излучения на высотах более 2000 км, где атмосфера переходит в межпланетный газ, ниже эта функция лежит в основном на гелии, еще ниже на кислороде и азоте. Излучение в области 130-170 нм поглощается молекулами кислорода на высотах порядка 100 км (рис. 3.17).

Процесс формирования озонового слоя (его максимальная концентрация приходится на высоты 25-30 км) происходит при совокупном воздействии солнечного излучения, динамических и химических процессов в атмосфере. Образование самого озона идет при фотолизе кислорода ультрафиолетом. То есть, при повышении солнечной активности происходит увеличение концентрации озона в стратосфере.

Фотохимическая реакция, приводящая к образованию озона, состоит из серии событий, начиная от поглощения света молекулой кислорода и кончая образованием стабильных молекул. Энергия связи молекулы кислорода составляет 5,115 эВ. При поглощении такого кванта молекула кислорода диссоциирует на два нормальных атома. При большей энергии кванта продуктами распада будут возбужденные атомы кислорода.

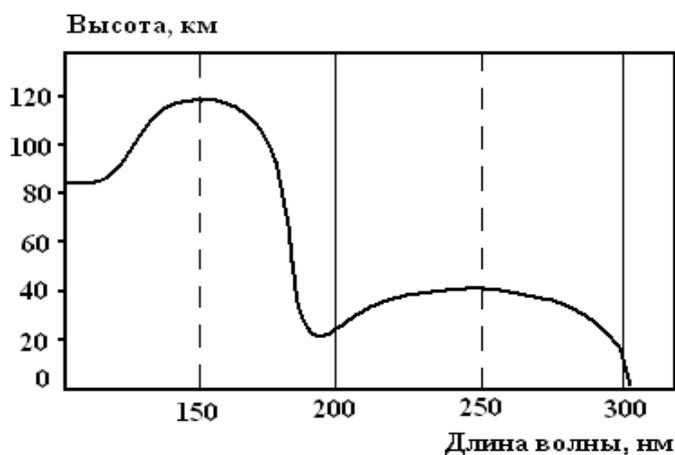
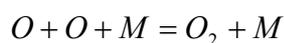
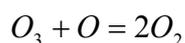
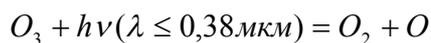
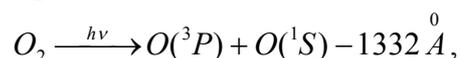
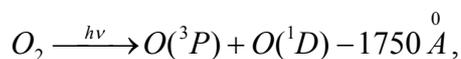
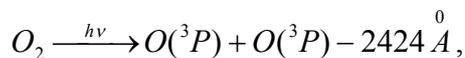


Рис. 3.17. Зависимость высоты, на которой происходит поглощение 90% солнечного света, от длины волны излучения. Коротковолновое излучение (130-170 нм) поглощается уже на высоте 100 км молекулами кислорода O_2 . А на высоте 40 км озон O_3 поглощает ультрафиолет длиной волны от 220 до 280 нм. В отсутствие озона это излучение доходило бы до Земли беспрепятственно

Образование молекул озона и их взаимодействие с атомами и молекулами кислорода и катализатора M в наиболее общем случае описывается циклом Чепмена



Пороговые длины волн поглощаемого излучения, при которых происходит фотодиссоциация молекулярного кислорода, следующие:

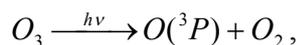


Здесь состояние $O(^3P)$ является нормальным, а состояния $O(^1D)$ и $O(^1S)$ - возбужденными. Таким образом, помимо атомов кислорода при его облучении возникают его возбужденные молекулы. Все эти активные частицы вступают во вторичные реакции с образованием конечного продукта – озона.

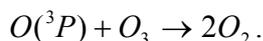
Последующее разложение озона образует полосы поглощения излучения в различных диапазонах спектра. Наиболее важные (полосы Хартли) лежат в области 200-300 нм, здесь коэффициент поглощения озоном солнечного излучения составляет в максимуме $k=135 \text{ см}^{-1}$, что дает величину общего поглощения 10^{40} . К полосам Хартли примыкают полосы Хиггинса (320 нм) и Шалона-Лефевра (340 нм) с коэффициентами поглощения на несколько порядков меньше. В видимом участке спектра расположена широкая полоса Шапнюи (500-700 нм), с которой связана синяя окраска озона. Очень сильное поглощение озона наблюдается в области вакуумного ультрафиолета (100-200 нм), что вместе с полосами Хартли приводит к обрыву солнечного спектра у поверхности Земли при длинах волн, меньших 290 нм, что и является защитой органического вещества от жесткого излучения.

Полосы, соответствующие колебательно-вращательным переходам в молекуле озона, расположены в инфракрасной области спектра (3-15 мкм). Чисто вращательные спектры озона наблюдаются в микроволновой области спектра (1-10 см).

Поскольку озон образуется при воздействии на него электромагнитного излучения, диссоциация его также является продуктом воздействия излучения. Например, первичный процесс фотодиссоциации молекулы озона в полосе Шапнюи происходит как

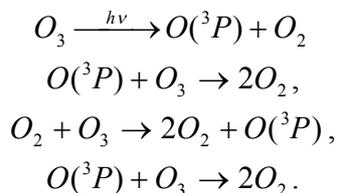


За ним следует вторичный процесс взаимодействия атомарного кислорода с другой молекулой озона



То есть в данном случае в результате поглощения одного кванта света разрушаются две молекулы озона: квантовый выход реакции разложения в полосах Шапнюи равен 2.

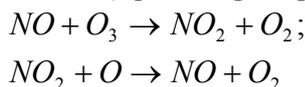
В полосах Хиггинса он равен 4:



Квантовый выход фотодиссоциации озона при возбуждении в полосах Хартли может быть равен шести.

При усилении солнечной активности происходит увеличение концентрации озона в стратосфере.

Наиболее эффективным веществом, являющимся катализатором реакций приведенного типа, является оксид азота (Ортенберг, Трифонов, 1990),



Реакции, подобные последней, можно записать для хлора, фтора и некоторых других веществ. Однако, по сравнению с потоком хлорфторметанов все остальные техногенные источники дают относительно малый вклад. Именно хлорфторметаны - фреоны, имеющие химические формулы типа $CFCl_3$, $CHFCl_2$, $C_3H_2F_4Cl_2$ и др., являются, как считает наибольшее число исследователей, наиболее ощутимыми катализаторами реакций разрушения озонового слоя Земли.

В связи с общепринятым мнением о воздействии хлорфторуглеродов на озоновый слой в 1985 г. была принята Венская конвенция по защите озонового слоя, а 1.01.1989 г.

был составлен Международный (Монреальский) протокол о запрещении производства фреонов. В России последнее постановление Правительства №1368 о ввозе и вывозе из страны озonoобразующих веществ подписано 10.12.1999 г.

В природе основным источником оксида азота NO является оксид азота N_2O , образующийся в бактериальных процессах на земной поверхности и проникающий в стратосферу.

Основными техногенными источниками фреонов в атмосфере являются:

1. Выбросы в атмосферу компонентов и отходов химической и электронной промышленности.
2. Транспорт.
3. Авиация.
4. Запуски ракетной техники. На их долю приходится уже до 5-7% от общего фона загрязнения атмосферы транспортными средствами.
5. Высотные ядерные взрывы являются мощнейшим катализатором диссоциации озона.

Вместе с тем, в начале XXI века появились исследования естественных причин нарушения озонового слоя.

Попадание космических тел естественной или техногенной природы из ОКП в стратосферу способствует резкому повышению образования оксида азота. Так, при падении Тунгусского метеорита в 1908 г. на высотах 30-100 км образовалось около $30 \cdot 10^9$ кг оксида азота, что резко уменьшило прозрачность атмосферы в УФ-области спектра в последующие 3 года (*Ортенберг, Трифионов, 1990*). С другой стороны, такое количество оксида азота – отличного удобрения, - стимулировало рост леса в районе падения Тунгусского тела (*Боярчук, 1999*).

К образованию большого количества оксида азота может привести резкое увеличение потока космических лучей больших энергий в ОКП как вследствие солнечной вспышки, так и вспышки близкой сверхновой.

Изучение влияния солнечных протонов на состояние озонового слоя, проводившееся НАСА в июле 2000 г., показало, что протоны расщепляют молекулы азота, превращая их в оксид. Последнее может разрушить до 9% озонового слоя. Кроме того, протоны расщепляют еще молекулы водяного пара, а появившийся гидроксил уничтожает до 70% озона в мезосфере на высотах 50-90 км (*www.nature.ru, 2003*).

В ряде работ (*Онищенко, 2001; Lu, Sanche, 2001*) было показано, что механизм формирования озоновых дыр связан с воздействием на атмосферные процессы космических лучей.

Интенсивность космических лучей изменяется в зависимости от широты (над полюсами она на несколько десятков процентов больше, чем на экваторе), что связано с влиянием магнитного поля Земли на заряженные частицы. Также известно, что интенсивность космических лучей меняется в пределах 11-летнего цикла солнечной активности, причем интенсивность космических лучей изменяется в противофазе с солнечной активностью. Анализ данных многолетних измерений интенсивности космических лучей и содержания озона в стратосфере (в зависимости от географической широты, высоты, времени года) показал, что существует явно выраженная корреляция между образованием областей с пониженным содержанием озона и интенсивностью космических лучей. При попадании в атмосферу высокоэнергетичные частицы испытывают столкновения с ядрами атомов азота и кислорода. Одним из результатов многоступенчатых процессов распада образующихся при этих взаимодействиях частиц является появление большого числа низкоэнергетичных электронов. Взаимодействие электронов с фреонами ведет к диссоциации молекул фреонов, например, по следующей схеме $e^- + CF_2Cl_2 \rightarrow Cl + CF_2Cl$, причем сечение этого процесса на 3 - 4 порядка больше, чем для фотохимической диссоциации. Показано, что при низких температурах (менее 200

К) такие процессы должны достаточно интенсивно протекать для молекул фреонов, адсорбированных на поверхность частичек льда. Именно такие условия существуют в огромных приполярных массивах стратосферных (существующих на высоте 15 - 20 км) облаков в зимний период (заметим, что недавно было показано, что увеличение интенсивности космических лучей приводит к увеличению площади поверхности Земли, закрытой облаками). Предполагаемая последовательность процессов, ведущих к обеднению озонового слоя, изображена на рис. 3.18. Космические лучи создают в частичках льда, содержащихся в плотных приполярных облаках (PSC), электроны, которые взаимодействуют с молекулами фреонов (CFCs), приводя к их диссоциации. В результате создается значительная концентрация ионов (и молекул) хлора. Действие солнечного света приводит к их превращению в атомы хлора, которые взаимодействуют с молекулами озона, разрушая их. Как показывают данные наблюдений, минимальная концентрация озона действительно наблюдается в приполярных областях в начале весны, когда заканчивается полярная ночь (Lu, Sanche, 2001).

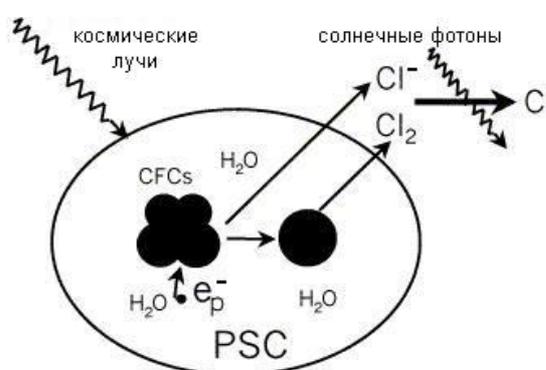


Рис. 3.18. Разрушение фреонов под действием космических лучей

Дегазация земных недр.

Систематизация данных по потокам природных газов, корреляция положения центров дегазации Земли с наиболее устойчивыми озоновыми аномалиями позволил сделать ряд выводов (Веймарн и др., 1998; Сывороткин, 1998): 1. Озоновый слой подвержен разрушению флюидными потоками, восходящими из расплавленного земного ядра; 2. Распределение локальных минимумов озонового слоя контролируется мировой рифтовой системой, дегазационная активность которой возрастает в южном направлении, достигая максимума над Антарктидой. Центры озоновых аномалий совпадают также с поясами развития кимберлитового алмазоносного магнетизма; 3. Изучение осадочной оболочки Земли приводит к выводу о периодичности разрушения озонового слоя в прошлом в связи с импульсами усиления водородной дегазации ядра планеты.

Полярные стратосферные облака.

1) Разрушение озонового слоя над Арктикой происходит намного быстрее, чем предполагалось, из-за побочных эффектов глобального потепления.

Если верхние слои арктической атмосферы становятся холоднее – это следствие изменений климата, – тогда скорость истощения озонового щита могла бы быть в три раза выше, чем принято считать. Потери озона жёстко связаны с количеством полярных стратосферных облаков (Rex M., et al, 2004). Химические реакции в облаках преобразовывают промышленный хлор в реактивную форму, которая разрушает молекулы озона.

2) В течение холодной антарктической зимы, когда температура нижней стратосферы падает до 80 градусов ниже нуля, холодный воздух начинает опускаться вниз, в результате чего под действием сил Кориолиса на высотах 10-20 км образуется

полярный вихрь, изолирующий воздух внутри своего объема от остального пространства. В этом воздухе образуются стратосферные полярные облака, содержащие молекулы воды и азотной кислоты (она в небольших количествах постоянно образуется из окислов азота природного происхождения). На поверхности частиц облаков протекают реакции, приводящие к образованию из слабоактивных, достаточно устойчивых соединений хлора малоустойчивых молекул Cl_2 и $HOCl$. Процессы идут в течение всей зимы, в результате чего к ее концу в полярном вихре накапливается значительное количество этих слабосвязанных компонент. С восходом солнца в начале весны, то есть в начале сентября, они легко распадаются, и образуются активные хлорные частицы, начинающие разрушать озон цепным путем.

Поскольку вихрь еще существует и никакого обмена с соседними, богатыми озоном областями стратосферы нет, содержание озона быстро уменьшается, и внутри вихря, на высоте 10-15 км, озон полностью исчезает. Далее происходит разогрев воздуха, распад вихря и расползание остатков дыры по Южному полушарию (Ларин, 2001).

Результаты анализа содержания озона в 2000-2004 гг. показывают (Крученицкий Г., Звягинцев А., Зуев В., 2004), что озоновый слой Земли несколько восстановился. В северном полушарии его параметры вернулись к уровню 1970-х гг., то есть того времени, когда озоновый слой считался невозмущенным. Так, практически исчезли хорошо известные озоновые дыры над Восточной Сибирью. Перестала расти и знаменитая Антарктическая озоновая дыра. Озоновый слой над европейской территорией России тоже больше не истощается. Интересно, что столь быстрое восстановление озонового слоя происходит при максимальных концентрациях в атмосфере хлорфторуглеродов. Полученные результаты ставят под сомнение чисто химическую теорию разрушения озона, где главный виновник – фреоны.

Напротив, анализ поведения во времени общего содержания озона указывает на то, что пространственное расположение крупных озоновых аномалий подчиняется определенным закономерностям. Например, с большой вероятностью озоновой дыре в Северном полушарии соответствует зона с повышенным содержанием озона в южном. А аномалии в высоких широтах (60° – 80°), как правило, наблюдаются спустя месяц-два после аномалий в средних широтах (30° – 60°). Эти факты свидетельствуют в пользу того, что появление и исчезновение озоновых дыр объясняется динамикой самого озонового слоя и изменениями климата. Однако в полной степени исследовать долговременную цикличность этого процесса пока сложно, поскольку серьезно наблюдать за озоновым слоем начали не так давно – менее 50 лет назад. Тем не менее уже обнаружена связь изменений в озоновом слое с двухлетним (с периодом около 28 месяцев) и одиннадцатилетним циклами солнечной активности, а также с так называемыми Североатлантическим и Южным (связанным с явлением Эль-Ниньо) колебаниями.

Следует отметить, что некоторое восстановление в последние годы озонового слоя нельзя объяснить мерами, принятыми мировым сообществом для снижения выбросов в атмосферу, поскольку это восстановление происходит в условиях максимально повышенных концентраций хлорфторуглеродов в атмосфере. По сути, несмотря на все предпринятые человечеством усилия, содержание этих, считающихся «озоноопасными» веществ еще не начало возвращаться к доиндустриальному уровню. Это говорит о том, что мы пока еще очень мало знаем о природе озонового слоя и причинах его изменений и не можем делать точных прогнозов о состоянии озонового слоя даже в ближайшем будущем. Ясно одно – необходимо развивать и совершенствовать систему наблюдений за этим жизненно важным щитом Земли

3.2.3. Воздействие техногенных отходов на состояние ОКП

Проблема техногенных отходов в ОКП связана, главным образом, с космической деятельностью человечества, хотя можно найти некоторые примеры попадания сюда отходов и других видов антропогенного происхождения.

Проблему техногенных отходов в ОКП можно рассматривать как с точки зрения экологии космоса, так и исходя из вопросов воздействия этих отходов на земную природу с целью предотвращения (или, по крайней мере, уменьшения) такого воздействия.

Проблема увеличения числа техногенных объектов в ОКП становится все более актуальной в связи с рядом факторов:

- проблемами безопасности пилотируемых космических полетов;
- столкновениями космических объектов друг с другом или с техногенным мусором с образованием новых осколков;
- возможностью непрогнозируемого выпадения космических объектов и техногенных осколков на Землю, химическим, биологическим, радиоактивным заражением ее поверхности и атмосферы;
- разрушением космических объектов в результате взрывов на орбите и взрывов их ракет-носителей в верхних слоях атмосферы при старте, прямо воздействующих на земную природу;
- заражением верхней атмосферы, ионосферы, биосферы продуктами сгорания ракетного топлива при запусках космических объектов;
- возникновением помех астрономическим наблюдениям и различным экспериментам в ОКП;
- изменением свойств ОКП, верхней атмосферы и ионосферы Земли, что может привести к необратимым изменениям в биосфере.

В общем случае классификация техногенных воздействий на ОКП при осуществлении космической деятельности сводится к четырем типам загрязнений ОКП: механическому, химическому, радиоактивному, электромагнитному (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Типы и последствия техногенного загрязнения ОКП при осуществлении космической деятельности (Модель космоса, 2007)

Типы загрязнений	Источники	Последствия
Механическое	Фрагменты КА и ракет, частицы покрытий КА, твердые частицы выбросов РД	Космический мусор и пыль, повреждения КА, помехи астрономическим наблюдениям, воздействия на верхнюю атмосферу
Химическое	Ракетные двигатели, электроракетные двигатели, наземные источники	Ионосферные дыры, нарушения радиосвязи, изменения состава верхней атмосферы, разрушение озонового слоя, неустойчивости в магнитосфере
Радиоактивное	Бортовые ядерные энергетические устройства	Опасность радиоактивного загрязнения атмосферы и поверхности Земли при разрушении устройств
Электромагнитное	Бортовые передатчики ВЧ, наземные передатчики ВЧ и ОНЧ	Возмущения ионосферы и магнитосферы, высыпания заряженных частиц, помехи радиосвязи

Как было отмечено выше, опасность для запускаемых аппаратов представляет большое число техногенных отходов, возникших вследствие нескольких тысяч запусков и более ста разрушений, имевших место за годы космической эры. При столкновении с осколками космические объекты могут быть повреждены и не выполнять далее свои функции, а находящиеся на них люди могут погибнуть. Вообще любые столкновения в околоземном пространстве представляют потенциальную опасность, поскольку при этом возникает большое количество обломков, создающих дополнительную угрозу как столкновений в будущем, так и угрозу земной природе при своих падениях.

Возможные последствия столкновения космических аппаратов с техногенными осколками многообразны – от медленной эрозии поверхности (оптических приборов, датчиков, панелей солнечных батарей) до взрыва и полного разрушения. Достоверно установлено, что основную опасность представляют мелкие частицы, число которых резко увеличивается с уменьшением размеров. В настоящее время опасность столкновения космического аппарата с частицами размером более 1 см стала вполне реальной.

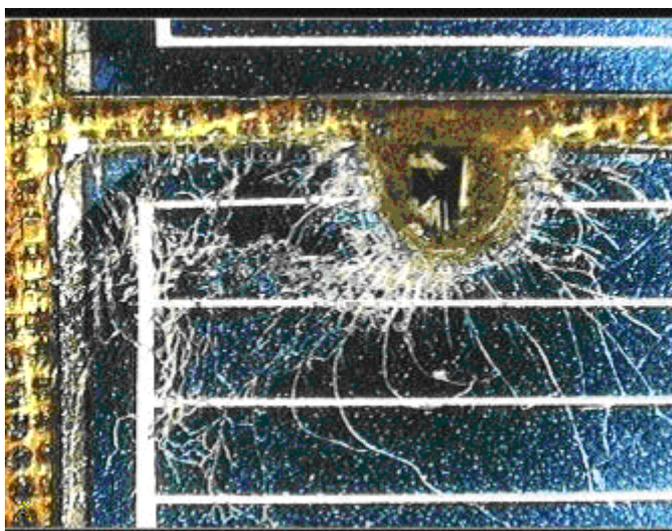


Рис. 3.19. *Отверстие, образовавшееся на поверхности солнечной панели космического телескопа Hubble при ударе частицы космического мусора*

Опасность столкновений чревата возникновением лавинообразного процесса загрязнения, что приведет помимо прочего, к невозможности дальнейшей космической деятельности человечества. Ориентировочная современная оценка таких столкновений – 1 за год. Некоторые специалисты считают, что этот лавинообразный процесс уже начался, его интенсивность будет нарастать и к середине XXI в. число столкновений увеличится в 10-20 раз (Назаренко, Чернявский, 1995). На 2000 г. зафиксировано одно столкновение (Алавердов и др., 2000а). Французский ИСЗ № 23606 (массой 50 кг, высотой орбиты 650 км) столкнулся с фрагментом РН «Ариан», в результате чего от него отделился большой наблюдаемый кусок гравистабилизирующей штанги.

11 марта 2000 после разрушения третьей ступени китайского РН CZ-4 в результате взрыва остатков топлива образовалось более 300 обломков (официально каталогизированы). 176 каталогизированных обломков оставалось в орбите на 17 января 2005. А 17 января 2005 произошло случайное столкновение между обломком китайской ракетной ступени, которая взорвалась в марте 2000, и американской ракетной ступенью, запущенной в 1974 году. Орбиты столкновения представлены на рис. 3.20 (Бурлак и др., 2007).

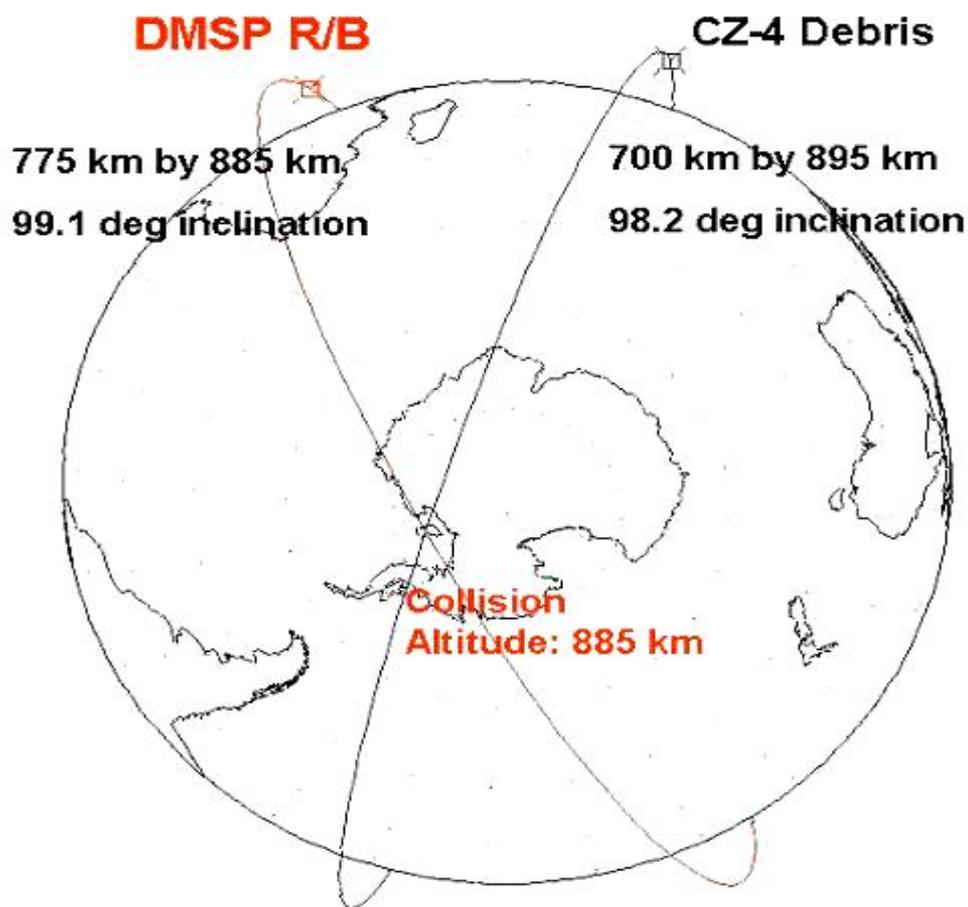


Рис. 3.20. Столкновение между американской ракетной ступенью запущенной в 1974 году и обломком китайской ракетной ступени, которая взорвалась в марте 2000

На рис. 3.21 приведены результаты расчета, выполненного для трех вариантов предполагавшегося ежегодного прироста числа искусственных объектов в интервале высот от 200 до 4000 км на 13 %, на 510 объектов и на 320 объектов в год (*Физика косм. простр.*, 1997). Такие варианты увеличения числа искусственных объектов в околоземном космическом пространстве были выбраны на основании анализа их количества в разные периоды до 1976 г. Последующее развитие событий пока подтверждает прогноз, сделанный для случая наиболее медленного прироста числа искусственных объектов в околоземном пространстве.

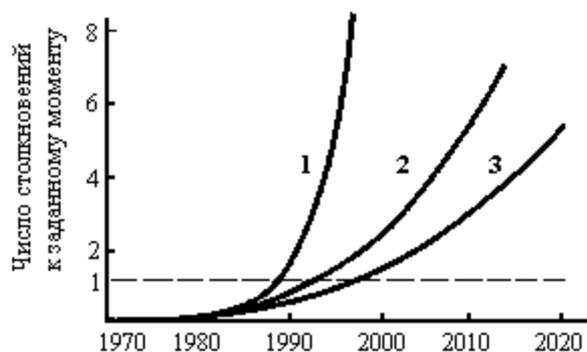


Рис. 3.21. Прогноз числа столкновений космических объектов в ОКП с телами крупных размеров

Этот прогноз иногда нарушается в случаях искусственного увеличения количества техногенного мусора. Пример: испытание противоспутникового оружия, проведенное 11.01.2007 г. Китаем, породило порядка 1 тысячи осколков, распределившихся по всей орбите (850 км) сбитого метеорологического спутника и за ее пределами. Количество крупных обломков сразу увеличилось на 10% (www.membrana.ru/articles/global/2007/02/06/195200.html).

При оценке риска столкновений космических объектов с техногенными отходами применяется ряд достаточно сложных методов. Так называемый прямой детерминированный метод использует в качестве входной информации дискретную совокупность космических объектов с определенными орбитами (Назаренко, Чернявский, 1995). В другом методе (Хуторовский, 1995) отыскиваются интервалы опасных сближений любых пар космических объектов, оцениваются геометрические характеристики каждого сближения и вероятность столкновения. Здесь задачи решаются с использованием архива опасных сближений, в котором содержится достаточно полная информация относительно всех опасных сближений, имевших место между любыми двумя объектами. Для формирования архива опасных сближений требуется весьма большой объем вычислений, требующий расчета всех сближений до 10^4 пар объектов на суточном временном интервале. Этот метод дает в настоящее время наиболее точные результаты по сравнению с другими. Очевидным преимуществом является также его способность выдавать предупреждения о возможных реальных столкновениях в будущем, что позволяет космическим службам организовать комплекс мероприятий по возможному предотвращению, а также наблюдению самого процесса столкновения.

Наиболее традиционным является статистический подход к расчету столкновений космических объектов. Его основной особенностью в отличие от детерминированного служит представление движения совокупности космических объектов во времени и пространстве в виде пуассоновского случайного процесса. При таком предположении эволюция ансамбля объектов описывается пространственной плотностью $F(\mathbf{r}, t)$, где \mathbf{r} – трехмерный вектор декартовых координат X, Y, Z , t – время. Физический смысл функции $F(\mathbf{r}, t)$ – число объектов на единицу объема в окрестностях точки \mathbf{r} в момент времени t (Хуторовский, 1995).

Из описанных методов расчета столкновений объектов в околоземном пространстве статистический проще, к тому же он позволяет моделировать более широкий круг ситуаций, нежели детерминированный. Однако, последний более точен и полон при анализе космической обстановки и может быть использован для настройки статистических моделей и повышения их точности. Поэтому при построении современных моделей космического мусора, с помощью которых выполняется анализ обстановки в околоземном пространстве, оценивается безопасность космических полетов, проектируются наземные и космические системы и измерительные средства, используются оба указанных метода.

В работе (Хуторовский и др., 1998) рассмотрены некоторые характеристики риска столкновений для орбитального комплекса «Мир», полученные по архивам в период с июля 1992 г. по август 1994 г.

Всего за этот период зафиксировано 124 опасных сближения каталогизированных объектов. Из них произошло:

- одно сближение на расстояние менее 1 км;
- три сближения на расстояние от 1 до 2 км;
- одно сближение на расстояние от 2 до 3 км.

Наиболее опасным для ОКС «Мир» оказалось сближение с ИСЗ «Космос-1508». 8 ноября 1992 г. космический аппарат сблизился с орбитальной станцией на минимальное расстояние $\approx 0,3$ км с относительной скоростью 12,7 км/с. Авторы оценивают значение вероятности столкновения при этом событии как $0,21 \cdot 10^{-4}$, что близко к ожидаемой годовой вероятности столкновения с каталогизированным объектом. 15.09.1997 г. экипаж

ОКС «Мир» перебрался в возвращаемый модуль «Союз» во время предсказанного опасного сближения с ИСЗ NSTJ-2 (Алавердов В.В. и др., 2000б).

В 2004 г. космические войска РФ выдали 34 предупреждения об опасных сближениях с Международной космической станцией (МКС) различных космических объектов, все они поступили в Центр управления полетами (www.SpaceNews.ru. – 23.11.2004).

Упрощенная формула для расчета годовой вероятности P_c столкновения между всеми каталогизированными и некаталогизированными искусственными объектами в ОКП получена в (Хуторовский и др., 1998):

$$P_c \approx 0.030 + 0.009 \frac{n_\Sigma}{n_p}, \quad (3.9)$$

где n_Σ - суммарное число некаталогизированных объектов различных размеров, учитываемых при расчете вероятности столкновения;

n_p - число каталогизированных обломков разрушений в российском каталоге.

Расчеты, проведенные далее, показывают, что суммарная вероятность столкновений практически не зависит от распределения числа некаталогизированных объектов по размерам, а определяется их общим числом. Чем меньше размер учитываемого при анализе риска столкновения объектов, тем больше величина этого риска. Столкновения среди объектов более 10 см по этим оценкам достаточно редки (примерно одно в 25 лет). Однако, для объектов размерами 1-2 см происходит уже одно столкновение в год, а для частиц техногенного мусора 0,1-0,2 см – до 200 в год.

В работе (Назаренко, Чернявский, 1995) исследовалась вероятность столкновения КА с некаталогизированным техногенным мусором в ОКП.

Эти расчеты проводились из предположения, что величина d возможных размеров техногенных космических отходов задается плотностью распределения $p(d)$. Методика оценки среднего числа ожидаемых столкновений N некоторого космического аппарата диаметром $D_{КА}$ с космическим мусором разных размеров основана на интегрировании дифференциального уравнения

$$\frac{dN(D)}{dt} = \frac{\pi}{4} * \int_d (D + d)^2 * p(d) * \rho(t) * \int_{A=0}^{2\pi} p(t, A) * V_r(t, A) * dA * dd \quad (3.10)$$

Здесь $\rho(t)$ – плотность космического мусора (число объектов в единице объема в данной точке околоземного пространства, A – азимут относительно скорости рассматриваемого объекта и приближающегося к нему объекта, $p(t, A)$ – нормированная плотность распределения возможных значений азимута, $V_r(t, A)$ – относительная скорость космического объекта.

Произведение второго интеграла на плотность имеет смысл потока космического мусора через сферическую поверхность с единичной площадью сечения.

По выражению (3.10) определялась вероятность столкновения КА с фрагментами техногенного космического мусора, в частности ОКС «Мир» (рис. 3.22).

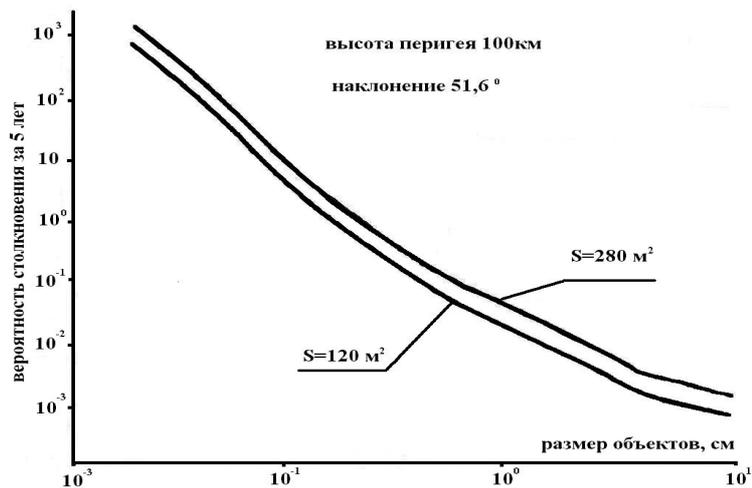


Рис. 3.22. Вероятность столкновения ОКС Мир с космическим мусором для различных площадей соударения

Также показано, что вероятность столкновения станции с осколками размерами более 1 см составляла несколько процентов, что при средней скорости столкновения около 12 км/с может привести к катастрофическим последствиям. Вероятность столкновения с течением времени растет, и уже сейчас возникла проблема разработки способов защиты проектируемых аппаратов, в частности Международной космической станции, размеры которой значительно превышают размеры ОКС «Мир».

Прогноз вероятности соударений космических объектов с мусором в зоне пилотируемых орбит (Дмитриев, 1995) показывает, что в общем на протяжении до 2020 г. она будет только возрастать (рис. 3.23), отражая общую тенденцию возрастания объема техногенного мусора в ОКП.

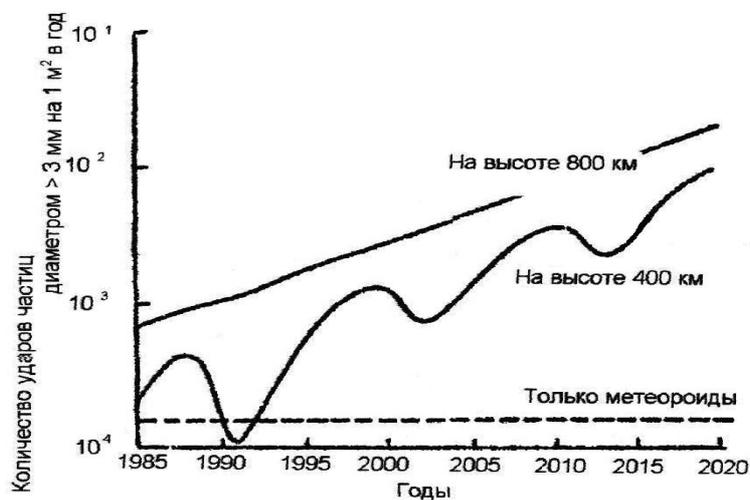


Рис. 3.23. Прогноз возрастания вероятности соударений космических объектов с частицами космического мусора для высот 400 и 800 км

Достаточно важной причиной в увеличении числа техногенных объектов в ОКП являются взрывы спутников на орбите или взрывы последних ступеней ракет-носителей на последнем участке выведения их на орбиту, которые начались еще на заре космической эры. Так, например, взрывы вторых ступеней семи ракет Дельта увеличили объем искусственного космического мусора на 1300 наблюдаемых и каталогизированных фрагментов (Clark, 1994). Распад широко известного спутника-баллона PAGEOS дал до 80 осколков (Касименко, Рыхлова, 1995). Максимальное число осколков было получено при

взрыве верхней ступени ракеты-носителя Титан-Транстейдж – 509. В 90-х годах взрывы происходили с верхними ступенями ракет Титан, Космос, Ариан, Рокот, Пегас (Рыхлова, 1995). С 1961 по 2002 годы зарегистрировано 182 взрыва на околоземных орбитах (Алавердов и др., 2000; Рыхлова, 2003), в среднем по 3-5 в год.

Подсчет числа осколков, образующихся при взрывах и распадах космических объектов на геостационарных орбитах, ограничен размерами ~1 м. Оценки их числа дают величину, по крайней мере, в 3 раза превышающую количество каталогизированных объектов (Касименко и др., 1995, 2000).

Считается, что на низких орбитах до 5000 км около 40% всего количества крупных и мелких осколков образовано в результате взрывов искусственных космических объектов (Рыхлова, 2003).

На рис. 3.24 приведена фотография облака фрагментов разрушения высокоорбитального объекта, происшедшего 14.02.2007 (<http://www.st-suunnittelu.fi/romu/>). На снимке хорошо видны треки от нескольких десятков объектов, движущихся по схожим траекториям. Анализ обстоятельств, при которых были получены фотографии, позволил предварительно отождествить разрушившийся объект. Им оказался так называемый блок ДУ СОЗ (блок двигательной установки системы обеспечения запуска), отделяемый в процессе полёта от российских разгонных блоков (РБ) типа ДМ, ДМ-2, ДМ-2М. В каталоге Стратегического командования США этот объект имеет номер 25054 и международное обозначение 1997-070F. Он был отделён от РБ ДМ-2М, использованного 12.11.1997 для запуска российского космического аппарата «Купон» (Сайт ПулКОН, 14.03. 2007).



Рис. 3.24. Первая фотография облака фрагментов объекта 25054, сделанная в Финляндии. Время экспозиции кадра - 10 секунд. 17:23:47 UTC 14.02.07

Весьма впечатляющим выглядит взрыв разгонного блока «Бриз-М» на высокоэллиптической орбите. Он должен был вывести спутник Arabsat 4A 28 февраля 2006 г., а почти через год, 20 февраля 2007 г. австралийский любитель астрофотографии

Ray Palmer обнаружил на снимке (рис. 3.25) явление, похожее на комету - "Бриз-М" прекратил свое существование, распавшись на сотни фрагментов.



Рис. 3.25. Снимок взрыва «Бриз-М» 20 февраля 2007 г. с сайта http://www.naturespeak.com.au/Southern%20Cross_Phenomenon.php

По неофициальным данным взрыв "Бриза-М" породил более тысячи фрагментов, которые теперь минимум в течение года будут регулярно пересекать орбиту МКС (Молотов, 2007).

Приведем здесь результаты моделирования последствий взрывов ИСЗ Экран-2 (1978 г.) и Транстейдж (1992 г.) на геостационарной орбите (Вершков и др., 2000, 2001).

При скорости взрыва 250 м/с максимальные изменения наклона и долготы узла орбиты фрагментов относительно орбиты ИСЗ не превысили $\pm 4,7^\circ$. Перигейные и апогейные расстояния орбит фрагментов находятся в пределах 4,8-9,9 радиусов Земли, то есть различаются на 23 000 км. Все орбиты фрагментов пересекаются в точке взрыва.

Родительское тело также изменяет свою орбиту при взрыве, его можно считать одним из самых больших фрагментов. При скорости взрыва большей 100 м/с самые крупные осколки получают приращение скорости 1-10 м/с. Вариации их элементов орбит невелики, эволюционируют примерно одинаково. При максимальных скоростях появляется большое число мелких осколков со значительным разнообразием орбит. Орбиты фрагментов массой от нескольких граммов до килограмма распределяются в пространстве с достаточно большим эксцентриситетом. Более мелкие осколки улетают с большей скоростью на большие расстояния.

В экваториальной геоцентрической системе координат область движения каталогизированных геостационарных искусственных объектов определяется в виде тора, наклоненного к экватору на $7,35^\circ$ шириной по склонению 15° и толщиной по радиусу 6000 км. На рис. 3.26 показана эта область и область движения осколков ИСЗ после одного взрыва за один оборот. Разница величин больших полуосей орбит фрагментов приводит к существенному различию отвечающих им плоскостей Лапласа. В результате эволюции максимальные значения наклона орбит наиболее удаленных осколков достигает 28° .

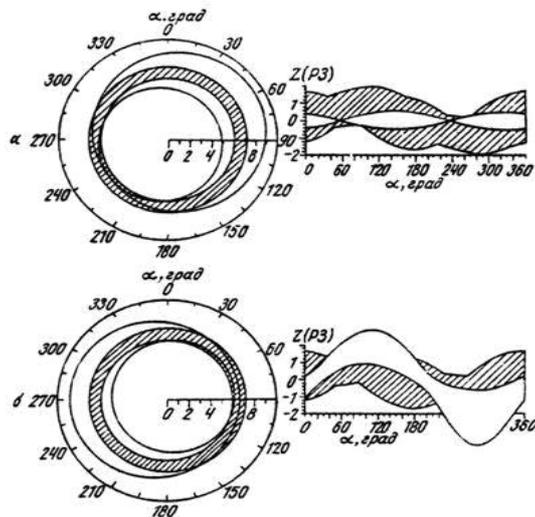


Рис. 3. 26. Эволюция облака осколков после взрыва ИСЗ на геостационарной орбите

Таким образом, в предположении того, что приращение скоростей обломков спутника Экран-2 при взрыве составило до 250 м/с, область их современного расположения по сравнению с геостационарным кольцом увеличилась в два раза по расстоянию от Земли в 5 раз по ширине с максимальной плотностью искусственного мусора внутри кольца.

Результаты моделирования хорошо коррелируют с результатами специальной наблюдательной программы геостационарного мусора ESOC (*Schildknecht, etc., 2001*).

Высокая точность разработанной долгопериодической теории движения дает возможность использовать ее при детерминированном моделировании засоренности геостационарной зоны (*Вершков, и др., 2001*).

В работе (*Бордовицына, Дружинина, 1998*) приведены результаты статистического моделирования динамических параметров потока частиц, образовавшихся в результате распада (взрыва) космического объекта на орбите в ОКП. Показано, что первоначально после взрыва облако техногенных осколков имеет форму постоянно расширяющегося и удлиняющегося эллипсоида. Время его существования ограничено моментом замыкания облака, когда фрагменты оказываются рассеянными вдоль всей орбиты родительского тела

$$T_A = \frac{P_{\max}^2}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (3.11)$$

где P_{\max} и P_{\min} – максимальный и минимальный периоды обращения выброшенных частиц, движущихся по орбитам с большими полуосями a_{\max} и a_{\min} .

С момента замыкания облака и образования тора, заполненного фрагментами мусора, эта структура начинает разрушаться под действием возмущений различной природы, определяемых параметрами орбит фрагментов, их размерами и массами. Время, в течение которого тор расширяется и объем, занятый фрагментами, приобретает форму полосы, по широте ограниченной наклоном орбиты родительского объекта, определяется как

$$T_C = 360 / \Delta\Omega, \quad (3.12)$$

где $\Delta\Omega = \Omega_{\max} - \Omega_{\min}$ - интервал скорости векового изменения долготы узла орбит фрагментов.

Проведенный авторами (*Бордовицына, Дружинина, 1998*) статистический анализ процесса распада показал, что максимальное скопление мусора после распада низколетящего космического объекта находится в диапазоне высот $H=500-1000$ км с прямыми восхождениями $\alpha=10-20^\circ, 140-170^\circ, 220-260^\circ$ и склонениями $\delta=-50- -85^\circ, 80^\circ$.

Максимальное скопление техногенных осколков после распада космического объекта на геостационарной орбите находится в диапазоне высот $H=25000-41000$ км с параметрами $\alpha=0-90^\circ$ и $\delta=0-20^\circ$.

Анализ интервалов изменения величин больших полуосей фрагментов низкоорбитального объекта показывает, что около 15% фрагментов сразу попадает в атмосферу и сгорает. Около 20% фрагментов сгорает в атмосфере в течение первых 15 суток. Далее облако расплывается на отдельные фрагменты, имеющие свою орбиту. Первоначально после взрыва облако фрагментов имеет форму эллипсоида, существующего около 40 мин с радиусом разлета фрагментов около 2000 км. Затем облако в течение примерно 280 мин (3 оборота родительского тела) постепенно приобретает форму тора, которая сохраняется около 70 суток.

После распада геостационарного космического объекта форма эллипсоида сохраняется около 80 мин, формирование тора происходит в течение примерно 66-77 час.

Вместе с тем, оставшиеся после взрыва фрагменты становятся потенциально опасными для действующих аппаратов. В случае если удельная энергия столкновения, приходящаяся на единицу массы спутника, превышает 45 кДж/кг, столкновение его с фрагментом считается катастрофическим. Анализ подобной ситуации (*Кузнецов, 2003*) показывает, что пока таких столкновений не было.

Детальный сравнительный анализ связи взрывов на низких орбитах с состоянием ОКП показал, что максимальное количество взрывов приходится на минимумы солнечного цикла (*Касименко и др., 2000*).

Весьма четко прослеживается корреляция между количеством взрывов по месяцам и распределением метеороидов в ОКП в течение года.

В работе (*Касименко и др., 2001*) проанализированы взрывы, вызванные различными причинами. Часть из них является направленными. Другие связаны с неполадками питания и истечением топлива. Причины некоторых неизвестны. Результаты анализа показали, что взрывы космических объектов происходят в разное время после запуска: от нескольких минут до 30 лет. В короткий промежуток времени после запуска КА чувствителен быстрым изменениям потока заряженных частиц из-за солнечных протонных событий. В этом случае в основном имеют место направленные взрывы и взрывы, связанные с неполадками питания. Определяются 4 периода для взрывов: несколько часов после запуска, десять суток после запуска, один год и шесть лет. Распределение количества взрывов в течение года в 11-летнем цикле солнечной активности имеет два максимума, совпадающих как с максимумом солнечных космических лучей, так и галактических космических лучей. Другим внешним фактором, вызывающим взрывы, являются столкновения с микрометеоритами естественного происхождения. Лишь совместное влияние потока заряженных частиц и столкновений с метеорным веществом объясняет имеющееся распределение количества взрывов. Эти зависимости можно объяснить электрическими воздействиями на поверхности и внутри КА. Особенно наглядно они проявляются в сезонной числах зависимости взрывов для геостационарных спутников – максимумы приходятся на весну и осень, когда данные КА попадают в земную тень и электрический потенциал их поверхности увеличивается.

Проведенные расчеты и наблюдения убедительно показывают, что взрывы космических объектов в ОКП приводят к значительному загрязнению его в больших объемах и, соответственно, к изменению техногенного и физического состояния.

Число обломков размерами от 10 см, образовавшихся в результате столкновений и взрывов космических объектов, на низких (500-5000 км) орбитах оценивается в настоящее время в несколько десятков тысяч. Число мелких осколков, не наблюдаемых средствами контроля ОКП, составляет по данным (*Portree, etc., 1993*) величину порядка 10^{11} .

Таким образом, столкновения и взрывы техногенных тел в ОКП являются основным фактором, увеличивающим его загрязнение.

Очищение ОКП происходит, главным образом, при воздействии плазмы солнечного ветра: в годы максимумов солнечной активности количество техногенных и естественных частиц уменьшается почти на 50% (*Касименко и др., 1995*).

Низкие орбиты также постоянно очищаются за счет сопротивления атмосферы.

Однако, все эти естественные факторы не решают проблемы уменьшения техногенной загрязненности ОКП в целом.

Прогноз количества ежегодно образующегося космического мусора при различных вариантах технической политики на 2000-2023 гг. показал, что даже при различных вариантах последней количество мусора будет возрастать (*Назаренко, Чернявский, 1995*).

Отмеченную тенденцию необратимого роста числа объектов техногенного происхождения в ОКП подтверждают и данные долгосрочного прогноза обстановки в околоземном пространстве на сотни и тысячи лет. Поэтому начинать принимать соответствующие меры по предотвращению их роста необходимо уже в настоящее время, в том числе исследование возможности возникновения лавинообразного процесса загрязнения околоземного космического пространства.

Наиболее актуальной сейчас является проблема воздействия техногенных отходов как на состояние ОКП, так и на процессы, происходящие в земных экосистемах.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют систематические детальные исследования влияния на биосферу Земли искусственного мусора, попадающего в нее из околоземного пространства. Однако проблема уже поставлена, и такие исследования начинают разворачиваться.

Здесь можно выделить процессы загрязнения атмосферы, почвы и водного покрова планеты остатками топлива ракет-носителей, а также загрязнение атмосферы частицами окиси алюминия микронных размеров, могущее в большой степени повлиять на ее прозрачность (*Jackson, Bernhard, 1997*).

Наличие пылевой материи в межпланетной области обуславливает лучевую структуру зодиакального света, наблюдавшуюся космонавтами (*Лазарев и др., 1979*]. Начиная с 80-х годов, с Земли неоднократно наблюдались слои повышенной плотности в мезопаузе (сходные с серебристыми облаками), возникающие после запусков больших космических аппаратов. Возможно, это обусловлено накопившимися за последние десятилетия изменениями в составе и структуре мезопаузы, что создает более легкие условия для конденсационного роста частиц в этой зоне. Анализ микроструктуры этих частиц свидетельствует о решающем вкладе в их оптические свойства рыхлых образований типа фракталов. Такие частицы будут иметь скорость оседания в несколько раз меньшую, чем эквивалентные им сферические частицы. Кроме того, доля обратного рассеяния у этих частиц более высока, чем у сферических частиц, что объясняет наблюдавшиеся в работах по измерению рассеяния света в верхних слоях атмосферы высокие коэффициенты рассеяния солнечного излучения на больших углах рассеяния.

Отдельные лидарные измерения вертикальной структуры атмосферных аэрозолей показывают присутствие спорадических слоев повышенной оптической плотности на высотах от 40 до 60 километров, которые не могут быть объяснены ни осаждающимися частицами метеорных потоков, ни забросом пылевой материи из более низких высот. Еще более заметно увеличение частоты появления радужных, в частности, перламутровых, облаков на высотах 20 - 30 км.

Таким образом, в настоящее время говорить о том, что космический мусор определяет оптические свойства ближнего космоса и верхних слоев атмосферы еще нельзя, но определенная тенденция роста влияния космического техногенного материала на эти свойства уже наблюдается (*Ивлев, Кондратьев, Хворостовский, 2001*).

В результате запусков космической техники происходит целый комплекс процессов в нижней части околоземного пространства – нижней и верхней атмосфере и ионосфере, - изменяющей ее свойства и негативно отражающийся на состоянии биосферы.

Наиболее подробно эти воздействия рассмотрены в фундаментальной работе «Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие» под ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, А.В. Петрова (2001).

На рис. 3.27 представлена общая схема процессов, возникающих в верхней атмосфере в результате запусков ракетно-космической техники.



Рис. 3.27. Схема физических процессов и последствий запусков РКТ на верхнюю атмосферу (Адушкин и др., 2000)

К настоящему времени проведен ряд экспериментальных оценок влияния выбросов из двигательных установок ракет-носителей на атмосферу (Горькавый, 1993; Климов и др., 2000; Jackson, Bernhard, 1998). Среди выбросов содержатся компоненты следующих химических соединений: $HCl+Cl$, NO , CO , H_2O , H_2 , Ar^+ , Al_2O_3 (табл 3.7 - Адушкин и др., 2001; Ивлев, Кондратьев, Хворостовский, 2001; Хворостовский, 2001).

Таблица 3.7

Распределение продуктов сгорания топлива (тонны) наиболее крупных РН

РН	H_2O	CO	CO_2	H_2	NO_x	HCl	Al_2O_3
Энергия	1084	340	649	27	-	-	-
Шаттл	727	326	13	52	88	225	310
Ариан-4	83	99	68	1,4	94	7,8	10,7
Атлас-Центавр	51	23,5	45	0,9	-	-	-
Зенит	115	98	186	2	-	-	-

В приземном слое атмосферы до высоты ~1 км выбросы этих веществ приводят к токсичному загрязнению облаков, выпадению кислотных дождей, изменениям погодных условий в районе старта. Однако, благодаря значительной турбулентности нижних слоев атмосферы такие эффекты достаточно кратковременны и исчисляются в зависимости от характера атмосферных процессов часами или днями.

В стратосфере и тем более мезосфере влияние загрязнений носит значительно (до года) более длительный характер, так как там нет турбулентных процессов. Влияние

выбросов становится преобладающим, поскольку естественные концентрации CO_2 , CO и H_2O малы. Распространение выбросов в силу тех же причин локально, хотя размеры возникающей аномалии достаточно велики и могут составлять сотни километров. К тому же уменьшение прозрачности атмосферы в результате попадания сюда частиц окиси алюминия, может сказаться на ее тепловом балансе.

С увеличением высоты над поверхностью Земли увеличиваются и размеры зоны возмущений в ОКП. Так, при выбросах газа и плазмы (из ионных двигателей) в магнитосфере может произойти резкое изменение динамического равновесия волн и частиц, что вызывает высыпание частиц из нее и возникновение суббуревых возмущений. Таким образом, срабатывает своеобразный спусковой механизм, инициирующий развитие крупномасштабных геофизических явлений в ОКП, то есть совершается переход магнитосферы из одного энергетического состояния в другое.

Это показывает, что уже сами запуски космических аппаратов оказывают влияние на состояние ОКП, изменение которого может вызвать обратное воздействие на биосферу.

Кроме того, такие продукты сгорания, как соединения хлора, азота и водорода, являются катализаторами реакций с участием молекул озона и их роль в фотохимическом цикле озона велика. В мезосфере (70-90 км) основными компонентами топлива, выбрасываемыми двигателями, являются водород и вода. Здесь при самой низкой в атмосфере температуре молекулы воды конденсируются и смерзаются с образованием кристаллов. В итоге образуются облака, подобные серебристым, которые становятся самыми высокими облаками в атмосфере. В области F ионосферы (до 400 км) продукты сгорания топлива взаимодействуют с компонентами ионосферной плазмы. В результате образуется область с пониженным содержанием электронов – ионосферная «дыра». Ее возникновение сопровождается свечением, нарушениями радиосвязи, возбуждением волновых явлений разного рода. Возмущенная область временно становится радиопрозрачной, возникает окно в ионосфере площадью до 1 млн. км². Такие эффекты продолжаются в течение нескольких часов после старта ракеты.

Распространение газовой фракции описывается в общем случае кинетическими уравнениями больцмановского типа (*Шематович, 1993*). После установления теплового равновесия с окружающей средой происходит перенос и диффузия газового облака под действием атмосферных процессов. При этом, наряду с динамикой, важную роль играют процессы химического взаимодействия между веществом выброса космического объекта или его ракеты-носителя и составляющими атмосферы. Причем газовая фракция является химически весьма активной по отношению к окружающим атмосферным газам. В результате как локально, так и в больших объемах существенно изменяются свойства атмосферного газа, образуются малые химически и радиативно активные примеси, изменяется степень ионизации атмосферного газа.

В целом, перенос и диффузия определяют процесс распространения техногенных газовых примесей в атмосфере и ионосфере и во многом характеризуют экологическое воздействие и антропогенное загрязнение ОКП продуктами выбросов ракетно-космической техники.

Так, 18.04.1997 г., в верхних слоях атмосферы над Калифорнией было обнаружено облако остатков ракетного топлива. Подобное наблюдалось впервые в практике пусков ракет-носителей. Метеорологические службы, обнаружившие облако на высоте 19 км, связывают его либо с пуском 6 апреля ракеты-носителя «Союз-5» с космодрома Байконур (расценивается как более вероятный), либо с пуском 9 апреля ракеты-носителя «Молния-М» с космодрома Плесецк. Облако имело толщину 90 м и диаметр около 150 км. Визуально не наблюдалось, но приборы уверенно регистрировали наличие в нем остатков керосина. За 12 дней облако пропутешествовало 9650 км (*www.nature.ru. - 2001*).

Можно упомянуть целый ряд работ (*Дмитриев, 1995; Кричевский, 1999; Хворостовский, 2001 и т.д.*), в которых подробно рассматриваются вопросы загрязнения природы продуктами работы ракетных двигателей, остатками конструкций ракет,

превратившихся к началу XXI века в весьма актуальную проблему, связанную не только с экологическими проблемами, но и вопросами международного права. Так, например, площадь загрязнения Алтайского края остатками ракетного топлива превысила 250 км², общий вес упавшего после запусков ракет мусора – 2 тысячи тонн, широко распространен феномен «желтых детей».

На рис. 3.28 представлены положения зон загрязнений на земной поверхности, образованных основными действующими космодромами мира (Приложение), суммированные автором на основе анализа ряда работ (Железняков; Киселев и др., 2001; Новиков и др., 1986; Уманский, 2001; Шингарева, 2000).

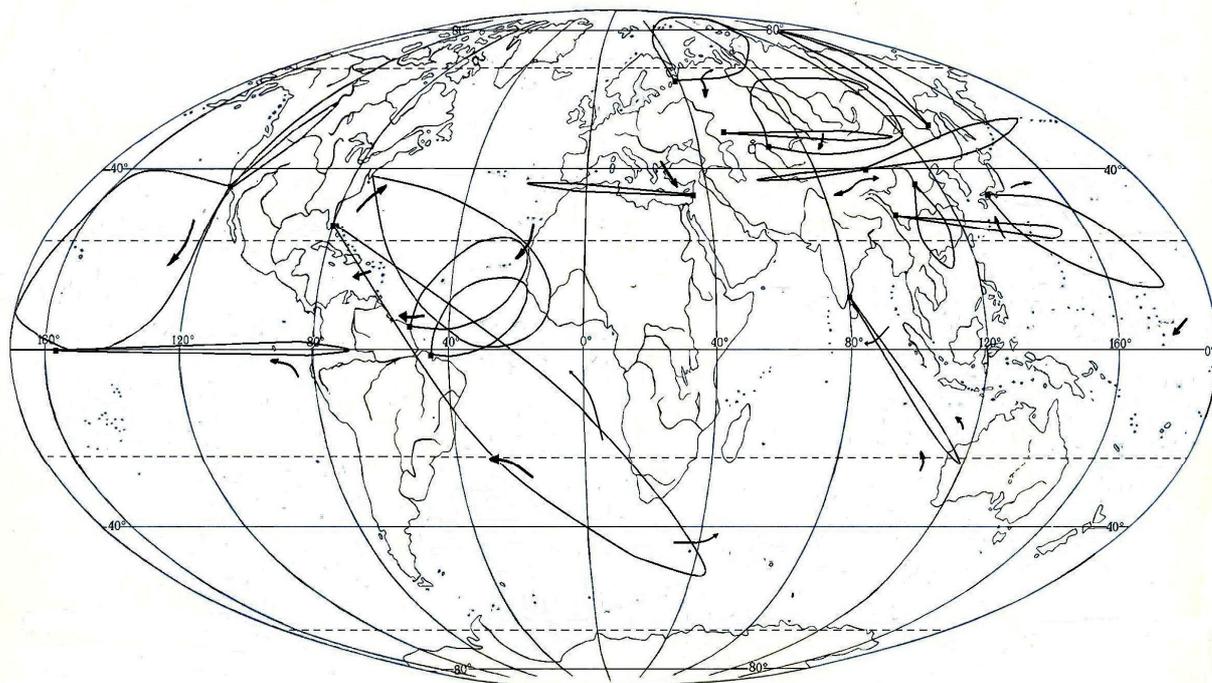


Рис. 3.28. Зоны действия основных космодромов мира (стрелки – направления ветра)

Область выпадения остатков конструкций РН для космодрома Байконур простирается до Якутии, трасса запусков с космодрома *Cape Canaveral* заканчивается над Индийским океаном около островов Принс-Эдуард. Полётная трасса базы *Vandenberg* имеет протяжённость около 10000 км и простирается над Тихим океаном и заканчивается у острова Кантон (острова Феникс) и близ атолла Кваджалейн (Маршалловы острова). Основным районом старта при запусках по проекту «Морской старт» является экваториальная зона в Тихом океане вблизи острова Рождества, зона падения отделяющихся частей достигает территории Южной Америки. Хотя надо признать, что последний проект является одним из самых экологичных: после отделения космического аппарата разгонный блок уводится на орбиту хранения, где из него стравливаются остатки топлива и газы.

Весьма актуальным представляется исследование заражения земной природы радиоактивными и биологическими материалами, попадающими на Землю вследствие космических экспериментов в ОКП (Рыхлова, 1995).

Уникальные результаты получены при изучении засоренности области высот 800-1000 км в NASA. В ОКП выводились космические аппараты с ядерными энергоустановками и радиоизотопными термоэлектрическими генераторами. Первый из таких спутников США запустили в 1965 году, а в 1967-1981 годах Советский Союз запустил 31 спутник системы слежения за океаном, оборудованный такими реакторами. Объекты с ядерными энергетическими устройствами на борту после окончания активного существования переводятся на такие высоты, где они уже не представляют

непосредственной радиационной опасности. Сейчас в этой зоне находятся 37 российских и 1 американский объект (*Дмитриев, 1995*). Суммарная масса радиоактивных веществ на них – около тонны (*Васильев, Шмельцов, 1995*). В результате тонких исследований выявлено, что имеется большая вероятность засорения этой зоны радиоактивными отходами. Здесь наиболее вероятным является следующий процесс (*Мещеряков, 1998*). При выводе на орбиту захоронения из корпуса ядерного реактора выбрасывались урановые стержни. Часто при этом оставались открытыми трубы, переносящие жидкий натриево-калиевый сплав, служивший охладителем реактора, что неизбежно приводило к попаданию значительного количества радиоактивного теплоносителя из контура реактора в околоземное пространство. Остаток в реакторе может попасть в окружающее пространство при столкновении с другими объектами или их обломками. Общая масса оказавшегося в космосе охладителя оценивается в 164 килограмма, содержащегося в 116 тысячах кусочков (*News.Battery.ru. – 27.04.2004*). Облако радиоактивных отходов, как показано выше, распространяется в ОКП на значительные расстояния, загрязняя большие его объемы.

Необратимые экологические последствия техногенного загрязнения по отношению к состоянию атмосферы и ионосферы надежно пока не выявлены. Однако не исключено, что они могут быть обнаружены. Это, в частности, касается влияния сгорающего искусственного мусора на физико-химические процессы в верхней атмосфере (особенно над крупными промышленными центрами), процессы в озоновом слое, на погоду и процессы в нижней атмосфере. И, наконец, важны исследования нарушения короткой и ультракороткой радиосвязи в результате отражения радиоволн от слоев мелких металлических осколков на низких орбитах.

Ряд данных указывает на тенденцию накопления компонентов искусственного происхождения в верхней атмосфере.

Увеличение количества техногенных отходов в ОКП увеличивает и число падений искусственных космических объектов и техногенных отходов на поверхность Земли (*Микиша и др., 1995; Назаренко, Чернявский, 1995; Jackson, Bernhard, 1997*).

В среднем большие куски орбитального мусора с площадью сечения более 1 м² падают на Землю раз в неделю. В 1978 г. «Космос-954» упал в северной Канаде, через год обломки орбитальной станции «Скайлэб» рассыпались над Австралией. Большой резонанс вызвали также падения ИСЗ «Космос-1686» (1991 г.), «Космос 398» (1995 г.), «China-40» (1996 г.), ОКС «Салют-7», FSW-1 и «Марс-98» с ядерным устройством на борту в 1996 г., падения последних ступеней ракет-носителей «Протон» на территорию Казахстана (1999 г.), вызвавшие загрязнение атмосферы и почвы.

Особую тревогу общественности вызвали запуски и падения на Землю спутников с ядерными источниками энергии на борту. Однако уже известны случаи падения таких спутников на Землю, например, падение ИСЗ «Космос-954», падение ИСЗ «Космос-1402», а также неудачный запуск первого навигационного спутника США, развевшего радиоактивные материалы над Индийским океаном (*Рыхлова, 1995*). Падение ИСЗ «Космос-954» позволило впервые оценить экологический ущерб: правительству СССР пришлось выплатить канадским властям более 6 млн. долларов.

При падении осколков искусственных космических аппаратов на Землю может происходить ряд явлений, аналогичных результатам падений естественных тел: прямое ударное воздействие на поверхность суши и океанов; запыление атмосферы, загрязнение биосферы продуктами экспериментов в космосе и т.д.

Еще одним фактором загрязнения ОКП (ионосферы) является наличие собственной атмосферы вокруг крупных космических аппаратов, находящихся в зоне пилотируемой космонавтики (это, главным образом, пилотируемые космические аппараты и орбитальные космические станции). Здесь в результате микротечений, газоотделения материалов, работы различных бортовых систем (например, жизнеобеспечения) образуется собственная атмосфера космических аппаратов с параметрами, существенно

отличающимися от параметров окружающей среды. Отмечены (Климов и др., 2000) ее заметные изменения в нейтральном и ионном составе, электромагнитных излучениях, потоках заряженных частиц. Сложное взаимодействие набегающего потока ионосферной плазмы с такой искусственной атмосферой приводит в ряде случаев к возникновению различных разрядных явлений, сопровождающихся свечением окружающей среды и поверхности самого аппарата, генерации электромагнитных излучений, ускорением заряженных частиц ионосферной плазмы. При скорости КА порядка $7.8 \cdot 10^3$ м.с⁻¹ поток активных частиц набегающих на ионосферу 10^{17} - 10^{19} м⁻²с⁻¹ для периода спокойного Солнца. В период солнечной активности поток может быть на три–четыре порядка выше (Ивлев, Кондратьев, Хворостовский, 2001).

Экологические последствия воздействия космической техники на мезосферу, ионосферу и ближайший космос исследованы весьма слабо. Известны кратковременные воздействия на содержание озона в атмосфере и электрические параметры ионосферы (озоновые дыры, изменение концентрации ионов в различных слоях ионосферы), обычно приписываемые реакциям озоносферы и ионосферы с газовыми компонентами выбросов ракетных двигателей. Однако, твердые частицы (Al_2O_3 - озон, щелочные металлы - ионы) также могут воздействовать на состав и характеристики этих атмосферных слоев. В ближнем космосе роль твердых частиц на безопасность работы космических аппаратов является определяющей.

Поток твердых частиц естественного происхождения, в основном, метеоров, имеет порядок 10^4 тонн/год, но так как время их жизни в ближнем космосе невелико - порядка суток, то их концентрации малы и сильно варьируют во времени и в пространстве. Поток твердых частиц антропогенного происхождения значительно меньше потока метеоритов, 10^2 - 10^3 тонн/год, но из-за большого времени жизни их концентрация в ближнем космосе, особенно на высотах преимущественных орбит космических аппаратов, во много раз превосходит концентрацию метеоритных частиц.

Очевидно, что постепенно образуются слои накопления пылевой материи на определенных высотах. В последние годы возросла и стала сравнимой с потоком метеоритной пыли интенсивность стока твердых частиц техногенного происхождения в атмосферу Земли. Значительная часть этих частиц при вхождении в более плотные слои атмосферы сгорает. Продукты сгорания образуют рыхлые агломераты фрактального типа, содержащие окислы металлов с высокой реакционной способностью (рис. 3.29.).

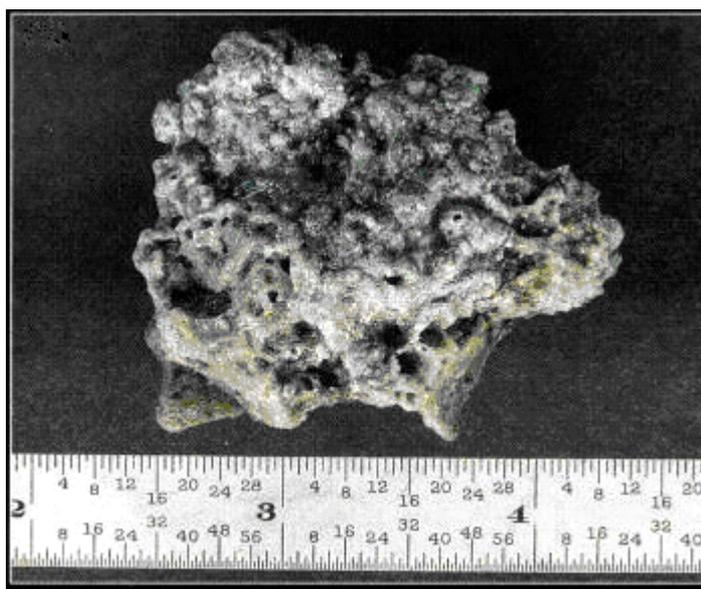


Рис. 3.29. Частица алюминиевого шлака, образующегося при работе твердотопливных ракетных двигателей

Заборы проб аэрозолей с помощью ракетных и аэростатных импакторов свидетельствуют о значительном, повышенном содержании таких частиц в атмосферных слоях выше 20 км. Необходимо учитывать влияние этого фактора на различные физические, химические и физико-химические процессы в атмосфере.

С пылевыми частицами в атмосферу Земли возвращаются также радиоактивные компоненты техногенного происхождения и токсичные вещества, образующиеся при сгорании ракетного топлива и разрушении космических аппаратов.

С накоплением техногенного материала в ближнем космосе проблема влияния потока вещества, возвращающегося на Землю, все более обостряется. Возможно, изменение радиационного режима верхней атмосферы, изменения характера аэрономических процессов и процессов фазовых переходов воды в средней и нижней атмосфере могут глобально повлиять на климат и другие условия существования биосферы и человека на Земле (Ивлев, 2001).

3.3. Воздействие тел естественного происхождения на состояние ОКП и биосферы

3.3.1. Естественный космический мусор и состояние ОКП

Пространственная плотность малых тел Солнечной системы, проходящих через ОКП, представлена на рис. 3.30 (Багров и др., 2003).

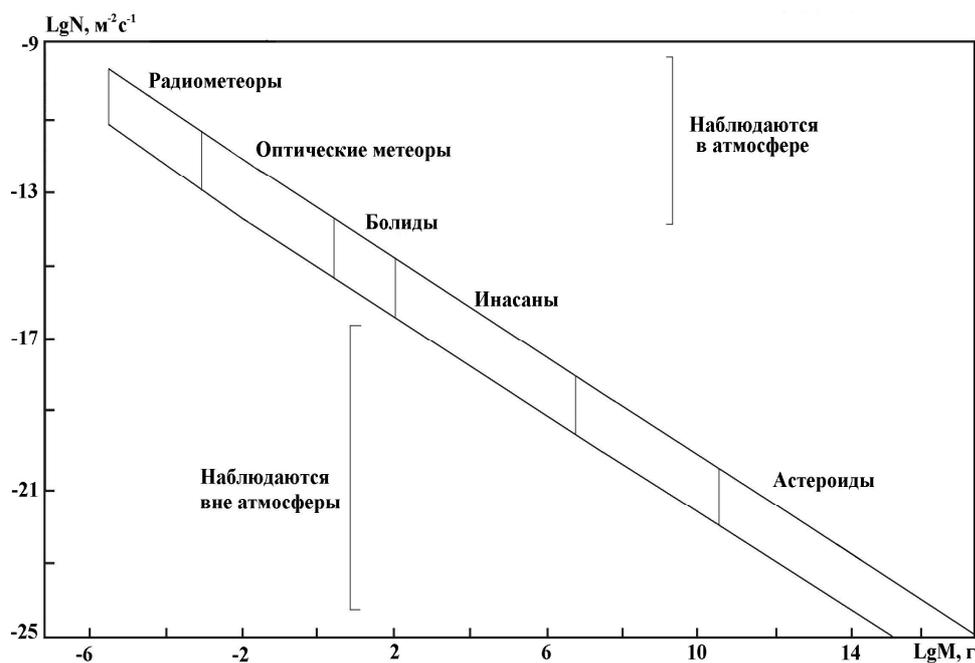


Рис. 3.30. Поток тел естественного происхождения в ОКП

Межпланетные объекты, размер которых не превышает нескольких сотен метров, принято называть метеорными телами, или *метеороидами* (см. п. 2.1). Влетая с космической скоростью в атмосферу планеты, они из-за столкновения с молекулами газа сильно нагреваются, дробятся, плавятся, испаряются и оставляют за собой в полете светящийся секунду-другую след. Это атмосферное явление называют *метеором*.

Если яркость метеора превосходит -4^m (т.е. яркость Венеры), то его называют *болидом*. Наиболее яркие болиды видны даже днем; их полет иногда сопровождается яркими вспышками, дымным следом, а порой и мощными звуками. При яркости более -6^m на поверхность Земли обычно выпадает твердый остаток - *метеорит*. Наиболее вероятными кандидатами на выпадение метеорита являются медленные болиды, не демонстрирующие в конце траектории резкой вспышки, означающей разрушение.

Болид появляется на высотах 100-120 км над поверхностью Земли. На высоте 5-20 км метеорное тело полностью затормаживается, болид исчезает, а остаток не успевшего полностью испариться метеорного тела выпадает на поверхность Земли в виде метеорита.

На рис. 3.31 (Кринов, 1950) показаны основные виды траекторий пролета метеорных тел в атмосфере и высоты их сгорания.

Минимальной скоростью столкновения любого небесного тела с Землей является вторая космическая скорость $v_2=11,2$ км/с, если оно догоняет Землю. Максимальная скорость складывается из скорости обращения Земли вокруг Солнца ($v_{кр}=29,8$ км/с), параболической скорости относительно Солнца на расстоянии 1 а.е. ($v_p=42,2$ км/с) и второй космической скорости для Земли:

$$v_{max}^2 = (v_{кр} + v_p)^2 + v_2^2 \quad (3.13)$$

Эта величина составляет $v_{max}=72,86$ км/с.

Метеороиды представляют заметную опасность для ИСЗ и пилотируемых космических кораблей и станций. Опасными уже являются тела, имеющие диаметр 1 мм.

Автором. рассчитана плотность метеороидов таких размеров по результатам наблюдений потока Персеиды в 2002 г. (Муртазов, 2003): плотность потока $\Phi=8 \cdot 10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-6}$ км⁻²с⁻¹; пространственная плотность $D=1,3 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-8}$ км⁻³ км⁻³. Этому соответствует весьма заметное число соударений метеороидов с телами в ОКП.

Так, для полученных плотностей Персеид число соударений частиц размерами более 1 мм с нормально расположенным к потоку экраном площадью 10^4 м² составит $n=25 - 56$ год⁻¹.

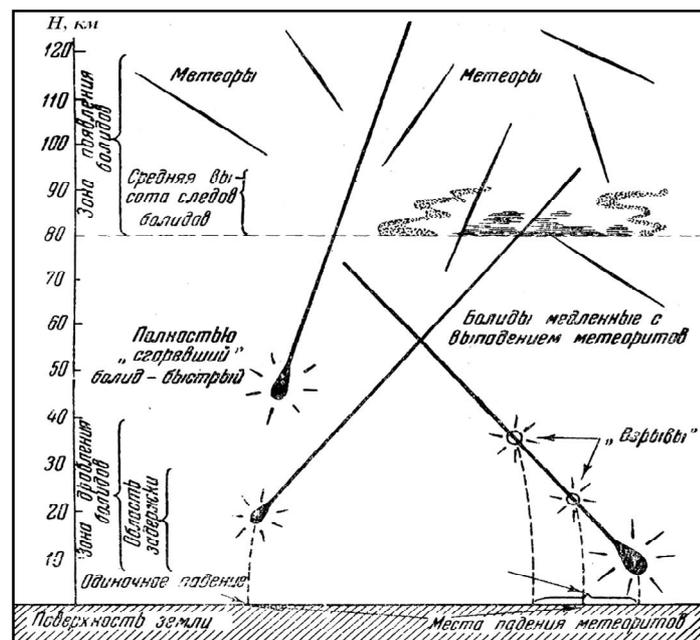


Рис. 3.31. Траектории метеорных тел в земной атмосфере

Далее, когда метеороид попадает в верхнюю атмосферу набегающий поток молекул воздуха передает ему определенную долю своего импульса. Если площадь миделя тела S , то за единицу времени на него набегаёт масса воздуха $S\rho v$, где ρ - плотность атмосферы, v – скорость метеороида, а его импульс тогда будет равен $S\rho v^2$. Пусть телу передается доля C этой величины (она характеризует сопротивление воздуха). Если метеороид имеет массу m ,

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} \rho v^2 CS. \quad (3.14)$$

Уравнение (3.14) является одним из основных уравнений движения метеорных тел в атмосферах планет. Полный набор таких уравнений приведен ниже в п. 3.3.2.

При движении в сильно разреженном газе, когда длина свободного пробега молекул больше характерного размера молекул, $C=2$, и весь импульс набегающего газа передается метеорному телу (неупругое соударение). В случае, когда атмосфера достаточно плотна и длина свободного пробега молекул в нем меньше размеров метеороида, для выпуклого метеороида $C \approx 1$. На рис. 3.32 (Тирский, 2000) эти области разделены штрихом.

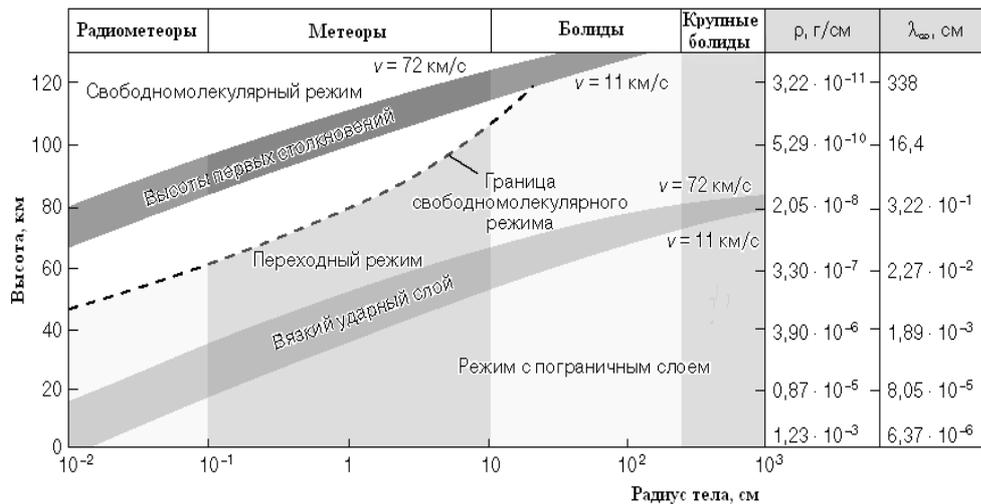


Рис. 3.32. Режимы обтекания метеороидов при входе в атмосферу

При выводе уравнения (3.14) предполагалось, что сила тяжести пренебрежимо мала по сравнению с силой сопротивления, что с большой точностью выполняется для метеорных скоростей и углов входа в атмосферу, не меньших 10° . Если сделать предположение, что отсутствует и подъемная сила, то траекторией полета метеороида будет прямая с заданным и неизменным углом наклона к горизонту (что вполне выполняется для метеороидов небольшой массы и размеров).

Температура подлетающих к Земле метеороидов определяется из уравнения теплового баланса (1.2) как $T = \sqrt[4]{\frac{1-A}{4\sigma}} * I_0$, где A – альbedo их поверхности, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт*м⁻²*К⁻⁴ – постоянная Стефана-Больцмана, I_0 – солнечная постоянная, составляющая в районе земной орбиты величину (1367 ± 3) Вт/м² и убывающая с расстоянием от Солнца по квадратичному закону. Для метеороидов различного происхождения она находится в диапазоне от 250 до 270К.

При вхождении метеорного тела в разреженную атмосферу при $C=2$ тепло, поступающее к нему от молекул набегающего потока идет на нагрев поверхности и теплоотдачу в окружающую среду. Приход тепла от молекул воздуха и расход его излучением пропорциональны площади поверхности (квадрату радиуса метеороида), расход на нагревание – объему (кубу радиуса). В результате для малых тел преобладает отдача тепла излучением, для более крупных – расход тепла на нагревание.

Самые маленькие тела – микрометеороиды – успевают затормозиться в атмосфере до начала плавления и теряют свою кинетическую энергию. Торможение микрометеороидов размерами менее 0,1 мм, влетающих в атмосферу с любыми скоростями, происходит в зоне свободно-молекулярного обтекания (рис. 3.26). Вообще верхний предел радиуса микрометеороидов примерно обратно пропорционален кубу их скорости и для железных частиц в 2,7 раза меньше, чем для каменных. Для последних при скорости 30 км/с он составляет 5 мкм, для $v > 50$ км/с – менее 1 мкм (Бронштэн, 1987).

Далее микрометеороиды медленно оседают на Землю в течение часов или месяца в зависимости от размеров. В течение года на Землю, по некоторым оценкам, выпадает до $40 \cdot 10^3$ т космической пыли (www.spacenews.ru, - 03.08.2006).

В процессе движения метеорного вещества в Солнечной системе на поверхность пылинок налипают атомы He^3 , содержащиеся в потоке солнечного ветра. На Земле частицы пыли с этим изотопом могут длительное время сохраняться в снеговом и ледовом покровах приполярных регионов, горных вершин, в глубоководных отложениях на дне океанов и т.д. Постоянная концентрация изотопа в колонках обеспечивает своего рода «временной репер», по которому можно оценивать изменения других параметров. Колонки льда, отобранные в полярных районах, представляют собой точные «записи» климатических условий прошлого. При их изучении можно измерить интенсивность процессов накопления космической пыли между периодами оледенения и параллельно изучить характеристики изотопного состава частиц пыли. Данный метод может стать ценным инструментом для изучения изменений климата планеты в прошлом и предсказаний его динамики на будущее (Ануфриев, Болтенков, 2004).

Более крупные частицы разогреваются, а затем плавятся: для частиц размерами до десятых долей см основная доля выделяемого тепла уходит на полный прогрев, для более крупных – на прогрев поверхностного слоя. При достижении температуры абляции вещество с поверхности начинает испаряться. Перед метеороидом образуется метеорная кома – газовая подушка, состоящая из смеси воздуха и метеорных паров. В результате столкновения атомов и молекул воздуха с метеорными атомами происходит разогревание метеорной комы до температур $4-15 \cdot 10^3$ К, возбуждение всех атомов и их ионизация.

Эти процессы на конечной стадии полета метеороида провоцируют нарушения озонового слоя вдоль его траектории.

Следует отметить, что до высокой температуры вследствие малого времени пролета в атмосфере нагреваются лишь внешние слои метеороида. Так что выпадающие на Землю метеориты – горячие, но не раскаленные и пожаров не вызывают.

Возбужденные атомы и ионы высвечивают излучение и образуют явление, которое называется метеором. Причем излучение в линиях атмосферных газов (азота и кислорода) составляет лишь 3% общего излучения метеоров. Остальная энергия приходится на излучение атомов элементов, из которых состоит метеороид.

Мощность излучения I метеора весьма сильно зависит от скорости потери им массы и определяется выражением

$$I = \frac{\tau C_H S \rho v^5}{4\zeta}, \quad (3.15)$$

где ζ - удельная теплота абляции; C_H – коэффициент теплопередачи; τ определяет долю энергии, переходящую в излучение и сам зависит от скорости метеороида.

Крупные метеороиды испытывают большое давление на лобовую часть и, когда оно превышает пределы прочности материала метеороида, разваливаются на части. В результате образуется рой быстро тормозящихся фрагментов, которые в более плотных слоях атмосферы дробятся далее и выпадают на Землю в виде метеоритов. Абляция вещества с поверхностей мелких осколков ведет к образованию метеорной комы, которая, испаряясь за доли с, образует взрыв, часто наблюдающийся в конце следа крупных болидов в виде вспышки.

Конечно, присутствие пылевых частиц в ОКП, особенно в верхней атмосфере, ведет к появлению слоев с оптической плотностью, большей плотности фона. Однако, для пылевых частиц естественного происхождения этот с их современной концентрацией в верхней атмосфере оптические эффекты исчезающе малы. Исключение может составить падение крупного тела, в результате которого в верхнюю атмосферу поднимается большое количество пыли (п. 3.3.2).

В мезопаузе (80-85 км) образуются серебристые облака, где пылевые частицы, по одной из гипотез, являются центрами конденсации капель воды и кристаллов льда. Эта гипотеза отчасти опирается на результаты ракетных экспериментов, в ходе которых на высотах 80-100 км были собраны микроскопические твердые частицы с намерзшей на них ледяной «шубой»; при запуске ракет в зону наблюдавшихся серебристых облаков количество таких частиц оказывалось в сотню раз больше, чем в отсутствие облаков (Сурдин, 2006).

Чаще всего пылевые частицы могут быть ответственны за каталитические реакции в атмосфере и появление различных продуктов, способствующих развитию конденсационных процессов и образованию облачных систем (Ивлев, 2001). В некоторых случаях говорят о взаимосвязи микрометеороидов с парниковым эффектом.

В популярной литературе в последние годы появилось достаточное количество публикаций, авторы которых утверждают, что во время метеорных дождей, когда метеоры экранируют Землю от солнечного излучения, температура на Земле резко падает, и это якобы ведет к изменению климата.

Действительно, используя уравнение теплового баланса Земли (1.2) можно определить, что при увеличении альбедо Земли с 0,30 до 0,40 ($dA=0,1$) ее температура уменьшится на $dT \approx 9,2^\circ$, что уже может привести к катастрофическим экологическим последствиям.

Однако пространственная плотность метеорных роев настолько низка, что при попадании Земли даже в активный поток ее температура практически не изменяется.

Пример: для частиц радиусом 1 мм и времени действия метеорного потока 1 месяц (общая его толщина $h \approx 8 \cdot 10^{10}$ м) полное перекрытие потоком солнечного света достигается при объемной плотности потока $n \approx 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-3} = 3,8 \cdot 10^3 \text{ км}^{-3}$. В этом случае небо для наблюдателя на Земле станет практически черным, а часовое число падающих метеоров на нем составит $\sim 10^{12}$. В этом случае температура Земли начнет резко снижаться.

В процессе своего полета в верхних слоях атмосферы метеороид испаряется, его пары ионизируются и ионизируют молекулы и атомы атмосферных газов. В спектрах метеоров установлено присутствие как эмиссионных линий многих химических элементов, из которых состоят метеороиды, так и линий ионизированных азота и кислорода, присутствующих в атмосфере. Все эти линии накладываются на непрерывный спектр (континуум) нагретого почти до 3000К метеорного тела.

Кроме того, вдоль траектории пролета метеороида образуется электронно-ионный след в виде цилиндрической трубки, которая постепенно расширяется.

Начальный радиус метеорного следа зависит от начальной скорости метеора и плотности атмосферы на высоте образования следа

$$r \propto \frac{v^{0,8}}{\rho_{атм.}} . \quad (3.16)$$

Так, метеор с начальной скоростью 40 км/с создает на высоте 95 км след с начальным радиусом 1 м. Такой ионизированный хвост образуется вдоль всей траектории и постепенно расширяется. Чаще всего он невидим, но для ярких метеоров и болидов наблюдается визуально и является источником радиоволн слабой интенсивности.

Плазма метеорного следа излучает энергию не только в оптическом, но и большей частью в радиодиапазоне с частотами, соответствующими ленгмюровским частотам электронов (п. 3.1.1).

В связи с тем, что метеорные следы состоят из плазмы, они способны отражать метровые и дециметровые радиоволны. В зависимости от электронной концентрации следа он либо проницаем (неустойчивый след) для падающей электромагнитной волны, либо непроницаем (устойчивый след). Переход от первого ко второму происходит при электронной концентрации $n_e=2,4 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-1}$. В первом случае входящая волна рассеивается в обратном направлении. Устойчивый след отражает как металлический цилиндр.

Это свойство устойчивых метеорных следов позволяет использовать методы радиолокации для их обнаружения. Наиболее удобными здесь являются радиоволны с длинами от 3 до 11 м. Радиолокационным методом было открыто большое число дневных метеорных потоков. Кроме того, радиолокатор позволяет обнаруживать метеоры значительно более слабые, чем другими методами наблюдения, до концентраций следа $n_e=10^{10} \text{ м}^{-1}$, что соответствует метеору со звездной величиной $m=15$.

Кроме того, радиолокационные наблюдения дрейфа метеорных следов позволяют составить представление об особенностях циркуляции атмосферы на высотах от 40 до 100 км и скоростях ветра в этих зонах.

При пролете метеора в зоне ионосферного слоя E образуется полоса повышенной ионизации. Если метеоров достаточно много, например, в июле-августе, когда действует сразу несколько потоков, говорят о появлении спорадического ионосферного слоя E_S . Днем на фоне ионизации, создаваемой рентгеновским излучением Солнца, слой E_S незаметен. Ночью, когда Земля экранирует это излучение и общая ионизация в слое E снижается на два порядка, спорадический слой E_S уверенно выявляется. Таким образом, метеорная ионизация является одной из причин возникновения ночного спорадического ионосферного слоя E_S .

На рис. 3.33 представлена схема отражения радиоволн высоких частот от слоя E_S . Волны высокой частоты проходят через этот слой беспрепятственно, меньших частот – отражаются или преломляются. Для каждой частоты существует предельный угол ϕ , при отражении на который переданный передатчиком высокочастотный сигнал попадает на Землю, обеспечивая сверхдальнюю радиосвязь (эффект, аналогичный Люксембург-Горьковскому).

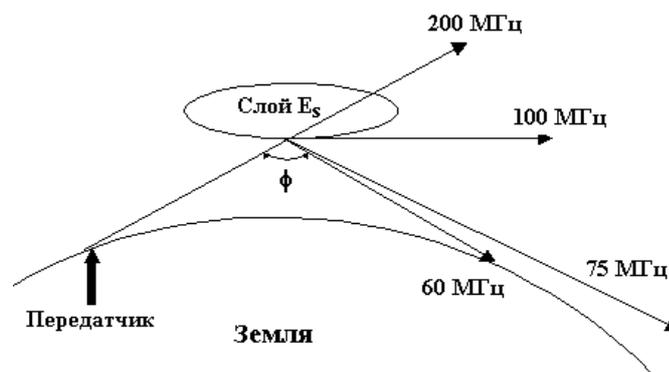


Рис. 3.33. Спорадический ионосферный слой и отражение радиоволн

Ввиду неравномерности пролета метеороидов через земную атмосферу в слое E_S создаются квазипериодические пульсации электромагнитного поля, преимущественно с инфразвуковыми частотами. В связи с этим напомним, что современная биология указывает на важность исследований воздействий электромагнитных полей инфразвуковых частот на живые организмы.

Основные виды воздействий компонентов околоземного космического мусора на земные экосистемы представлены как итог на рис. 3.34 (Муртазов, 2001, 2004б).



Рис. 3.34. Основные виды воздействия мусора в ОКП на состояние биосферы

3.3.2. Проблема космической опасности для человечества

Проблема взаимодействия крупных космических тел естественного происхождения при сверхорбитальных скоростях входа в околоземное пространство и в дальнейшем в атмосферу Земли и последствия такого явления представляют фундаментальную комплексную проблему естествознания, непосредственно связанную с взаимодействием ОКП и биосферы и имеющую выход в практическую деятельность человечества.

Процесс входа космического тела в атмосферу можно разделить на три основные стадии:

1. Полет в разреженной атмосфере до высот около 100 км. Здесь тело нагревается от столкновения с молекулами воздуха, но не испытывает заметного сопротивления. Внешние слои метеороида нагреваются до температур выше 1000 К. Такой режим обтекания практически не оказывает заметного воздействия на крупные

тела, однако, мелкие фрагменты (менее 100 мкм) при соответствующих углах входа в атмосферу могут или полностью сгореть, или замедлиться, отдать тепло и остаться на околоземной орбите.. Здесь характерным параметром является отношение длины свободного пробега к размеру тела – число Кнудсена K_n .

2. Полет в режиме непрерывного обтекания тела потоком воздуха, когда воздух можно считать сплошной средой и не учитывать его молекулярный состав. Перед телом возникает ударная волна, за которой наблюдается скачок давления и температуры. Давление может достигать сотен атмосфер, температура – нескольких десятков тысяч К. Возникают деформации тел, оплавление и испарение их поверхностей, абляция.

3. При приближении к поверхности Земли плотность воздуха растет, сопротивление увеличивается. Тело либо практически останавливается на какой-то высоте, либо продолжает путь до столкновения с Землей. При этом крупные тела, попадающие в нижние слои атмосферы со скоростями, часто превышающими 50 чисел Маха для соответствующей высоты, разделяются на отдельные фрагменты, каждый из которых продолжает падение самостоятельно. Ударные волны отражаются от поверхности Земли и производят возмущения в тропосфере и выше, а также самой земной поверхности.

Таким образом, первая зона полета метеороида в атмосфере соответствует большим числам Кнудсена $K_n \geq 0,1$, две других – малым $K_n < 0,1$.

В первой зоне изменением массы метеороида можно пренебречь, так как абляция практически отсутствует и тело не разрушается. Здесь движение определяется законами ньютоновской механики:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - \frac{1}{2} \rho v^2 CS \quad (3.17)$$

$$\frac{dh}{dt} = -v \sin \theta \quad (3.18)$$

$$mv \frac{d\theta}{dt} = -\frac{mv^2 \cos \theta}{R_3 + h} = mg \cos \theta \quad (3.19)$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3.20)$$

Здесь m – масса метеороида, v – скорость его подлета к Земле, ρ – плотность атмосферы в точке, S – площадь поперечного сечения метеороида (площадь миделя), θ – угол его входа в атмосферу, h – высота над уровнем моря, C – коэффициент сопротивления воздуха.

Изменение плотности атмосферы с высотой рассчитывается по барометрической формуле (1.18). Коэффициент C считают зависящим только от числа Кнудсена, причем он убывает с высотой и изменяется в пределах $2 > C > 0,92$ при изменении K_n от 10 до 0,1. Так, для полета в разреженной атмосфере часто принимается $C=2$, в достаточно плотной атмосфере – $C \approx 1$ (Тирский, 2000).

Давление сжатого газа перед летящим телом в этой зоне пропорционально газодинамическому давлению потока этого газа (Боярчук, 1999)

$$P \approx \frac{1}{2} * \rho * v^2, \quad (3.21)$$

а давление позади тела практически нулевое. Разница этих давлений и создает тормозящую силу.

Таким образом, зависимость изменения скорости тела от действия тормозящей силы и ускорения под действием силы тяжести пропорционально квадрату этой скорости и определяется уравнением (3.21).

Для расчета движения метеороида в нижних слоях атмосферы система уравнений (3.17) – (3.20) не подходит, так как не учитывает абляцию и связанные с ней эффекты потери массы, реактивной силы и т.д.

В общем виде система уравнений, описывающих движение во второй и частично третьей зоне при $K_n < 0,1$, записывается (в плоскости, проходящей через ось z) как

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - \frac{1}{2} \rho v^2 CS - f v \frac{dm}{dt} \quad (3.22)$$

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin \theta \quad (3.23)$$

$$mv \frac{d\theta}{dt} = -\frac{mv^2 \cos \theta}{R_3 + h} + mg \cos \theta - C_L \frac{\rho v^2}{2} S \quad (3.24)$$

$$\zeta \frac{dm}{dt} = -\frac{1}{2} C_H \rho S (v^2 - v_{cr}^2) n p u v > v_{cr}, \frac{dm}{dt} = 0 n p u v < v_{cr} \quad (3.25)$$

где f – коэффициент реактивной отдачи, $-1 < f < 1$, C_L – коэффициент подъемной силы, ζ – удельная теплота абляции небесного тела ($\approx 5 \cdot 10^6$ Дж/кг для каменных и железных метеоритов), C_H – коэффициент теплопередачи, зависящий от размеров, плотности и скорости метеороида, в среднем принимается равным $\sim 0,02$, v_{cr} – критическая скорость, ниже которой абляция не играет существенной роли (≈ 3 км/с).

Площадь S в общем случае – величина переменная, причем для случая шара

$$S = S_0 \left(\frac{m}{m_0} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3.26)$$

То есть максимальная скорость столкновения $v_{max} = 72,8$ км/с всегда превышает критическую v_{cr} , и при входе тела в верхнюю атмосферу абляция происходит всегда. Угол входа изменяется от 90° (вертикальный вход) до весьма малых значений, которые, впрочем, наблюдаются достаточно редко.

Крупные тела независимо от угла входа сгореть в атмосфере не успевают. При этом траектория их полета становится все более крутой, пока они не потеряют свою скорость. После этого будет происходить их вертикальное падение в атмосфере при $\frac{dv}{dt} = 0$, так как сила тяжести уравновешена силой сопротивления воздуха. В этом случае скорость падения определяется из уравнения (3.17) как

$$v_n = \left(\frac{m * g}{C * \rho * S} \right)^{0.5} \quad (3.27)$$

Как правило, эта скорость составляет 50-150 м/с. Именно с такой скоростью упало на Землю большинство известных метеоритов.

Однако не все тела успевают затормозиться.

Размер небесного тела, способного пройти через атмосферу и на большой скорости врезаться в Землю, определяется неравенством

$$L > 0.15 \frac{P_0}{\rho_0 * g_0 * \sin \theta}, \quad (3.28)$$

где P_0 и g_0 – давление и ускорение силы тяжести на поверхности Земли, ρ_0 – плотность небесного тела. Этот критерий определяет минимальные размеры небесных тел, которые могут сохранить достаточную скорость для образования высокоскоростного ударного кратера. Для Земли это: ледяные метеороиды диаметром более 1,5 м, каменные (>0,6 м) и железные (>0,2 м) метеорные тела. Следует отметить, что данный критерий не относится к обломкам развалившегося в атмосфере тела, которые опускаются на поверхность Земли с дозвуковыми скоростями и образуют ударные кратеры другого вида (Боярчук, 1999).

При прохождении небесного тела через атмосферу со сверхзвуковой скоростью создается ударная волна, способная в случае крупного тела вызвать достаточно серьезные разрушения на поверхности Земли. Так, ударная волна, возникшая при падении Тунгусского метеорита, повалила лес на площади около 2 тысяч кв. км.

Помимо нагрева, излучения и генерации ударных волн, при пролете небесного тела в атмосфере с космической скоростью в ней начинают происходить определенные химические процессы. Ударное сжатие воздуха за фронтом ударной волны вызывает реакцию между кислородом и азотом, приводящую к образованию окисла азота, блокирующего образование озона:



Количество NO , образующегося при пролете небесного тела, пропорционально величине энергии, передаваемой атмосфере, и составляет почти 7 г на каждые 10^6 Дж. Так, при падении Тунгусского метеорита образовалось около $30 \cdot 10^6$ т окисла азота. Наблюдавшийся после падения метеорита беспрецедентный рост леса в этом районе был вызван, скорее всего, выпадением окислов NO , сыгравших роль удобрений. Хотя, с другой стороны, сразу после падения метеорита в этих районах должны были идти кислотные дожди.

После того, как небесное тело прошло через атмосферу и столкнулось с поверхностью, начинается ряд процессов. При скорости удара о поверхность, превышающей 15 м/с, происходит испарение вещества как ударяющего тела, так и поверхности Земли. В этом случае образуется султан пара, который первым покидает место удара. Если при меньших скоростях соударения султан пара не формируется, то разлет выбросов сильно тормозится атмосферой и область их рассеяния будет ограниченной. В данном случае атмосфера не только влияет на характер рассеяния выбросов, но и отсеивает самую мелкую их фракцию, которая может оставаться во взвешенном состоянии длительное (до года) время в атмосфере. Это явление может оказать существенное влияние на климат Земли, особенно при падении на нее крупных небесных тел.

Выбрасываемый из точки удара султан пара состоит из горячего и быстро разлетающегося вещества, обычно обгоняющего даже наиболее высокоскоростные обломки твердых выбросов. Атмосферные газы отбрасываются облаком горячих паров, давление которых в начале расширения составляет несколько десятков тысяч атмосфер. При расширении пара от точки удара формируется ударная волна. Радиус поражения такой волной можно оценить, как (Adushkin, Nemchinov, 1994).

$$R_{км} = 5.6 * E_{Mt}, \quad (3.30)$$

где E – энергия удара, выраженная в мегатоннах тротилового эквивалента.

Далее, по аналогии с ядерным взрывом, образуется раскаленный шар из пара, который поднимается в верхние слои атмосферы и создает далее грибовидное облако. Место удара, таким образом, подобно эпицентру ядерного взрыва, может также захватывать пыль и обломки и поднимать их на большую высоту. Также как и при ядерном взрыве, до образования грибовидного облака в окружающее пространство идет мощное световое и тепловое излучение, способное вызвать катастрофические пожары.

Сам же султан пара при определенных условиях может прорваться через верхние слои атмосферы и продолжить расширение в околоземное пространство. Численное моделирование показывает (*Боярчук, 1999*), что для начала прорыва в атмосферу должно быть выделено 150 Мт энергии. Мощность самого большого наземного взрыва, произведенного в СССР в 1961 г., составила 60 Мт, что соответствует $2,5 \cdot 10^{17}$ Дж энергии (*Боярчук, 1999*) - и подобного прорыва не было. Что касается падения небесных тел, то прорыву при таких условиях соответствует каменный метеороид диаметром 100 м, падающий со скоростью 30 км/с и образующий кратер диаметром 3 км.

Кроме ударной волны, возникающей в атмосфере при пролете через нее небесного тела, подобная волна возникает и при ударе тела о поверхность Земли. Радиус поражения ударной волной (также по аналогии с ядерным взрывом) R (км), возникшей при взрыве с энергией E (Мт), определяется как

$$R = 5.6 * E^{0.33} . \quad (3.31)$$

Здесь показатель степени в правой части зависит от высоты взрыва и приведен для случая наземного взрыва. При взрыве в атмосфере он увеличивается, к примеру, для Тунгусского взрыва этот показатель равен 8.

Тела размером в сотни метров (не кометной природы) преодолевают земную атмосферу без особой фрагментации. Основная энергия выделяется при ударе о твердую или жидкую поверхность. Диаметр образующегося кратера превышает размер тела в 15-20 раз, а площадь зоны поражения S как при атмосферном взрыве, так и на поверхности, выраженная в гектарах, может быть оценена по формуле (*Chapman, Morrison, 1994*):

$$S = 10^4 * E^{2/3} , \quad (3.32)$$

где E – кинетическая энергия в Мт. При падении, например, 250-метрового тела ($E = 1000$. Мт), которое происходит раз в 10 тысяч лет, зона поражения составит 1 млн га.

Помимо взаимодействия с атмосферой, часть энергии удара падающего тела переходит в сейсмические волны в земной коре. Доля полной энергии удара, передающаяся земной коре, составляет около 5%. Это приводит к землетрясению в точке удара с параметрами, определяемыми эмпирическим выражением

$$\lg E_s = a + b * M , \quad (3.33)$$

где E_s – сейсмическая энергия землетрясения, M – сила землетрясения в баллах по шкале Рихтера, a и b – коэффициенты, имеющие у разных авторов различные величины ($a=4\div 6$, $b=1,5\div 2,5$).

Самое сильное из зафиксированных землетрясений произошло 31 января 1906 г. у берегов Эквадора (*Трешников, 1988*) и имело магнитуду $M=8,9$. Это соответствует полной энергии удара $2,8 \cdot 10^{19}$ Дж. Такая энергия выделяется при падении астероида диаметром 450 м со скоростью 20 км/с. Однако, разрушительное действие ударных землетрясений существенно меньше, чем обычных землетрясений, так как при ударных землетрясениях распространяются сейсмические продольные Р-волны, а при обычных землетрясениях - более разрушительные поперечные S-волны. По аналогии, эксперименты с ядерными взрывами показали, что по разрушительной силе ударные землетрясения соответствуют на единицу меньшим по магнитуде естественным землетрясениям. Можно привести после данных рассуждений результаты одного из экспериментов по математическому

моделированию Тунгусского явления (*Бронштэн, 1981, 1995*). Из них можно заключить, что тело общей массой около 10^8 кг вошло в атмосферу по траектории, направленной под углом 35° со скоростью около 40 км/с, разрушилось и резко затормозилось на высотах 20-7 км. Воздушные потоки за ударными волнами разрушили лесной массив, а излучение от нагретых до $10-12 \cdot 10^3$ К остатков тела и окружающего траекторию воздуха воспламенили деревья. Отразившись от земной поверхности, воздушные волны и конвективные потоки рассеяли превратившиеся в пыль остатки тела (ледяная часть, естественно, испарилась). Ударная волна вызвала колебания воздуха и твердой поверхности, аналогичные колебаниям в результате 15-20 Мт взрыва на высоте 10 км.

Такой же процесс зарегистрирован с метеоритом Ривелсток, упавшим в 1965 г. в Канаде. При оценке его массы в 4 тыс. т, скорости входа в атмосферу около 12 км/с, общей энергии возмущений, эквивалентной взрыву 10-20 кт тротила (аналогично взрыву над Хиросимой), было найдено всего около 1 г этого метеороида.

Поскольку около 70% поверхности нашей планеты составляют океаны, вероятность падения небесных тел в них значительно выше, чем на сушу. Однако, в прогнозах цунами, образующихся при таком столкновении, наблюдаются довольно значительные расхождения. Общая картина столкновения тела с океаном при этом не меняется. При входе небесного тела в воду океана впереди него образуется ударная волна большой интенсивности. В силу того, что небесное тело движется с гиперзвуковой скоростью, ударная волна сильно вытянута, а ее передний фронт отстоит от тела на незначительное расстояние. То есть, взаимодействие тела с водой определяется практически ударом самого тела (*Боярчук, 1999*).



Рис. 3.35. Гипотетическая картина падения в океан тела, сравнимого по размерам с Землей

Во многих работах (*Немчинов, 1994; Adushkin, Nemchinov, 1994 и др.*) приведены результаты численного моделирования столкновения Земли с астероидом при падении его в океан. Так, например, падение астероида радиусом 0,2 км в Балтийское море средней глубиной $\sim 0,6$ км может создать волну с начальной амплитудой 0,3-0,8 км. Здесь весьма показательное описание подводного ядерного взрыва «Бейкер» мощностью 20 кт у атолла Бикини в лагуне с глубиной $H_0=60$ м.. По расчетам, радиус сферы полностью испаренной воды вокруг заряда составлял 10 м при массе 4 кт. Через 4 мс после взрыва над его центром начал подниматься купол со скоростью 0,75 км/с, которая быстро уменьшалась из-за сопротивления атмосферы и тяготения. После прорыва пузыря, газы, увлекая за

собой часть воды, вырвались в атмосферу, и образовалось конденсационное облако. Давление в газовом пузыре упало и вода стала заполнять образующуюся полость. Края воронки поднялись, образовался пароводяной столб – султан. Его максимальная высота составила 1,8 км, наибольший диаметр 0,6 км, что превысило глубину лагуны в 10 раз, толщина стенок – 90 м, а количество поднятой вверх воды оценивалось приблизительно в 1 Мт. Базисная волна – смесь воды и пара – к 240 с достигла высоты 0,5 км при радиусе 5,5 км. Первая из гравитационных волн к 11 с имела максимальную высоту 28 м и находилась на расстоянии 300 м от центра взрыва. На расстоянии 6,6 км наиболее высокой была девятая волна – 1,8 м. Обработка этих результатов дала возможность получить эмпирическое соотношение между глубиной водоема и характерного размера с энергией E при условии, что разность высоты волны над уровнем дна и глубины водоема меньше самой глубины дна H_0

$$E \sim H_0^{\frac{9}{2}}. \quad (3.34)$$

Таким образом, взрыв «Бейкер» был при увеличении глубины до 600 м приближенно пересчитан на энергию взрыва 600 Мт. Подобную энергию имеет железный метеороид массой 12 М и, соответственно, диаметр 150 м, движущийся со скоростью 20 км/с (или при такой же скорости каменный метеороид диаметром 200 м, или ядро кометы с плотностью 1 г/см³ и диаметром 300 м). Размер такого тела намного меньше рассматриваемой глубины океана. Поскольку тело с данными размерами без сильного торможения пройдет слой воды до дна, то при ударе о него произойдет взрыв, во многом аналогичный ядерному и приводящий к подъему купола, выбросу воды и образованию султана, базисной и гравитационной волн. При этом картина явлений достаточно близка к картине подводного ядерного взрыва. Амплитуда гравитационной волны составит ~300-800 м на расстоянии 3 км от места падения.

Проведенные ядерные испытания и моделирование явлений при падении тел различной массы в воду позволило получить эмпирические зависимости для соотношения высоты гравитационной волны h и расстояния r от места падения:

$$h \sim r^{-1}. \quad (3.35)$$

Для приведенного примера с энергией падения 600 Мт на расстоянии порядка 200-300 км от места падения высота волны будет составлять 10 м. Можно сравнить полученную величину с реальными природными катастрофами. Так, за последние 100 лет было зарегистрировано 14 сильных цунами у берегов Камчатки. Из них наиболее катастрофическими были 5 цунами с высотой волн от 5-7 до 10-20 м. Столь катастрофические цунами будут наблюдаться на очень больших расстояниях от места падения небесных тел – до 2000 км для тел диаметром до 1 км (Немчинов и др., 1994).

Проведенные рядом авторов расчеты дали основание сделать следующие выводы.

При падении небесных тел диаметром 6-10 км в океан глубиной 4-5 км возникает водяной вал с высотой порядка глубины океана на расстоянии около 25 км от места падения (при скорости тела 20-30 км/с).

При распространении волны ее амплитуда затухает обратно пропорционально расстоянию от места падения. Цунами, возникающие при падении в океан же не очень крупных астероидов и ядер комет (0,1-1 км) могут приводить к катастрофическим последствиям регионального и глобального характера. Последствия падения могут быть разрушительными на расстояниях до 100-200 км от побережья (Бурученко и др., 1997). Удар водяного вала о прибрежные горы на сравнительно небольших расстояниях от места падения может приводить к существенному изменению рельефа.

Выброс воды, особенно соленой воды морей и океанов, на высоты до 30-40 км может приводить к сложным химическим аэрономическим процессам и, возможно, даже к частичному разрушению озонового слоя.

Наиболее частыми являются столкновения Земли с веществом как регулярных, так и спорадических метеорных потоков, с метеороидами. В результате в течение года в атмосферу Земли попадает (Микиша и др., 1995) до $2 \cdot 10^5$ тонн метеорного вещества в виде мелких фракций (или даже до $3 \cdot 10^6$ т/сут. – Сазонов, 2000), которые или полностью испаряются в верхней атмосфере, или долетают до поверхности Земли в виде небольших метеоритов. Наиболее крупные метеороиды, входящие в состав метеорных потоков, выпадают на Землю в виде метеоритов.

За прошедшее столетие на Землю упали два крупных метеорита: Тунгусский (1908 г.) и Сихоте-Алинский (1947 г.). Оценка энергии Тунгусского явления дает величину около 5-20 Мт, энергии Сихотэ-Алинского – величину, соответствующую взрыву примерно до 20 Кт. Для сравнения, оценка массы Аризонского метеорита (астероида?) – 12 тыс. тонн, что дает энергию соударения с Землей эквивалентную 250 Мт.

Авторы целого ряда работ провели расчет соответствия диаметра метеоритного (или астероидного) кратера магнитуде землетрясения, сопоставив энергию удара метеорита при скорости столкновения 40 км/с энергии землетрясения. Энергия сильнейшего (магнитуда 8,9 по шкале Рихтера) землетрясения сравнима по этим расчетам с энергией удара астероидного тела диаметром 2 км (что, кстати, не совсем соответствует результатам, приведенным выше). Глобальность ожидаемой катастрофы при ударе с такой энергией подтверждается оценкой размера кратера, образующегося на Земле в результате соударения. Расчеты для энергии, соответствующей землетрясению в 8,9 балла, дают глубину кратера порядка 20 км, что равно средней толщине земной коры. Далее делаются следующие выводы: 1) астероиды диаметром менее 0,5 км вызывают локальные повреждения на поверхности Земли; 2) астероиды диаметрами от 0,5 км до 2 км вызывают серьезные повреждения регионального характера; 3) астероиды с диаметрами более 2 км способны вызвать катастрофу глобального масштаба; 4) кроме этого, при глобальной катастрофе в атмосферу выбрасывается большое количество пыли, что приводит к эффекту «ядерной зимы».

К примеру, математическая модель падения астероидно-кометного тела в районе п-ова Юкатан около 65 млн. лет назад показывает (Pierrazzo, 1997), что в атмосферу было выброшено около 700 млрд. т воды и до 300 млрд. т серы. Значительная часть серы достигла стратосферы, где ее окислы соединились с водой и образовали мощный слой аэрозолей, вызвавший на Земле эффект «ядерной зимы», что было достаточно для катастрофического вымирания большей части растительного и 75% животного мира (включая динозавров). При этом выделилась энергия, эквивалентная взрыву 10^8 Мт тринитротолуола (Сазонов, 2000), что дает возможность оценить размеры упавшего тела в 10-15 км (Инамов, 2000).

К.И. Чурюмов (2002a) более склоняется к кометному происхождению кратера Чиксулуб. По его мнению, значительная масса пыли, входящая в кометное ядро, после соударения с Землей и взрыва поднялась в высокие слои атмосферы. В результате изменилось направление градиента температуры, а также резко упало количество солнечной энергии, поступающей к поверхности, что привело к установлению «ядерной зимы». Это, а также отравление биосферы кометными газами (цианом, угарным газом и др.) вызвало массовое вымирание биоты. Прослойка толщиной в 1 см, обогащенная иридием в морских осадочных породах более 100 районов Земли возрастом 65 млн. лет разделяет две геологические эры – мезозойскую и кайнозойскую

Можно здесь перечислить некоторые известные на сегодняшний день крупные астроблемы (кратеры, образованные падением небесных тел) на поверхности нашей планеты. Это: Попигайская астроблема (диаметр около 100 км, возраст 36-37 млн. лет), Карская (~65 км, 70 млн. лет), Пучеги-Катунская (~80 км, 175 млн. лет) на территории

России, кратер Чиксулуб (Chicxulub) диаметром 170÷300 км и возрастом 65 млн. лет на побережье Мексики. Крупнейший метеорит упал в Аризоне (Barringer Meteor Crater, Каньон Дьявола диаметром 1,2 км, глубиной ~175 м, возрастом около 50 тысяч лет). Кратер Маникуаган (70 км, 200 млн. лет) на севере Канады. Всего же на Земле известно более 200 астроблем (Микиша и др., 1995). Перечень наиболее крупных астроблем на поверхности Земли приведен в Приложении.

С ударами крупных метеороидов и астероидов часто связывают массовые уничтожения биоты, происходившие время от времени в истории Земли. На рис. 3.36 представлены данные о периодах катастрофического вымирания морских животных за последние 250 млн. лет (Блинников, 2002; Веймарн и др., 1998; Витязев, 2000; Кочаров, 2002; Raup, Sepkoski, 1984).

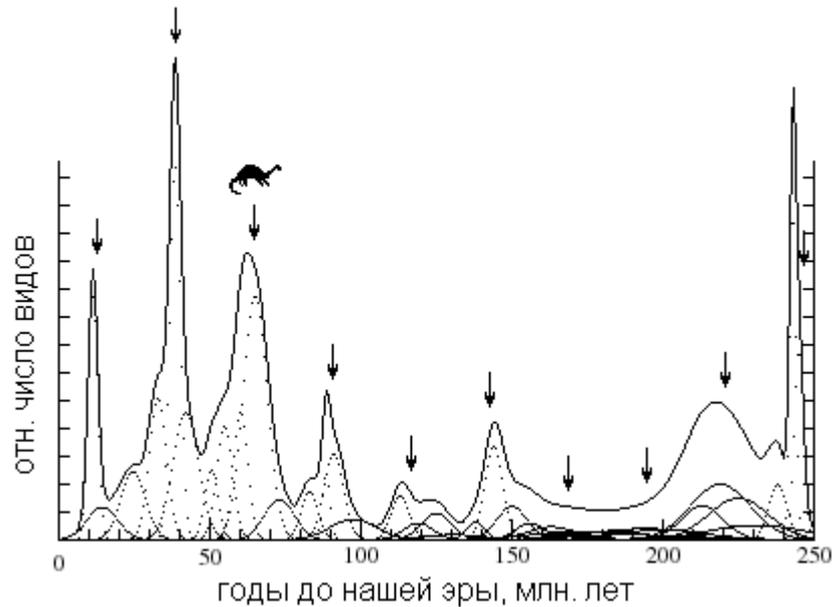


Рис. 3.36. Периоды катастрофического вымирания морских животных (пик 65 млн. лет соответствует Юкатанскому событию, 35 и 220 млн. лет - результату предполагаемого взрыва сверхновой)

Однако, если космическое тело не является астероидом или метеороидом, а по структуре ближе к рыхлому кометному ядру, то последствия столкновения с Землей будут более катастрофичны. Процессы, затрагивающие жизнь цивилизации, начнутся уже в верхней атмосфере. Это ударные волны, запыление, резко снижающее прозрачность атмосферы, различные световые эффекты.

Ярким примером воздействия падающей кометы на процессы, происходящие в околопланетном пространстве и ее верхней атмосфере является следующее событие, впервые наблюдавшееся в истории человечества.

С 16 по 22 июля 1994 г. произошло столкновение осколков кометы Шумейкерв-Леви (SL9) с Юпитером. 22 осколка, состоящих из льда, космической пыли и твердых вкраплений, размерами от нескольких сот метров до 3 км входили в атмосферу планеты со скоростями до 65 км/с. Наблюдения этого события дали наглядную иллюстрацию процессов, происходящих в подобных случаях, и показали, что столкновение подобной кометы с Землей привело бы к глобальной катастрофе для биосферы: энергия соударения составила до 10^{24} Дж. Это в 10^4 раз больше накопленного на Земле ядерного потенциала и в 10^6 превышает энергию столкновения Земли с Тунгусским метеоритом (Фортон и др., 1996; Турский, 2001).

При указанных скоростях входа в атмосферу Юпитера и шкале ее высот 30 км лобовое давление на фрагменты кометы SL9 составляло величину порядка 10^5 атм, и разрушение их начало происходить еще над облаками планеты. В дальнейшем образовавшаяся крупная пыль в облаке горячего газа (до десятков тысяч градусов за ударной волной) взрывалась и в таком виде, расширяясь продолжало двигаться вглубь атмосферы. Через несколько десятых долей секунды после взрыва основная часть вещества собиралась в чашеобразном слое радиусом ~ 3 км и толщиной ~ 1 км с отогнутыми вверх краями чаши. Через 1 с после взрыва облако имеет радиус около 7 км, через 6 с – 10 км. Далее ударная волна движется вниз и достаточно быстро затухает. После ее ухода образуется термик (облако нагретого газа), который всплывает под действием архимедовой силы. Образуется струйно-конвективное движение газа вверх со скоростью до 3.5 км/с. Колонка восходящего газа имеет диаметр порядка 40 км и состоит лишь на 10-15% из вещества кометы. В дальнейшем выходящие из атмосферы Юпитера и наблюдавшиеся астрономами огненные шары имели размеры в несколько тысяч км и поднимались над лимбом планеты на ~ 3000 км. На местах входа фрагментов кометы в атмосферу образовывались пятна размерами в несколько тысяч км и сохранявшиеся в течение нескольких месяцев (Тирский, 2001).

Наблюдались: генерация внутренних гравитационных волн поднимающимися облаками взрыва, возмущения ионосферы и магнитосферы, аномалии в радиоизлучении радиационных поясов Юпитера. Более слабо проявили себя эффекты: световое эхо от спутников Юпитера, возбуждение сейсмической активности в процессе столкновения. Имеются отдельные сообщения о наблюдении уярчения радиационных поясов в ДМ-диапазоне, возбуждение фиолетового полярного сияния, вспышки УФ- и рентгеновского излучения при ударе одного из осколков, уменьшение яркости плазменного тора спутника Ио в крайнем ультрафиолете и др. (www.science.ru, 2002).

Последствия столкновения наблюдались КА Cassini, который исследовал Юпитер уже в 2000-2001 гг. (www.spacenews.ru, 2004).

Таким образом, свойства ОКП в результате воздействия пролетающих через него крупных тел должны были заметно изменяться, а последствия ударов (и даже не только ударов) их о Землю могут быть достаточно серьезными – от локальных разрушений до глобальных бедствий планетарного масштаба.

Общая трактовка основных последствий столкновения небесных тел с Землей с точки зрения опасных последствий для ее биосферы представлена в табл. 3.8 (Боярчук, 1999; Toon, 1994).

Таблица 3.8

Основные последствия столкновения небесных тел с Землей

Поражающий фактор	Результат влияния	Длительность влияния	Масштаб действия	Энергия соударения, Мт
Пыль в атмосфере	«ядерная зима»	годы	глобально	$>10^5$
	прекращение фотосинтеза	месяцы	глобально	$>10^6$
	полная темнота	месяцы	глобально	$>10^7$
Пожары	горение, дым	часы	локально	$\leq 10^4$
		месяцы	регионально	$>10^6$
		месяцы	глобально	$>10^7$
Окислы азота	кислотные дожди	дни	локально	>10
		месяцы	регионально	$>10^3$

	нарушение озонового слоя	годы	глобально	$>10^5$
Ударная волна	механические разрушения	минуты	локально	$\leq 10^4$
		часы	регионально	$>10^7$
Цунами	механические разрушения	часы	регионально	$>10^4$
Выбросы воды и углекислоты	потепление климата	десятилетия	глобально	$>10^4$

Вместе с тем, оценка частоты столкновений в современную эпоху дает величины, значительно более низкие по сравнению с частотой разрушительных землетрясений: для тел типа Тунгусского метеорита от 200 до 700 лет, для астероидов с диаметром от 0,5 до 2 км – частота составляет 70-20 тысяч лет, для астероидов диаметром более 2 км – 1 млн. – 300 тыс. лет (Микиша, 1995).

Таким образом, за всю историю Земли (включая начальные этапы ее эволюции, когда столкновений было больше) на ней могло образоваться порядка 22 тысяч ударных кратеров с диаметрами более 20 км (Кагиров, 2002б).

В качестве номинального порога, при котором наступает глобальный эффект, в (Боярчук, 1999) принимается значение энергии $2 \cdot 10^5$ Мт, соответствующее энергии каменного небесного тела диаметром 1,5 км. Как отмечают авторы этой работы, ошибки в определении номинальной пороговой энергии могут составить целый порядок. Более оптимальным, видимо, его значение в диапазоне $1,5 \cdot 10^4 \div 10^7$ Мт, что соответствует энергиям тел диаметром 0,6÷5 км при скорости 20 км/с и 0,4÷3 км при скорости 42 км/с. Тогда средняя частота падения тел, соответствующая нижней и верхней границе интервала неопределенности, составляет $7 \cdot 10^4$ лет и $6 \cdot 10^6$ лет соответственно. В этом случае номинальное значение частоты падения тела, способного вызвать глобальную катастрофу, соответствует одному падению в 100 тыс. лет.

С другой стороны, основываясь на результатах, полученных в результате испытаний ядерного оружия, следует, что взрыв с энергией 10^5 - 10^6 Мт приводит к образованию такого количества пыли, что это вызовет резкое снижение температуры на большей части суши и приведет к эффекту «ядерной зимы» (Вавилов, 1988; Израэль, 1987; Моисеев, 1988; Стенчиков, 1987). Такая энергия выделяется и при столкновении Земли с небесным телом размерами 1-2 км и скоростью 20 км/с. Нижняя оценка частоты таких соударений – около 300 тыс. лет.

На рис. 3.37. представлена усредненная по различным данным (Боярчук, 1999; Сазонов, 2000) зависимость частоты столкновения астероидов от их размеров.



Рис. 3.37. Частота N столкновения астероидов с Землей в функции их размеров или мощности соударения

При энергиях соударения меньших 1-2 Мт кометные тела взрываются в верхних слоях атмосферы. При таких энергиях основную опасность представляют каменные и железо-каменные метеориты. Кометы дают основной вклад в общий поток опасных тел при энергиях соударения 3-20 Мт. В частности, распад ядер мини-комет в ОКП на высотах 8000-24000 км над Землей приводит к образованию крупных облаков водяного пара, что может вызвать повышение уровня океана на 2,5 см каждые 10^4 лет (Сазонов, 2000). При энергиях, больших 20 Мт и до $\sim 10^6$ Мт астероидный и кометный компоненты дают примерно одинаковый вклад в общий поток опасных объектов. При более высоких энергиях соударений кометная составляющая резко возрастает.

Вместе с тем иногда считают (Сазонов, 2000), что неизвестны еще около 10^5 астероидов и комет, имеющих размеры более 100 м, и пересекающие орбиту Земли. Этот факт совместно с анализом свыше 130 ударных кратеров на поверхности Земли может значительно повысить вероятности столкновения Земли с естественными космическими объектами.

Таким образом, астероидная и метеоритная (включая ядра комет) опасность существует и способна достаточно активно воздействовать на природу Земли. Однако, хотя падение на Землю небесного тела является достаточно редким событием, риск погибнуть в результате космической катастрофы для каждого отдельного человека вполне сопоставим с риском гибели от более традиционных источников опасности (Боярчук, 1999).

Сейчас стало достаточно ясным, что эволюционное развитие биосферы прерывалось региональными и глобальными катаклизмами. При этом менялась направленность многих процессов. Наряду с другими факторами это способствовало как исчезновению жизненных форм, так и возникновению новых. Несомненно, воздействие ударных событий на биосферу и процессы в ОКП влияло на формирование и эволюцию биосферы (Витязев, 2000).

Здесь можно суммировать результаты воздействия космических тел естественного происхождения на околоземное космическое пространство.

Это периодические и внезапные процессы резкого повышения загрязненности ОКП частицами метеорного, астероидного, кометного происхождения, компонентами газов кометного происхождения, что ведет к уменьшению общего потока тепла, поступающего в биосферу, физическим и химическим процессам в верхней атмосфере и ионосфере, изменяющим их свойства, изменению условий прохождения радиоволн различных частот через ионосферу.

Образование экрана из водяного пара уже в геокороне, изменяющего тепловой режим не только атмосферы, но и плазмы магнитосферы.

Возмущения в магнитосфере и ионосфере в результате ударного воздействия космических тел, движущихся со сверхзвуковыми скоростями.

Ионизация верхних слоев атмосферы: метеоры создают на ночной стороне плотный и тонкий ионосферный слой – спорадический слой E_s . Подобные ионосферные неоднородности, создаваемые метеорами, используются в сверхдальней радиосвязи.

Аномалии в излучении радиационных поясов, приводящие к генерации аномальных полярных сияний, инфразвуковых и сверхнизкочастотных колебаний в ОКП, проникающих к поверхности Земли.

Вместе с тем, следует отметить, что ОКП является своеобразным экраном, защищающим, хотя и частично, земную биосферу от прямых воздействий естественных космических тел. Последствия таких воздействий при отсутствии ОКП были бы значительно более катастрофичными.

Контрольные вопросы

1. Является ли астероидно-кометная опасность единственной для земной биосферы?
2. Дать определение числу Маха
3. Как связано определение типов погоды, сведения о которых постоянно передают средства массовой информации, с состоянием геомагнитного поля.
4. Изменяются ли типы погоды в отсутствие вспышек на Солнце?
5. Как можно связать последствия столкновений с Землей опасных космических объектов со шкалой МЧС опасных природных явлений?
6. Какова минимальная скорость соударения с Луной опасного для нее космического тела?
7. Обосновать восточно-западную асимметрию космических лучей действием геомагнитного поля.
8. Как сказывается на массе Земли падение на нее метеорного вещества (10^7 т/год)?
9. Какие параметры метеорных следов и какими методами можно получить из их радиолокационных наблюдений?
10. Какая энергия прошла через ОКП во время мощной гамма-вспышки в 2005 г.? Сравните ее с общей энергией земной атмосферы.

ГЛАВА IV. МОНИТОРИНГ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

4.1. Цели и задачи мониторинга околоземного пространства.

Понятие мониторинга окружающей среды как основной составляющей любой экологической экспертизы, вопросов охраны окружающей среды и методов ее рационального использования весьма широко трактуется различными авторами (*Кормилицын и др., 1994; Коробкин, Передельский, 2000; Петров, 1997; Протасов, 1997; Реймерс, 1990; Федоров, Гильманов, 1980; Шаповалов, 1999 и т.д.*). Анализ различных подходов к этому понятию позволяет дать некоторое общее определение мониторинга окружающей среды.

Мониторинг – (лат. *monitor* – надзирающий). Наблюдение и непрерывная (квазинепрерывная) оценка состояния природной среды под влиянием антропогенных воздействий с целью рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Это определение можно положить в основу понятия мониторинга ОКП (*Муртазов, 2000; 2004б*).

Мониторинг околоземного космического пространства - наблюдения и постоянный контроль состояния, естественного и антропогенного загрязнения; выработка методов оценки физического состояния околоземного космического пространства как части природной среды. Разработка прогноза возможных последствий возрастающей антропогенной нагрузки на околоземное пространство с целью его охраны, так и предотвращения отрицательного воздействия на земную биосферу.

Разработка и координация глобального мониторинга окружающей среды осуществляется в рамках ЮНЕП при ООН и Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Основные цели этой программы (*Коробкин, Передельский, 2000*):

- организация расширенной системы предупреждения об угрозе здоровью человеку;
- оценка влияния глобального загрязнения атмосферы на климат;
- оценка количества и распределения загрязнений в биологических системах, особенно в пищевых цепочках;
- оценка критических проблем, возникающих в результате сельскохозяйственной деятельности землепользования;
- оценка реакции наземных экосистем на воздействие окружающей среды;
- оценка загрязнения океана и влияния загрязнения на морские экосистемы;
- создание системы предупреждений о стихийных бедствиях в международном масштабе.

По мнению автора данной работы, весьма необходимым является включение в разработку проекта глобального мониторинга окружающей среды пункт, связанный с мониторингом ОКП: *оценка характеристик процессов в околоземном космическом пространстве, связанных как с естественным состоянием, так и техногенными воздействиями на него, с целью прогноза дальнейшего воздействия ОКП на биосферу.*

В связи с тем, что ОКП является сложной системой, в которой происходят взаимодействия между ее компонентами как под влиянием различных внутренних причин, так и в большой степени внешних воздействий, следует разделить мониторинг ОКП на мониторинг его собственно физического состояния и мониторинг естественного и техногенного загрязнения ближнего космоса.

К физическому мониторингу ОКП относится, во-первых, прогноз «космической погоды» по параметрам которой являются (*Климов и др., 2000*):

- температура и концентрация компонент низкотемпературной плазмы (ионы, электроны и нейтральные частицы);
- магнитные и электрические поля и токи;
- энергетические спектры заряженных частиц и спектральный состав электромагнитных излучений.

В 1999 году была разработана шкала «космической погоды» – первая попытка систематического исследования всего комплекса явлений солнечно-земных связей, потенциально опасных для земной цивилизации. Выделяются 3 категории явлений: геомагнитные бури, радиационные бури и нарушения радиосвязи. Каждая категория разделяется на 5 уровней: незначительный (1 балл); умеренный (2 балла); сильный (3 балла); очень сильный (4 балла) и экстремальный (5 баллов). Наиболее опасными являются экстремальные геомагнитные бури, приводящие к полному выходу из строя сетей электропитания, появлению сильных токов в трубопроводах и практически полному прекращению радиосвязи на всех частотах. Экстремальные радиационные бури приводят к опасному облучению космонавтов, экипажей пассажирских самолетов.

Весьма большое значение имеет экологический низкочастотный электромагнитный мониторинг, который исследует:

- роли механизмов генерации и энергетики электромагнитных излучений в процессах передачи энергии, трансформации энергии солнечного ветра в ионосфере и верхней атмосфере Земли;
- антропогенное электромагнитное воздействие на ОКП (излучения линий электропередач, навигационных систем, ионосферы излучением наземных передатчиков) и обратную реакцию последнего;
- медико-биологические проблемы воздействия естественных и антропогенных электромагнитных полей;
- корреляции регистрируемых на КА излучений с экстремальными явлениями и процессами на поверхности, в атмосфере и литосфере Земли (тайфуны, землетрясения, мощные взрывы, энергетические катастрофы и т.д.).

Для количественной оценки солнечной активности, играющей основную роль в формировании «космической погоды», применяются индексы, связанные с реальными потоками электромагнитного излучения. Наиболее часто используется индекс F10.7 – величина потока радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см (2800 МГц), хорошо соответствующий изменениям суммарной площади солнечных пятен и количеству вспышек во всех активных областях (*Иванов-Холодный, 2000*).

Таким образом, проблема прогноза «космической погоды» в XXI веке стала актуальной ввиду профилактики стрессовых ситуаций в работе летчиков, космонавтов, диспетчеров, операторов, водителей общественного транспорта. Отделения реанимации кардиологических клиник также нуждаются в таком прогнозе (*Кокоуров, 2003*).

К факторам, определяющим космическую погоду, относят вариации космических лучей, то есть изменения в пространстве и во времени потока космических лучей галактического и солнечного происхождения, непрерывно бомбардирующих земную атмосферу. На поверхности Земли интенсивность космических лучей зависит от температуры и давления воздуха, широты пункта наблюдения и состояния геомагнитного поля, электромагнитной обстановки в Солнечной системе, физических условий в Галактике. В соответствии с этим вариации космических лучей, обусловленные изменением этих факторов, делят на три класса. Вариации I и II классов (метеорологического происхождения и обусловленные изменениями магнитного поля Земли) с помощью специальной методики могут быть исключены из данных наблюдений, что позволяет в чистом виде находить вариации III класса, т.е. вариации первичных космических лучей.

К III классу вариаций относятся, в частности, внезапные мощные возрастания потока космических лучей, связанные с солнечными вспышками. Амплитуда вариаций первичных космических лучей зависит от энергии частиц и напряженности межпланетных магнитных полей. Большинство вариаций III класса (периодические 11-летние, 27-дневные, солнечно-суточные, а также эффекты Форбуша и др.) обусловлено «выметанием» космических лучей из Солнечной системы неоднородными магнитными полями («магнитными облаками»), движущимися от Солнца вместе с солнечным ветром.

Для примера можно привести данные о состоянии солнечной и геофизической активности (табл. 4.1), которая ежедневно распространяется *NOAA Space Environment Center Boulder, Colorado, USA*.

NOAA SEC Report of Solar-Geophysical Activity 25 Jan 2002

:Product: Report of Solar-Geophysical Activity
 :Issued: 2002 Jan 25 2210 UT
 #Prepared jointly by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA,
 #Space Environment Center and the U.S. Air Force.
 #Joint USAF/NOAA Report of Solar and Geophysical Activity
 SDF Number 025 Issued at 2200Z on 25 Jan 2002
 IA. Analysis of Solar Active Regions and Activity from 24/2100Z to 25/2100Z:
 Solar activity was low. Region 9794 (N13W03) produced the largest flare of the past day, a C6/Sn at 25/0225 UTC.
 Region 9787 (S09W21) remains the largest sunspot group on the visible disk but is not particularly complex and has not produced major activity. New Regions 9800 (N07E63) and 9801 (S03E77) rotated into view.
 IB. Solar Activity Forecast: Solar activity is expected to be low to moderate.
 C-level activity is expected to continue and there is a small chance of an isolated M-class flare.
 IIA. Geophysical Activity Summary 24/2100Z to 25/2100Z:
 The geomagnetic field was quiet to unsettled.
 IIB. Geophysical Activity Forecast: The geomagnetic field is expected to be quiet to unsettled.
 III. Event Probabilities 26 Jan-28 Jan
 Class M 30/30/30
 Class X 01/01/01
 Proton 01/01/01
 PCAF green
 IV. Penticton 10.7 cm Flux
 Observed 25 Jan 235
 Predicted 26 Jan-28 Jan 240/245/250
 90 Day Mean 25 Jan 223
 V. Geomagnetic A Indices
 Observed Afr/Ap 24 Jan 003/004
 Estimated Afr/Ap 25 Jan 006/006
 Predicted Afr/Ap 26 Jan-28 Jan 008/008-008/010-008/010
 VI. Geomagnetic Activity Probabilities 26 Jan-28 Jan
 A. Middle Latitudes
 Active 15/15/15
 Minor storm 05/05/05
 Major-severe storm 01/01/01
 B. High Latitudes
 Active 20/20/20
 Minor storm 05/05/05
 Major-severe storm 01/01/01

В России основные данные о состоянии «космической погоды» аккумулируются в институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН. На рис. 4.1 показана Интернет-страница ИЗМИРАН.



**Институт земного
магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
им. Н.В.Пушкова
Российской Академии наук
Центр прогнозов геофизической
обстановки**

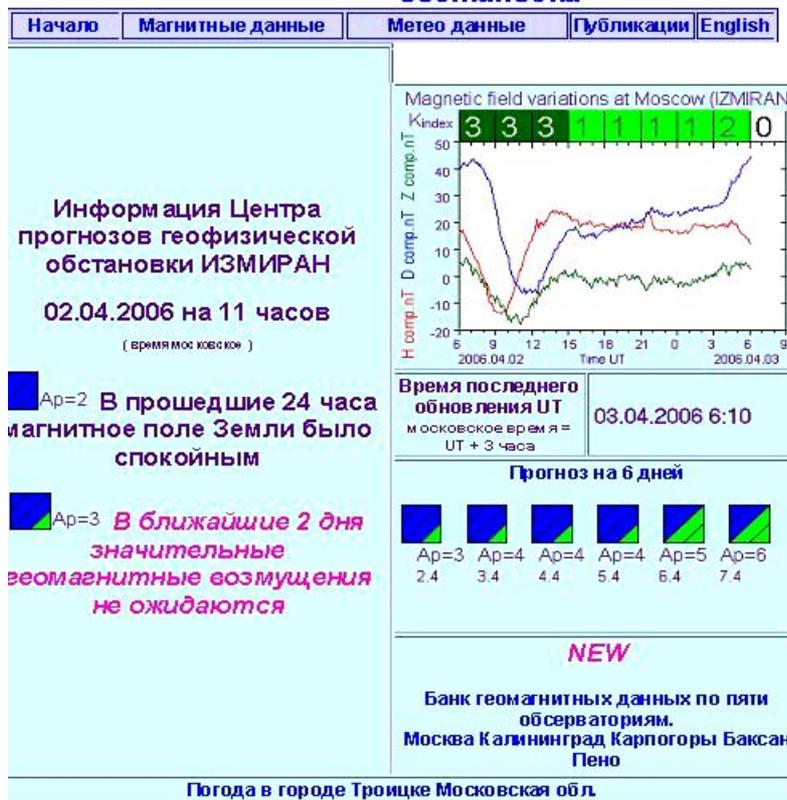


Рис. 4.1. Интернет-страница ИЗМИРАНа с данными, характеризующими «космическую погоду»

Техногенная засоренность ОКП достигла к началу XXI в. весьма значительных величин, привело к созданию службы мониторинга техногенной космической обстановки средствами наблюдения наземного и космического базирования. Эта же служба позволяет следить и за естественным космическим мусором в ОКП.

Так как фрагменты космического мусора дрейфуют на своих орбитах под влиянием неравномерности гравитационного поля, солнечного ветра и магнитных бурь, требуется постоянное обновление сведений о космическом мусоре и ведение постоянно корректируемого банка данных о нем. До настоящего времени такого банка, подобного банку об ИСЗ, пока не существует.

Естественно, техногенное состояние ОКП, обусловленное наличием в нем космических аппаратов и отходов космической деятельности, прямо связано с его физическим состоянием.

В нижней части ОКП на высотах 200-1000 км процессы, связанные главным образом с солнечной активностью, являются основным возмущающим фактором, влияющим на движение космических аппаратов, фрагментов техногенного и естественного мусора (Касименко, Микиша и др., 2000):

- 1) Наблюдается существенный нагрев газа верхней атмосферы на высотах 300-400 км до температур 600-800 К при минимуме и 900-1200 К при максимуме солнечной активности. Основным источником нагрева является поглощение крайнего УФ-излучения Солнца нейтральной составляющей верхней атмосферы. В высоких широтах существенную роль играют дополнительные источники энергии.

магнитосферного происхождения («высыпание» заряженных частиц, электродинамическая диссипация), которые при сильных геомагнитных возмущениях могут вызвать возрастание температуры на величину до 500 К.

- 2) Основными видами нейтральных частиц в верхней атмосфере являются молекулы N_2 , O_2 и атомы N , He , H , а ионизованных – ионы N_2^+ , O_2^+ , NO^+ , N^+ , H^+ , образующиеся под действием дальнего солнечного ультрафиолета (хотя на этих высотах содержание последних относительно невелико).
- 3) Разреженный газ верхней атмосферы испытывает сложный комплекс вариаций, определяемый в первую очередь пространственно-временными характеристиками источников энергии и систем динамических процессов в верхней атмосфере.

Важнейшими вариациями плотности в верхней атмосфере являются:

- 11-летняя, связанная с циклом солнечной активности, в течение которого плотность изменяется в среднем на величину $\sim 20\%$ на высоте 600 км (область максимальной амплитуды данной вариации);
- полугодовой эффект, при котором максимальное изменение плотности на величину $\sim 3\%$ наблюдается на высотах $\sim 500-600$ км;
- кратковременные и нерегулярные вариации плотности, связанные с геомагнитной активностью (до $\sim 10\%$ на высоте 600 км).

В связи с появлением в ОКП в XX веке большого количества техногенных тел (искусственных космических объектов и техногенных отходов) было введено понятие техногенной космической обстановки, мониторинг которой осуществляется службами контроля космического пространства.

Техногенная космическая обстановка – целостное, включающее в себя множество техногенных космических тел, образование, состояние которого определяется условиями нахождения этих тел в ОЗС и факторами иного рода, со свойствами, не сводящимися к свойствам отдельных техногенных тел и вытекающих из этих свойств (Пудовкин О.Л., 2000). Задачи, решаемые в процессе мониторинга техногенной космической обстановки, определяются совокупностью взаимосвязанных моделей: 1) информационными моделями; 2) моделями оценки пространственно-временного распределения техногенных космических тел; 3) моделями оценки состояния техногенной космической обстановки (рис.4.2).



Рис. 4.2. Компоненты техногенной космической обстановки

Информационные модели данных о техногенных космических телах обеспечивают решение задач оценки состояния техногенной космической обстановки. При проведении системного анализа техногенной космической обстановки техногенные космические тела характеризуются набором координатной и некоординатной информации. При анализе появления неконтролируемых техногенных космических тел в настоящее время наиболее широко применяется эмпирическое соотношение между массой взорвавшегося объекта и образовавшимися в результате обломками. Модели данных о ТК-телах, возникновение которых нельзя прогнозировать, актуализируются посредством широко применяемых в России съемных датчиков соударений, устанавливаемых на ИСЗ и орбитальных станциях. В США для этого используются данные радара *Haystack*.

Модели оценки пространственно-временного распределения, включающие в себя также модели актуализации, подразделяются на глобальные (универсальные по области применения) и локальные (частности, модели геостационарной области). В основе координатных моделей (*Назаренко, 2000; Хуторовский, 1995*) лежит детерминированный подход с определением опасных сближений контролируемых техногенных тел с контролируемыми полезными грузами, определяемых относительной скоростью, временем появления событий, вероятностью столкновения.

Локальные модели геостационарной орбиты относительно свойства контролируемости ТК-тел инструментальными средствами делятся на координатные и некоординатные. Скорости относительного движения здесь не превосходят 100 м/с и их столкновения не приводят к взрывным эффектам.

Таким образом, перечисленные модели приводят к моделям оценки состояния техногенной космической обстановки, что в общем отвечает задачам мониторинга техногенной составляющей ОКП.

По способу осуществления мониторинг ОКП как метод астрофизических исследований подразделяется на прямой и дистанционный.

К прямому мониторингу относятся все способы контроля состояния ОКП, которые можно осуществить при проведении непосредственного определения параметров околоземного пространства аппаратурой, установленной на космических объектах.

Так, например, для контроля двух типов не доходящего до поверхности Земли солнечного излучения (жесткого УФ, рентгеновского и корпускулярного), запущены патрульные ИСЗ «КОРОНА» (Россия), «GOES» (USA), «YOHKOH» (Japan), «SOHO» (USA). Продолжая начатые ранее измерения потоков излучения, эти спутники стали регулярно получать также изображения Солнца в рентгеновском и УФ лучах.

Европейское космическое агентство в конце 2000 г. запустило четыре ИСЗ, образующих единую систему «Cluster», предназначенную для изучения в ОКП магнитного поля Земли, его взаимодействия с Солнцем. Система изучает структуру магнитосферы, ее под действием солнечного ветра. Зафиксированы перемещения полярных каспов, хотя ранее считалось, что их пространственное положение достаточно стабильно. Получено первое экспериментальное доказательство существования волн в магнитопаузе (Cornilleau-Wehrlin, 2001).

Сюда же относится определение физических параметров плазмы магнитосферы и ионосферы, величин магнитного и электрического полей и т.д., а также изучение распределения частиц космического мусора техногенного и естественного происхождения при помощи датчиков соударения.

Кроме того, большое значение имеет изучение воздействий процессов в ОКП на спутниковые аппараты: образование поверхностного заряда, воздействия галактических и солнечных космических лучей, сопротивление слоев верхней атмосферы, столкновения с космическим мусором, метеорными телами, эффекты ориентации, фотонный шум, деградация поверхности (www.sec.noaa.gov).

К дистанционному мониторингу относятся, по сути, все методы изучения ОКП, возможные с доступных с поверхности Земли диапазонов электромагнитных колебаний, представляющих оптимизированные к соответствующим условиям методы астрофизических исследований. Данные дистанционного мониторинга при сравнении с данными геофизического мониторинга состояния биосферы позволяют к какой-то степени оценивать воздействие процессов в ОКП на процессы в биосфере, прогнозировать экологическую ситуацию на Земле в зависимости от воздействия из космоса.

Активные методы дают возможность изучить в контролируемых условиях основные физические процессы, протекающие при антропогенных воздействиях на ОКП.

При их использовании изучается реакция околоземной среды на контролируемое возмущение, производимое путем инъекции плазмы, нейтрального газа, пучков частиц и электромагнитного излучения. Поэтому иногда эксперименты в космосе, связанные с использованием активных методов, называют контролируемыми (Физика косм. простр., 1997) Это подчеркивает связь между откликом среды и начальным возмущением, параметры которого контролируются. В зависимости от степени возмущения среды активные эксперименты могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся эксперименты типа меченых атомов, которые практически не возмущают среду, а в основном трассируют процессы и явления. Эксперименты второй группы предполагают осуществление локальных дозированных возмущений среды. Классическим примером экспериментов первого типа является исследование процессов в околоземном пространстве с помощью искусственно создаваемых светящихся облаков, которые образуются в результате инъекции паров щелочных металлов: лития, натрия, бария, цезия с борта ракет и космических аппаратов. Первые эксперименты такого рода были проведены еще в самом начале космической эры.

Подобные методы позволяют также глубже понять явления, возникающие при взаимодействии космических аппаратов с окружающей средой. В частности, с использованием активных методов можно определять преимущественные каналы антропогенных воздействий, эффективность их влияния на различные области околоземного пространства. Наконец, что весьма важно, активные эксперименты дают информацию для оценки масштабов антропогенных воздействий и их последствий, а также для установления экологических границ космических экспериментов и производственной деятельности в космосе. Понятие экологические границы используется для обозначения ограничений на таковые воздействия, которые приводят к нежелательным возмущениям планетарной и космической среды и разрушению уникальных космических объектов.

Следует отметить, что проблема определения экологических границ человеческой деятельности в околоземном пространстве весьма актуальна (*Физика косм. протр., 1997*).

4.2. Анализ возможностей современных средств мониторинга загрязнения околоземного космического пространства

Процессы, протекающие в ОКП, законы движения в нем тел различного происхождения определяют, соответственно, и методы создания и функционирования систем экологического мониторинга в этой области окружающей среды. Методология создания таких проблемно-ориентированных систем базируется на положениях системного анализа, основными принципами которого являются (*Шаповалов, 1999*):

- системное единство, предусматривающее целостность системы в целом, ее подсистем, включая систему управления;
- информационное единство и совместимость, обеспечивающие единство информационной структуры пространства, структурных связей между подсистемами и их функционирования;
- комплексность и инвариантность, состоящие в том, что компоненты, элементы и звенья системы в целом и подсистем должны быть связанными и универсальными;
- включение и развитие, определяющие, что требования к системе формулируются со стороны системы более высокого уровня, причем предусматривается возможность совершенствования и дальнейшего развития элементов и связей между ними.

В самом общем виде система мониторинга окружающей среды – интегрированная многоуровневая иерархическая система с соответствующей информационной, аппаратной, методической и контрольно-измерительной базой.

Особенности мониторинга объектов в ОКП привели к тому, что экологический мониторинг ОКП базируется на методах и аппаратуре околоземной астрономии, радиоастрономии, радиолокации и космических исследований.

На рис. 4.3 (*Муртазов, 2004*) показаны окна прозрачности атмосферы и ионосферы, наличие которых определяет основные требования к методам мониторинга ОКП и организации таких исследований на земной поверхности.

Земная атмосфера почти полностью прозрачна для падающего электромагнитного излучения лишь в двух сравнительно узких окнах: оптическом – от 300 нм до 1,2-2 мкм (ИК-область до 8 мкм состоит из ряда узких полос пропускания) и в радиодиапазоне – для волн длиной от 1 мм до 15-30 м.

Непрозрачность атмосферы для всех других волн определяется поглощением и рассеянием излучения на молекулах и атомах, а также отражением радиоволн от электронов ионосферы и магнитосферы.

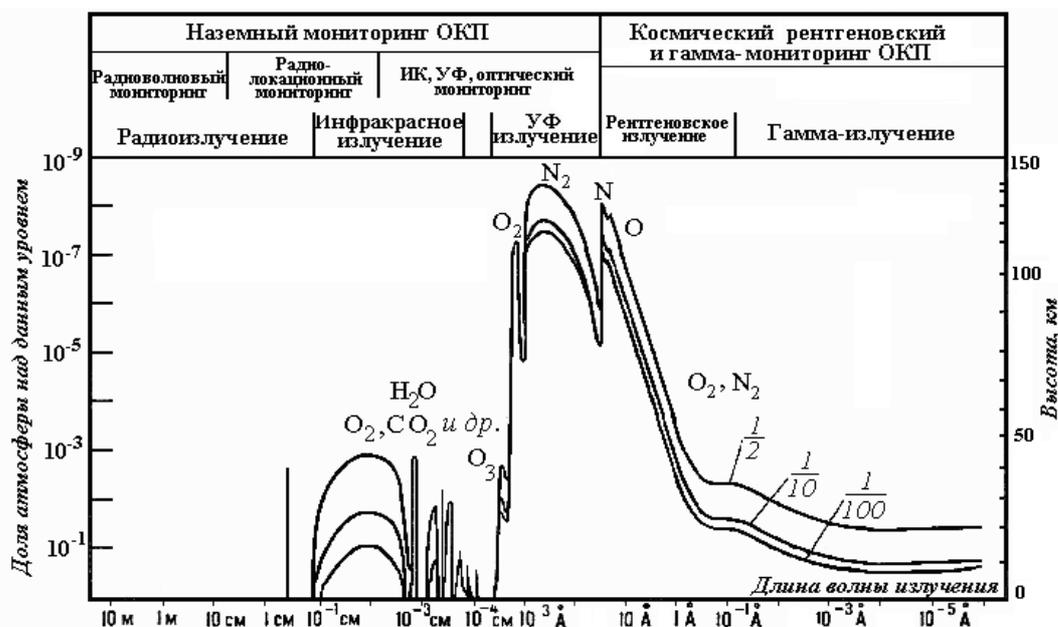


Рис. 4.3. Классификация видов мониторинга ОКП по спектру электромагнитных излучений

В УФ-области спектра излучение поглощается в основном слоем озона с максимумом $3 \cdot 10^{18}$ молекул/см³ на высотах 25-27 км.

В интервале 180-100 нм поглощение определяется процессами ионизации и диссоциации кислорода, содержание которого уменьшается с высотой и становится исчезающе малым на высотах свыше 150 км.

В области короче 100 нм поглощение связано с процессами ионизации молекулярного азота и атомарного кислорода. Уменьшение их концентрации с высотой приводит к тому, что выше 150 км атмосфера становится полностью прозрачной во всем УФ-диапазоне.

В рентгеновском и гамма диапазоне поглощение зависит от количества вещества, расположенного выше данного уровня атмосферы. В связи с этим, начиная с 30-40 км атмосфера становится практически прозрачной для фотонов с энергией, превышающей 20 кВ (то есть для длин волн короче 0,5Å). До поверхности Земли первичные космические лучи и гамма излучение не доходят.

В ближнем ИК-диапазоне (короче 5,5 мкм) имеется несколько окон прозрачности и зависимость пропускания атмосферы от длины волны имеет весьма сложный вид. В дальнем ИК-диапазоне расположено лишь два окна прозрачности 8-13,5 мкм и 16-26 мкм. В длинноволновой части первого окна расположены крылья полосы поглощения молекулы CO_2 с центром около 15 мкм. В этой полосе прозрачность достигает 50-80%. В области 9,3-10 мкм расположена слабая полоса поглощения озона. Поглощение во втором окне определяется молекулами CO_2 и H_2O .

В области субмиллиметровых волн ($\lambda > 100$ мкм) поглощение определяется молекулами H_2O , CO_2 и O_2 .

В области миллиметровых длин волн ослабление падающего излучения зависит от влажности атмосферы и определяется полосами поглощения водяного пара и молекулярного кислорода.

В декаметровых областях радиодиапазона непрозрачность атмосферы определяется отражением радиоволн от ионосферы и зависит от ее состояния и состояния нижних слоев магнитосферы.

Таким образом, выбор средств мониторинга ОКП определяется пропусканием атмосферой и ионосферой Земли падающего на нее электромагнитного и корпускулярного излучения.

Это позволяет разделить средства мониторинга ОКП на наземные, использующие все виды астрофизических приборов для регистрации излучений и космические, в которых такие приборы работают с датчиками соударений размещаются на искусственных космических объектах.

К наземным средствам мониторинга состояния нижней части ОКП - ионосферы относятся главным образом, радары некогерентного рассеяния (Шпынев, 2005).

Если первые радиолокаторы работали в диапазоне коротких волн КВ, то для радиолокации ближнем космосе потребовалось перейти к частотам, для которых ионосфера Земли была бы прозрачна. Поскольку критическая частота максимума ионизации редко превышает значения 11-13 МГц, рабочие частоты радаров выбирались в диапазоне 40 МГц и выше. На этих частотах отражения неоднородностей ионосферы в средних широтах, где расположена большая часть средств наблюдения, практически отсутствуют, следовательно, начиная с частоты 40 МГц, можно было конструировать радиолокаторы для наблюдения за космическими объектами. Верхняя частота диапазона работы РЛС ограничивается частотами 1-2 ГГц, поскольку при длине волны менее 2-3 см, сигнал испытывает сильное рассеяние на турбулентностях нейтральной атмосферы. Кроме указанных ограничений, на работу радиолокаторов влияют естественные радиоисточники: Солнце, галактический шум, отдельные звездные радиоисточники (например, из созвездия Лебедя и крабовой туманности). В разных диапазонах длин волн мощность радиошума разная, она максимальна в КВ диапазоне и существенно падает с частотой выше 200 МГц.

Поскольку требуемая дальность радиолокации составляет тысячи, и десятки тысяч километров, импульсная мощность РЛС достигает 5-6 МВт.

По мере развития космической техники встали вопросы о свойствах околоземного пространства и о возможности проводить его диагностику радиофизическими методами. Этот интерес имел не только прикладной, но и чисто фундаментальный научный характер. Хотя диагностика ионосферы в 50-х годах уже активно проводилась, наземные КВ ионозонды давали информацию только о концентрации электронов ниже главного ионосферного максимума. Изучение других характеристик среды, таких как температура, ионный состав, скорости дрейфа начало проводиться с помощью ракет в конце 50-х и начале 60-х годов.

В процессе исследования свойств ионосферы оказалось, что электроны плазмы не являются свободными, а их движение контролируется более тяжелыми ионами. После этого в 1961-1967 годах последовал ряд научных работ, в которых была разработана теория термального рассеяния, которую назвали некогерентным, и метод получил название метода некогерентного рассеяния (НР).

В отличие от КВ - зондирования, где используется сигнал, отраженный от ионосферы, основная мощность при измерении сигналов НР проходит сквозь ионосферу, и назад возвращается очень слабый сигнал, для регистрации которого используется специальная обработка и длительное статистическое усреднение. При этом метод НР не ограничен высотами ниже максимума ионизации, и при высокой электронной концентрации позволяет измерять температуры электронов и ионов, скорость дрейфа плазмы вдоль направления зондирования и ионный состав. Современные знания о структуре ионосферы и ее динамике во многом основаны на данных радаров НР, полученных начиная с 60-х годов.

На рис 4.4. представлена современная сеть радаров НК, при помощи которой исследуются параметры различных слоев ионосферы (*Шпынев, 2005*).

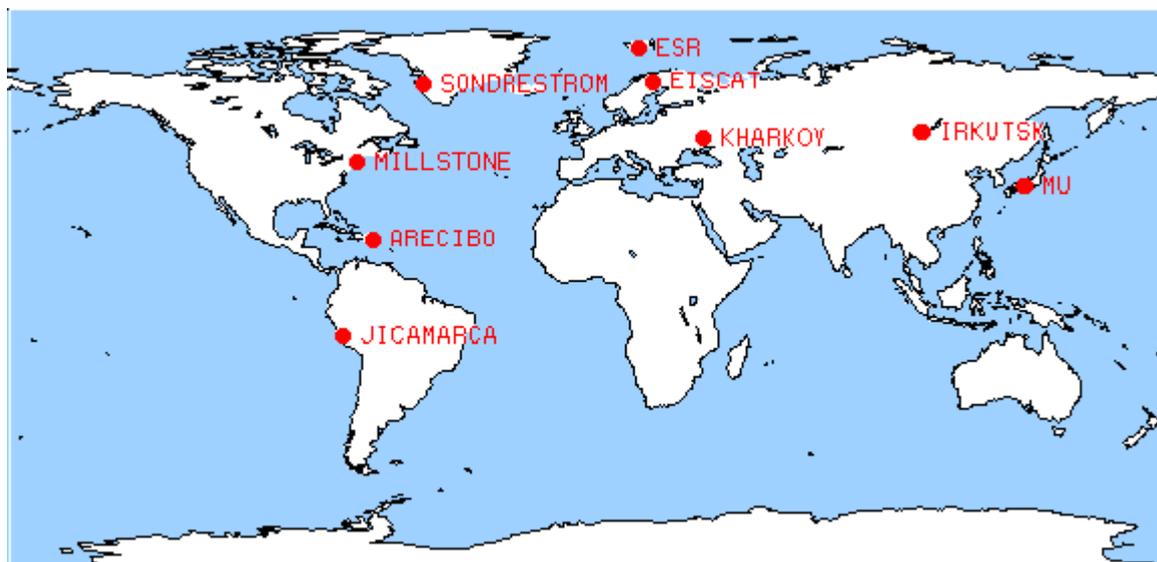


Рис. 4.4. Карта действующих радаров НР

К средствам мониторинга космического мусора в ОКП относятся радиолокационные, лазерные и оптические устройства, позволяющие вести наблюдения вплоть до геостационарных орбит (рис.4.4 *Логинов, Пирогова, 2000*).

Наземные радиолокационные станции (4), работающие в диапазоне от миллиметрового до метрового, осуществляют в настоящее время непрерывный обзор ОКП. Следует отметить, что имевшиеся планетные радиолокаторы позволили измерить на низких орбитах концентрацию и распределение частиц с размерами, большими 2 мм (*Goldstein, 1995*). Постоянный контроль таких частиц космического мусора на низких орбитах осуществляется, главным образом, с помощью РЛС «Haystack» (США) и «Fgan» (Германия) (*Козлов, 1997; Мешков, 2001*).

В отличие от оптических наблюдений радиолокационный метод использует отраженное излучение, созданное собственным передатчиком. Несмотря на невысокое угловое разрешение, когерентность излучения позволяет непосредственно измерять лучевую скорость и расстояние до объекта.

В общем случае при работе одной антенной мощность P_0 принятого от космического объекта сигнала определяется из уравнения (*Бронштэн, 1979*)

$$P_0 = P * \frac{GA\rho\pi R^2}{(4\pi r^2)^2}, \quad (4.1)$$

где P – излучаемая мощность, A – эффективная площадь антенны, R – эффективный радиус объекта, r – расстояние до него, G – коэффициент усиления передающей антенны, равный

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2}, \quad (4.2)$$

λ – длина волны излучения, ρ и g – коэффициент отражения объекта на этой длине волны и коэффициент направленности отраженного излучения. Для $\lambda=12,5$ см $\rho g=0,1$.

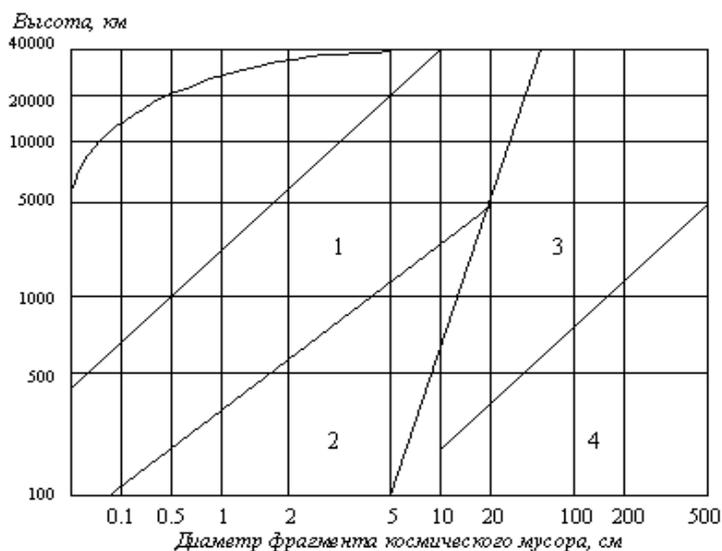


Рис. 4.5. Возможности наземных средств мониторинга ОКП

При достаточной мощности радиолокатора его чувствительности достаточно для обнаружения сигнала, отраженного объектом размерами много меньше длины волны. Эффективная площадь σ обратного рассеяния объекта, определяющая интенсивность отраженного сигнала, пропорциональна шестой степени его диаметра. Например, для металлической сферы радиуса R эта величина определяется как $\sigma = 9\pi * \left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^4 * (R)^2$. Для случая металлической сферы радиусом много больше λ эффективная площадь обратного рассеяния равна ее поперечному сечению πR^2 и не зависит от λ .

Минимальный размер наблюдаемых объектов при радиолокации с использованием двух антенн оценивается из основного уравнения радиолокации (Ржигза, Зайцев А.Л., 1998) для мощности отраженного сигнала на входе приемника

$$s_{ex} = \frac{P * A_1 * \sigma * A_2}{4 * \pi * r_1^2 * r_2^2 * \lambda^2}, \quad (4.3)$$

где A_1 и A_2 – эффективные площади излучающей и приемной антенн, r_1 и r_2 – соответственно расстояния от них до наблюдаемого объекта.

Средняя мощность шума, приведенная ко входу приемника

$$s_{ш} = \frac{kT_{ш}}{\theta}, \quad (4.4)$$

где k – постоянная Больцмана, $T_{ш}$ – шумовая температура антенны и приемника, θ – величина обратная полосе пропускания приемника (время когерентного накопления сигнала).

Отсюда: отношение мощности принятого сигнала к средней мощности шума $s_{ex} / s_{ш}$, а также эффективная площадь обратного рассеяния определяют предельные размеры объекта, который можно обнаружить радиолокационным методом (табл. 4.2)

Рассматриваются требования к размещению и техническим характеристикам РЛС, предназначенных для решения основных задач радиолокации космических объектов: обнаружения КО неизвестными орбитами, подтверждения и уточнение орбит, измерения радиолокационных сигнатур КО (в т. ч. получение радиоизображений) и измерения статистики потоков малоразмерных частиц космического мусора.

Задача наблюдения объекта в ОКП распадается на две стадии: стадию обнаружения и первоначального определения орбиты объекта и стадию сопровождения и уточнения его орбиты с

использованием прогноза движения. Решение первой задачи при отсутствии априорных данных об орбите требует быстрого обзора больших областей пространства. Особенно жестким это требование является в отношении низкоорбитальных ИСЗ (диапазон высот от 200 до 2500 км). Радиолокатор должен не только зафиксировать наличие объекта, но и пронаблюдать его на некоторой дуге, чтобы определить угловую скорость движения и продолжить сопровождение вне барьера. Опыт проектирования средств наблюдения показывает, что выполнить эти требования могут только радиолокаторы с фазированными антенными решетками (ФАР). Эти РЛС обнаруживают цели в режиме обзора барьера, а затем сопровождают их в зоне электронного сканирования

Если рассчитывать на малоразмерные объекты с эффективной площадью радиоотражения $0,01 \text{ м}^2$, то получаются типичные параметры для РЛС такого класса. Для РЛС AN/FPS -85 служившей для контроля космического пространства США приводились значения средней мощности 300-700 кВт, диаметра приемной антенны 58,5 м, дальности по 1 м^2 –8000 км. Эта дальность фактически не нужна, избыток потенциала важен для наблюдения малоразмерных объектов в ОКП (*Курикса, Шилин, 2002*).

Большое значение для нашей страны имеет разработанный ОКБ МЭИ комплекс радиолокационного мониторинга ОКП (*Мешков, 2001*). Базой комплекса «Кобальт-РЛС» являются радиотелескопы ТНА-1500, размещенные на подмосковном пункте «Медвежьих Озера» и в г. Калязин (Тверская обл.), а также передатчик С-диапазона мощностью 3,9 кВт в непрерывном режиме.

Еще одно направление работ развивается в ГАО РАН, где координируются радиолокационные исследования высокоорбитального космического мусора на базе больших антенн бывшей сети слежения за межпланетными космическими аппаратами. Украинская сторона облучает объекты с помощью передающей 70-м антенны в Евпатории, а российская сторона обеспечивает прием эхо-сигналов на РТ-64 в Медвежьих Озерах (*Molotov, et al, 2004*).

Российско-украинская радиолокационная система, состоящая из 70-метровой антенны и передатчика 6-сантиметрового диапазона со средней мощностью 150 кВт в Евпатории (рис. 4.6) и двух антенн ОКБ МЭИ до сих пор остается одним из основных средств контроля ОКП, которая и обеспечивает основную массу исследований в этой области.

Для мониторинга параметров солнечного ветра, орбит межпланетных КА, астероидов, космического мусора и ИСЗ применяют метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Основные принципы РСДБ заключаются в следующем. Космические объекты или явления наблюдаются по единой программе одновременно на нескольких радиотелескопах (антеннах), расположенных на расстояниях от нескольких десятков до многих тысяч километров друг от друга. Радиосигналы от объектов когерентно принимаются в заданном диапазоне частот высокочувствительными радиоприемниками, преобразуются на промежуточную частоту, за которую требуется полоса частот вырезается видеоконверторами в зависимости от спектра принимаемого радиосигнала, оцифровывается и записывается на какой-либо носитель. Последующая обработка позволяет получить как физические параметры межпланетной среды так и параметры движения объектов в Солнечной системе и ОКП (*Молотов, 2006*).

В период с 1969 по середину 2002 г. основные исследования тел Солнечной системы методами радиолокации проводились в США: астероиды главного пояса -75 (США); опасные астероиды -10 (США), 3 - Европа и Россия; кометы - 6 (США). С использованием Российских, Украинских и общеевропейской сети радиолокаторов на базе крупных радиотелескопов мониторинг ОКП постепенно налаживается и на территории Евразии (*Zaitsev A., 2002*).

Таблица 4.2

Возможности современных систем РЛС

Параметры системы	Система РЛС				
	Арсибо	Голдстоун	Евпатория	Хайстек	Кобальт РЛС
Рабочая длина волны, см	12,6	3,5	6	3	6
Мощность, кВт	1000	480	150	16	5
Площадь передающей антенны, м ²	30360	2560	2600	700	2000
Площадь приемной антенны, м ²	30360	2560	2X2000	700	2000
Шумовая температура приемной системы, К	30	20	50	25	50
Минимальный размер регистрируемого объекта на низкой орбите, мм	1,8	0,8	1,7	1,4	5
Минимальный размер регистрируемого объекта на геостационарной орбите, мм	20	8	10	16	30

Сюда же входит радиотелескоп Р-70 в Уссурийске, который был построен в 1979 г., и использовался для радиоинтерферометрических наблюдений космических аппаратов, запущенных к комете Галлея в 1986 г.

К перспективным средствам получения некоординатной информации о телах различного происхождения в ОКП относится радар некогерентного рассеяния Института солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), являющийся одним из главных геофизических инструментов России по контролю физического состояния ионосферы. Дистанционное зондирование в диапазоне частот 1 МГц-40 ГГц является наиболее эффективным методом мониторинга состояния ионосферной плазмы (*Татевян, 2006*).

Режим частотного сканирования и веерная диаграмма направленности, высокий потенциал позволяют радару осуществлять одновременно с определением параметров ионосферы измерение некоординатной информации о телах в ОКП (*Заворин и др., 2001*). Разработанные в настоящее время двухпозиционные радиолокационные системы и высокопотенциальные РЛС сантиметрового диапазона (1 на рис. 4.5) могут быть использованы для регистрации космического мусора размером от нескольких мм до нескольких см в диапазоне расстояний до геостационарной орбиты.



Рис. 4.6. 70-м радиотелескоп Центра космической связи в Евпатории (фото автора)

Наземные лазерные локационные средства (2) способны с высоким разрешением обнаруживать и распознавать космические объекты размерами от нескольких мм на низких орбитах до ~5-10 см на орбитах высотой до 40000 км.

Основная задача лазерных локационных средств состоит в определении расстояния до объектов ОКП с высокой точностью. Это весьма важно, когда объект движется вдоль луча зрения, то есть в случае, когда угловые измерения вообще не дают информации для определения его положения (падающий спутник или фрагмент космического мусора, опасный для Земли астероид). Ряд таких лазерных локаторов, совмещенных с оптическими средствами наведения, работает во всем мире и дает точность определения расстояния в ОКП до 1 см (Выгон и др., 2000; Ардашев и др., 1998).

В настоящее время Российская лазерная сеть включает в себя (Выгон и др., 2000): станцию в районе Комсомольска-на-Амуре (поддержание каталога космических объектов и космического мусора); станцию «Космотэн» на Северном Кавказе (координатные измерения, а также фотометрические наблюдения с целью распознавания ИСЗ и космического мусора, система адаптивной оптики); станцию в г. Щелково Московской области (определение дальности объектов до расстояний 40000 км с погрешностью меньше 1 см); совместную с Узбекистаном станцию на г. Майданак.

Современный лазерный локатор может проводить локацию даже не имеющих угловых отражателей объектов в ОКП при условии достаточной точности наведения на них. То есть, оптический телескоп, который может дать такую точность, должен в перспективе иметь оптическую систему, позволяющую использовать его для определения дальности до обнаруживаемых объектов методом лазерной локации.

Однако, ввиду отсутствия статистической информации об отражательных свойствах поверхностей космического мусора в диапазоне частот излучения лазерных дальномеров, они не используются для непрерывного мониторинга ОКП.

Одним из основных средств мониторинга ОКП являются оптические наблюдения (3), позволяющие обнаруживать, сопровождать, распознавать космические тела размерами от 5 см на низких орбитах до 1 м на геостационарных орбитах. Единственным недостатком оптических систем является прямая зависимость от условий наблюдения (состояние атмосферы, яркости фона неба и др.), что в значительной степени стимулирует создание оптических систем мониторинга ОКП космического базирования (Рыхлова, 1998).

Освещенность земной поверхности отраженным (рассеянным) астрономическим объектом (АО) излучением зависит от ряда причин. Без учета дополнительного освещения АО (искусственного) Земли и Луной монохроматическая освещенность, создаваемая ИКО на поверхности Земли, выразится (Курьшев, Муртазов, 1985)

$$E_{\lambda}^{ико} = E_{\lambda} * \frac{a_{\lambda} * F(\varphi) * S}{d^2} * P_{\lambda}^{M(z)} * \eta_{\lambda}^{-1}(z),$$

где E_{λ} - монохроматическая освещенность АО Солнцем, d - его топоцентрическое расстояние, a_{λ} - альbedo поверхности АО, S - видимая освещенная площадь поверхности АО, $F(\varphi)$ - фазовая функция, определяемая структурой поверхности тела, P_{λ} - монохроматический коэффициент прозрачности атмосферы, $M(z)$ - атмосферная масса, η_{λ}^{-1} - пропускание атмосферы, определяемое теллурическим поглощением.

Из этого выражения следует, что для распознавания АО оптическими методами требуется определить параметры, характеризующие рассеяние света их поверхностями, т.е. a_{λ} и $F(\varphi)$. Если существует независимая база данных об оптических свойствах поверхностей естественных и техногенных АО, то задача распознавания их по результатам оптических наблюдений сводится к однозначной и определяемой чувствительностью астрономической системы (исключая тем или иным образом помехи со стороны атмосферы).

В отличие от радио- и лазерной локации ОКП данные об оптических свойствах АО имеют. Наблюдения накопили значительную информацию об отражательных свойствах в оптическом диапазоне материалов поверхностей искусственных космических объектов, из которых образуется техногенный космический мусор, так и поверхностей естественного космического мусора (Муртазов, 1994, 2004). Это позволяет в ряде случаев идентифицировать техногенный и естественный мусор (фрагменты межпланетной пыли, осколков астероидов, метеорного вещества, искусственных космических аппаратов) по результатам сравнительного анализа многоцветных фотометрических наблюдений.

К основным методам оптического мониторинга относятся методы астрометрии и небесной механики, предоставляющие данные для определения орбит, многоцветная фотометрия, спектральный поляриметрический методы (некоординатная информация), необходимые для распознавания объектов. Однако, ввиду специфики оптических наблюдений объектов в ОКП, наибольшее развитие получили главным образом, их BVR-фотометрия, оперативно осуществляемая с использованием ПЗС-приемников. Основная масса наблюдений производится в полосах B ($\lambda_m=440$ нм), V ($\lambda_m=550$ нм) и R ($\lambda_m=720$ нм) многоцветной фотометрической системы. BVR-мониторинг тел естественного и техногенного происхождения в ОКП позволяет производить их идентификацию (Murtazov, 2004), что пока недостижимо другими методами исследований.

К средствам оптического мониторинга ОКП можно в принципе отнести любой телескоп, с помощью которого можно обнаружить объект, произвести измерения его орбиты и оптические характеристики. Исследования объектов на низких орбитах при помощи крупных телескопов, имеющих параллактические и азимутальные монтировки, ввиду невозможности отслеживания и быстрого движущихся по небесной сфере объектов, не проводятся. В этих случаях при исследовании техногенного мусора в ОКП применяются главным образом телескопы на монтировках, специально разработанных для наблюдений ИСЗ (низкие орбиты), различные модификации камер All-Sky (главным образом, при изучении метеорных потоков в ОКП). Исключение составляют наблюдения объектов на геостационарных орбитах.

Все эти методы образовали новую науку, занимающуюся мониторингом объектов естественного и искусственного происхождения в ОКП – околоземную астрономию (Багров, 2001).

Средствами, занимающимися поиском опасных астероидов еще задолго до попадания последних в ОКП являются: Паломарская служба инспектирования астероидно-кометных тел, Паломарская служба инспектирования астероидов, пересекающих орбиты планет, пункт поиска опасных астероидов на обсерватории Китт-Пик *Spacewatch*, англо-австралийская служба инспектирования опасных астероидов и т.д. В России и странах СНГ такими обсерваториями являются Крымская астрофизическая обсерватория, Специальная астрофизическая обсерватория РАН (Северный Кавказ), обсерватория астрофизического института Казахской АН. Эпизодическими исследованиями в этой области занимаются практически все университетские обсерватории России.

Основную роль в открытиях астероидов играет в настоящее время проект Массачусетского технологического института *LINEAR* (*Lincoln Near Earth Asteroid Research* – рис. 4.7.), по которому с 1998 г. ведутся ПЗС-наблюдения опасных астероидов и объектов в ОКП.



Рис. 4.7. Метровый телескоп GEODSS системы LINEAR

К 2007 г. открыто около 4600 близко проходящих к Земле объектов (Near Earth Objects – NEO), из них потенциально опасных (Potentially Hazardous Objects - PHOs) – около 850 (*AIAA Planetary Defense Conference. - George Washington University, March, 2007*).

На рис. 4.8 приведена динамика открытий опасных астероидов различными службами (*Near Earth Object Program*)

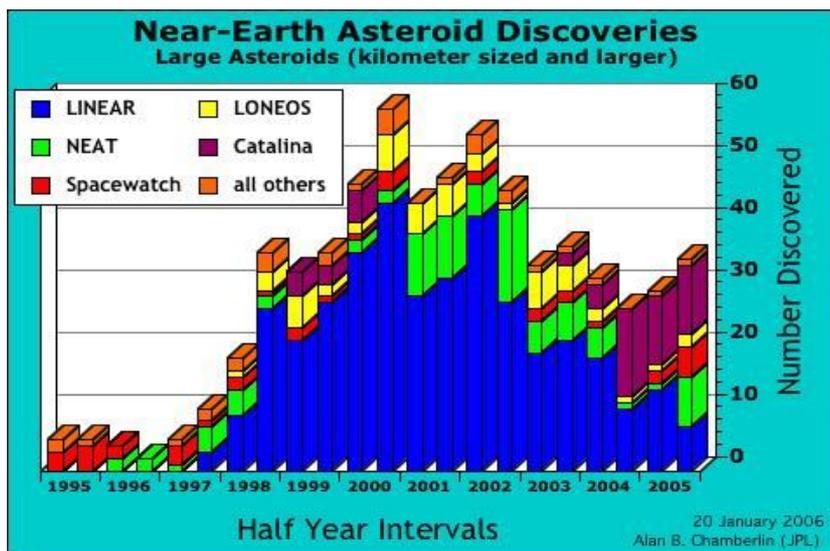


Рис. 4.8. Динамика открытий опасных астероидов различными службами

С 2005 г. начала работать Пулковская кооперация оптических наблюдений (ПулКОН), в рамках которой организована протяженная сеть (рис. 4.9) оптических телескопов для выполнения координированных наблюдательных программ для решения научных и прикладных задач (космический мусор, астероиды, гамма-всплески).

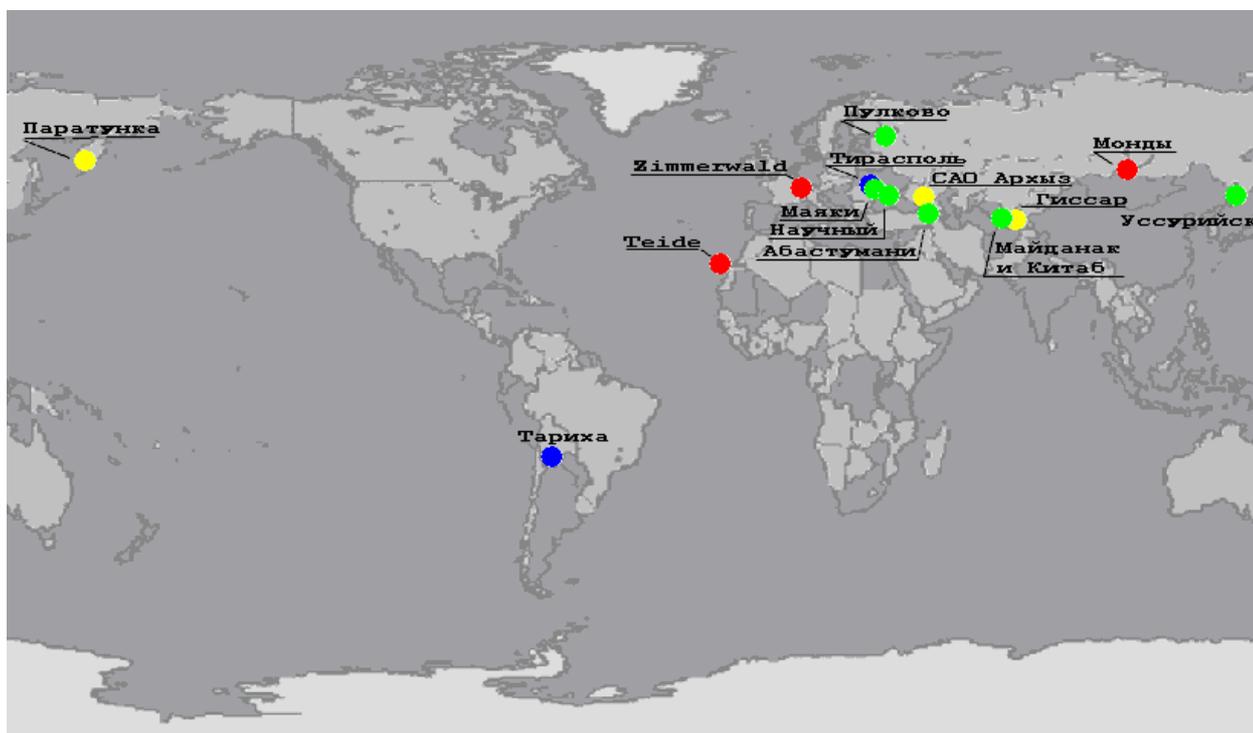


Рис. 4.9. Расположение пунктов оптических наблюдений космического мусора по программе ПулКОН (Молотов, 2007)

Особое место в мониторинге ОКП занимают службы контроля космического пространства РФ и США, проводящие радиолокационные, лазерные, оптические наблюдения всех видов техногенных объектов в ОКП и их полную каталогизацию.

Российский оптико-электронный комплекс обнаружения высокоорбитальных космических объектов «Окно» (рис. 4.10) расположен на территории Таджикистана и предназначен для автономного автоматического обнаружения космических объектов на высотах 2.000 — 40.000 км, сбора по координатной и некоординатной (в основном, фотометрической) информации, расчета параметров движения и некоординатных признаков (Анисимов, Батырь, 2004, 2006).



Рис. 4.10. Оптико-электронный комплекс МО РФ «Окно»

Следует отметить, что информация, получаемая средствами оптико-лазерных систем, конкурирует с данными радиолокационного мониторинга. Эти два средства мониторинга дополняют друг друга.

Сопоставление зон действия радиолокаторов и оптических средств мониторинга на рис. показывает, что допустимо как расширение зоны действия РЛС в область высоких орбит, так и применение оптических телескопов с большой апертурой для мониторинга низких орбит. Однако повышение проникающей силы оптических инструментов до уровня, достаточного для изучения пылевой составляющей, технически осуществимо, тогда как повышение эффективности РЛС ограничено дифракцией радиоволн на частицах размером порядка длины волны локатора.

Характерно, что применительно к космическому мусору и аварийным космическим аппаратам, располагающимся на орбитах выше 3000-5000 км и, особенно, геостационарной, оптическая информация практически становится единственно доступной для целей мониторинга. Следует отметить, что современные методы формирования изображений с компенсацией турбулентности атмосферы позволяют получать прямые детальные изображения космических объектов в видимой части спектра, а ИК-наблюдения резко повысили информативность, необходимую для распознавания объектов.

Общая картина исследований техногенного состояния ОКП на период начала XXI в. представлена на рис.4.11 (Багров, 1995; Логинов, Пирогова, 2000). Глубина проводимых исследований разбита на пять уровней, от эпизодических наблюдений до полного мониторинга всех техногенных и естественных объектов в ОКП.

Весьма важно, что полного мониторинга не достигает ни один из методов исследования естественного и техногенного загрязнения ОКП в отдельности.

Близким к четвертому уровню, то есть случаю достаточно систематическим исследованием, являются близкие координатные измерения параметров орбит объектов в геостационарной зоне оптическими методами и исследование фотометрических параметров искусственных космических объектов и обломков.

Периодическими исследованиями (соответствующими третьему уровню) являются радиолокационные измерения параметров орбит искусственных объектов и астероидов в ОКП и измерения положения объектов в ОКП при радиолокации в сантиметровом и миллиметровом диапазонах.

Таким образом, возможности современных наземных оптико-электронных и радиолокационных средств исследования ОКП используются не более чем на 40% и глубина исследований не достигает самого высокого уровня - полного мониторинга всех техногенных и естественных объектов в ОКП.

Исходя из этого можно предположить, что достаточно высокие потенциальные возможности оптико-электронных систем для наблюдения объектов в ОКП не означают, что их использование должно идти до исчерпания технически возможных пределов. Исследования пылевой составляющей вещества в ОКП весьма эффективны при изучении их воздействия на специальные мишени и датчики или характера эрозии поверхностей возвращаемых аппаратов. Поэтому реальным пределом геометрических размеров изучаемых дистанционными средствами объектов будет тот, который соответствует частицам, способным разрушить мишень или вызвать разрушение работающего космического аппарата. Исходя из оценки баллистического эффекта от соударения с частицей на скорости 10 км/с этому пределу соответствует характерный размер 0,1 см.

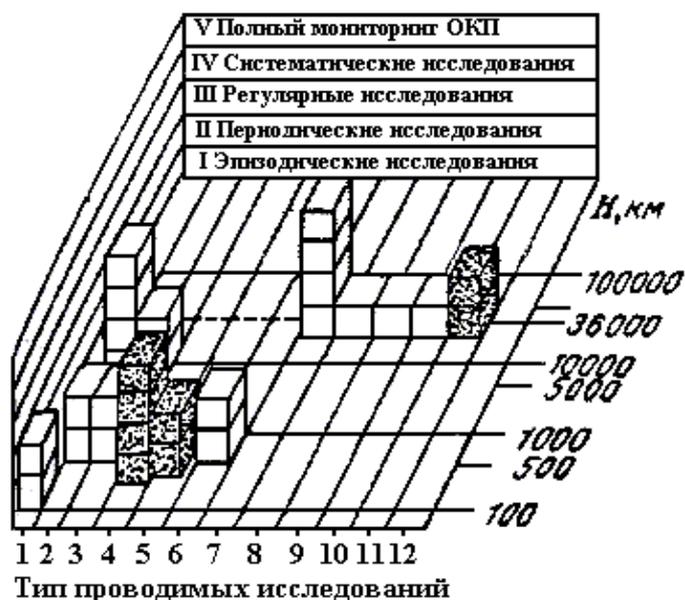


Рис. 4.11. Уровень исследований техногенного состояния ОКП с помощью наземных средств: 1-статистические методы; 2-координатные измерения параметров движения; 3-координатные измерения параметров вращения; 4-радиолокационные измерения параметров орбит в метровом и дециметровом диапазоне; 5-радиолокационные исследования в сантиметровом и миллиметровом диапазоне; 6-фотометрические методы; 7-спектральные методы; 8-поляризационные методы; 9-базисные фотометрические исследования; 10-базисная спектрометрия; 11-измерения с помощью двухпозиционных РЛС со сверхдлинными базами в международной интерферометрической сети; 12-базисная поляриметрия.

Внеатмосферный мониторинг техногенного состояния ОКП только еще начинает развиваться. Внеатмосферные телескопы значительно выигрывают в чувствительности по сравнению с наземными, особенно в ИК-области спектра, вследствие поглощения и эмиссии этого излучения парами воды молекулами CO_2 атмосфере. Кроме того, при применении космических средств обнаружения ранее неизвестных фрагментов космического мусора позволяет (Емельянов и др., 2001):

- уменьшить дальность наблюдения и, следовательно, обнаруживать фрагменты малых размеров;
- проводить контроль параметров движения техногенного мусора в любое время суток, обеспечивая непрерывность мониторинга;
- обеспечивать в связи с этим решение задачи с помощью одного космического аппарата.

В связи с этим весьма интересен проект геостационарного радиационно-охлаждаемого телескопа (Абросимов и др., 2000) на ГИСЗ «Электро» с целью мониторинга техногенного загрязнения геостационарных орбит. Этот проект позволит России сделать приоритетный вклад в решение проблемы создания системы защиты Земли.

В рамках программы развертывания российского сегмента Международной космической станции было предложено провести эксперимент НОРТ – наблюдение околоземных объектов разнесенными телескопами. Одна из задач эксперимента – обеспечение безопасности полета МКС и контроль за техногенным и естественным мусором в районе его орбиты. За каждый виток вокруг Земли телескопы НОРТ охватывают более 20-25% площади небесной сферы, поэтому приоритет получаемых данных достаточно высок (Артамонов и др., 2000).

Подобные эксперименты, имеющие характер постоянного мониторинга ОКП, в мировой практике ранее не выполнялись из космоса.

Задачу мониторинга космического мусора с размерами, меньшими 0,1-1 см решают системы контактной регистрации ударов на основе специальных датчиков. Функционирование таких датчиков основывается, по крайней мере, на четырех физических явлениях (Логинов, Пирогова, 2000).

механическое замыкание двух расположенных один над другим электродов из металлической фольги, разделенных тонкой диэлектрической прокладкой, резкое увеличение электропроводности диэлектрика под действием развивающихся при ударе высоких давлений, пьезоэффект и быстрая деполяризация электрически поляризованных сред. Из этих явлений наиболее продуктивными являются два последних, так как они позволяют создать пленочные датчики генераторного типа, в которых электрический сигнал несет информацию о параметрах удара. Датчики на основе пьезокомпозиционных материалов способны реагировать на удар частиц размерами от долей миллиметра до сантиметра при скоростях соударения нескольких десятков метров в секунду. Подобные датчики в нашей стране устанавливались на ИСЗ и орбитальных станциях «Салют» и «Мир», американских спутниках (Смирнов и др., 2001). В СССР эффективно с 1996 г. работает прибор GORID (Geostationary Impact Detector) Европейского космического агентства на Российском геостационарном спутнике «Экспресс-2» (Микиша, Рыжков, Смирнов, 2001).

Для исследования плотности потока частиц космического мусора и степени воздействия его на различные материалы в часто используют пассивные датчики. Находившийся в ОКП с 1984 по 1990 г. КА *LDEF* (*Long Duration Exposure Facility*) был со всех сторон обшит панелями из металлов и пластмасс (рис. 4.12), которые исследовались после возвращения его на Землю.



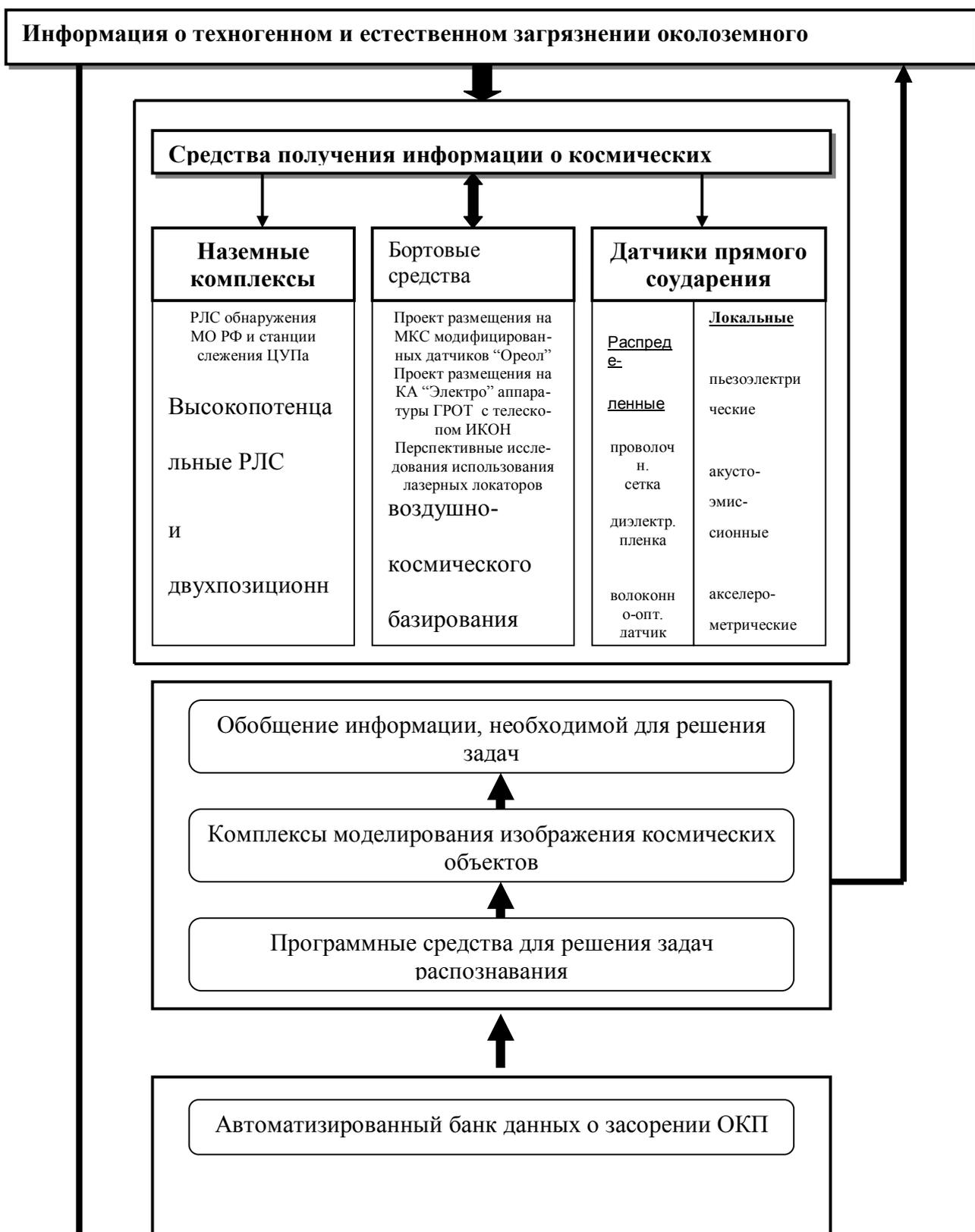
Рис. 4.12. Космический аппарат *LDEF*

При изучении воздействия космического мусора на объекты в ОКП показано, что существует принципиальная возможность использования плоских СБ для измерения параметров частиц космического мусора (Бургазов, Надирадзе, 2002). В соответствии с проведенными расчетами, скачкообразно и необратимо теряют от 0,1 до 0,5% электрической мощности при ударах частиц, имеющих скорости выше 6-7 км/с и размеры $d_k > 0,03-0,04$ см. Потоки таких частиц на низких и средних орбитах достигают уровня $1 \div 2 \text{ м}^{-2}\text{год}^{-1}$, что, при площади батарей $S=50 \text{ м}^2$, позволяет проводить измерения плотности потока частиц с точностью не хуже 30% в течении 1/4 года.

Таким образом, к началу XXI века сформировалась система мониторинга, позволяющая оценивать как физическое состояние ОКП, так и загрязненность его естественными и техногенными отходами.

На основании анализа технических возможностей различных средств контроля техногенного состояния ОКП выработана общая структурная схема осуществления техногенного мониторинга О

на современном уровне (рис. 4.13) (Логинов, Пирогова, 2000). Основными источниками информации о космических объектах, техногенном (и естественном) мусоре в ОКП, их отражательно-излучательных характеристиках являются радиолокационные, оптические, инфракрасные и лазерные средства наземного и космического базирования, а также датчики прямого соударения. Результаты исследований накапливаются и систематизируются в автоматизированном банке данных о техногенном состоянии ОКП. В качестве базовой информации используются также результаты моделирования состояния ближнего космоса и процессов в нем.



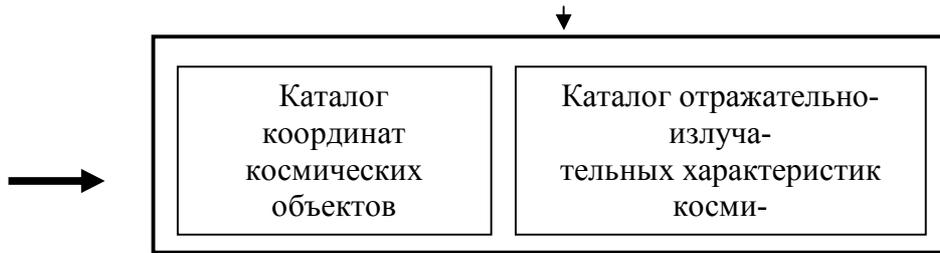


Рис. 4.13. Блок-схема организации мониторинга техногенного и естественного мусора в ОКП

Вопросы к главе IV

1. Во сколько раз отличаются чувствительности оптических телескопов с диаметрами объективов 1 и 10 м? Как выразить это в звездных величинах?
2. Искусственный спутник Земли, обращающийся по орбите высотой 500 км, выглядит в максимальном блеске как звезда 2-й величины. Каков будет максимальный блеск этого объекта, если переместить на геостационарную орбиту? Наблюдения проводятся с земного экватора.
3. В каком виде наземного мониторинга тел в ОКП нужно учитывать их собственное излучение? Какую энергию и длину волны этого излучения?
4. Какими методами и в каких диапазонах электромагнитного излучения можно изучать состояние ионосферы?
5. Для чего строят оптические и радиотелескопы как можно большего диаметра?

ГЛАВА V.

ОХРАНА И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА КАК НОВОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НИШИ ЗЕМНОЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ

5.1. Совместная эволюция биосферы и ОКП

ОКП включает в себя ряд структур, основными среди которых являются магнитосфера и озоносфера. Как известно, эти структуры определяют, главным образом, степень воздействия процессов во внешнем пространстве на биосферу и ее устойчивость: магнитосфера регулирует уровень корпускулярных потоков различного происхождения в ОКП и биосфере, озоновый слой препятствует воздействию на живые организмы ультрафиолетового излучения.

Магнитосфера в ОКП и озоновый слой на его нижней границе обязаны своим наличием существованию геомагнитного поля (ГМП) и кислорода в атмосфере. Естественно, эволюция ОКП происходила в прямой зависимости от эволюции Земли как планеты (Муртазов, 2004).

Несомненно также, что эволюция ОКП достаточно тесно связана с эволюцией целого ряда факторов внеземного происхождения: эволюцией межпланетного магнитного поля в процессе образования Солнечной системы, эволюцией плотности потоков тел метеорного происхождения проходящих через него, эволюцией потоков галактического излучения и т.д.

Проблема происхождения магнитного поля Земли до настоящего времени не может считаться окончательно решенной, хотя почти общепризнанной является гипотеза гидромагнитного динамо, основанная на признании существования жидкого внешнего ядра на глубинах 2900 – 5100 км и дифференциальном вращении ядра вследствие конвективных течений в нем. Согласно теореме Альвена о вмороженности магнитного поля в жидкую проводящую среду, величина индуцируемого поля связана со скоростью вращения внешнего ядра относительно внутреннего и вязкостью. Основное уравнение магнитной гидродинамики для МАК-волн характеризует в данном случае образование ГМП во внешнем ядре. В целом оно выражает равновесие между силами Кориолиса $2\rho(\omega\vec{v})$, градиентом давления без гидростатического ($gradP$), полем силы тяжести (g), электромагнитными силами ($i+B$) и внешними силами (F):

$$2\rho(\vec{\omega}\vec{v}) = -gradP + \vec{g} + (\vec{i} + \vec{B}) + \vec{F} \quad (5.1)$$

(здесь $\rho=10 \text{ г/см}^3$ – плотность ядра).

В ряде работ (Орленок, 2000) обосновывается вывод о том, что сила F , определяемая прецессией земной оси, вызывает различные крутящие моменты в ядре и мантии и способствует возникновению несимметричной конвекции во внешнем жидком ядре и тем самым генерирует ГМП. Другие авторы (Короновский, 1996) считают, что для «запуска» подобного процесса необходимо начальное, хотя бы очень слабое, магнитное поле, которое может генерироваться *гидромагнитным эффектом*, когда вращающееся тело намагничивается в направлении оси его вращения. В дальнейшем мелкомасштабное генерирующее поле в результате статистического усреднения дает крупномасштабное полоидальное (меридиональное) ГМП, наблюдающееся в ОКП (Жарков, 1983).

Предположение о существовании в жидком ядре объемной конвекции, контролируемой магнитными, архимедовыми и кориолисовыми силами (МАК-волны), в результате которой возникают тороидальные магнитные поля находит подтверждение в следующих чертах геомагнитного поля: а) возможность существования магнитного момента как одного, так и противоположного направления (в уравнение входят квадраты скоростей вращения Земли и конвективных движений – Трухин и др., 2005), б) близость геомагнитной оси к оси вращения (влияние кориолисовых сил), в) наличие вариаций,

являющихся отражением принципиальной неустойчивости процесса генерации поля МАК-волнами (Петрова, 1998).

Магнитное поле, наблюдаемое на поверхности Земли (полоидальное поле), не может генерироваться при симметрии конвективных движений. МАК-волны создают короткоживущую асимметрию магнитных полей и конвективных движений. Однако, механизм МАК-волн является неотъемлемой частью любого гидромагнитного динамо. Возможно, что наличие сильного магнитного поля у Земли связано именно с асимметрией строения ядра Земли. К тому же, проекция на поверхность магнитного центра лежит в той же области, что и третий (экваториальный) радиус геоида.

Таким образом, появление ГМП и его эволюция тесно связаны с появлением у Земли двухкомпонентного ядра, то есть с эволюцией самой Земли. Большинство исследователей сходятся на том, что появление наидревнейших пород земной коры произошло около 3,8 млрд. лет назад (Жарков, 1983; Сорохтин, Ушаков, 1998). С этого же времени началась плотностная дифференциация земного вещества с выделением железа и его окислов, образовавших затем земное ядро. По мере продвижения фронта дифференциации вглубь Земли, постепенно расширялась кольцевая зона дифференциации земного вещества. В.В. Орленок (2000) указывает, что внешнего ядра не существовало в течение первых 0,5-1 млрд. лет эволюции Земли. Палеомагнитные данные показывают, что дипольное магнитное поле современного типа у Земли появилось около $2,6 \cdot 10^9$ лет назад на рубеже архея и протерозоя (Сорохтин, Ушаков, 1998). Основываясь на этом можно принять, что обособление земного ядра произошло только в самом конце архея около 2,6 млрд. лет назад, хотя процесс его выделения продолжается и в настоящее время. Вместе с тем, ГМП за последние 2,0-2,5 млрд. лет, что составляет больше половины геологической истории, принципиально не изменялось (Короновский, 1996). То есть, в ГМП сформировалось в период 1-1,5 млрд. лет от образования Земли. К концу этого периода дипольный магнитный момент Земли достиг современного значения $M \approx 8 \cdot 10^{22}$ А*м² (рис. 5.1).

Рост толщины внешнего ядра должен был сопровождаться усилением конвекции и размеров конвективных ячеек, что увеличивало напряженность дипольного поля. Дальнейшее увеличение твердого ядра в будущем приведет к уменьшению внешнего жидкого ядра и, соответственно, уменьшению ГМП (Короновский, 1996).

Здесь следует учесть, что величина магнитного момента Земли в периоды переполюсовок может уменьшаться примерно на 25%. Однако, эти периоды весьма коротки по сравнению с общей хронологической шкалой, поэтому они не отображены на рисунке.

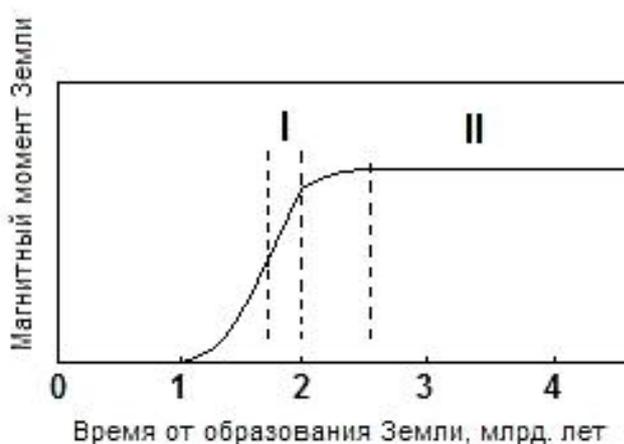
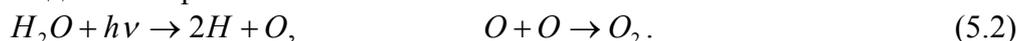


Рис. 5.1. Процесс образования ГМП: I – окончательное обособление ядра Земли; II – современная величина магнитного момента Земли

Следствием образования ГМП явилось формирование примерно 2,4-2,0 млрд. лет назад главного компонента ОКП - магнитосферы, - основного экрана, защищающего биосферу от корпускулярных потоков солнечного и часто галактического происхождения.

Параллельно происходила и эволюция атмосферы Земли. Можно привести достаточное количество моделей атмосферы на различных этапах ее существования, однако, отметим, что они едины в одном: на первичном этапе существования Земли кислород практически отсутствовал.

Многими исследователями отмечено, что большая часть свободного кислорода в атмосфере не является продуктом обезгаживания горных пород; кислород должен был бы выделяться из них в виде H_2O , CO_2 , SO_2 и т.д. но не в свободном состоянии. Отсюда можно предполагать, что свободных кислород в атмосфере является продуктом фотодиссоциации водяного пара



Однако, этот процесс является саморегулируемым, поскольку образовавшийся в ходе его O_2 поглощает часть солнечного излучения, необходимую для указанной диссоциации. Кроме того, часть O_2 быстро расходуется в ходе различных окислительных реакций. Поэтому можно полагать, что первичная атмосфера содержала менее 0,1% нынешнего количества кислорода и что последующее возрастание количества кислорода в обозримое геологическое время обусловлено процессами фотосинтеза.

Таким образом, скорее всего первый 1 млрд. лет атмосфера была восстановительной, имелись возможности для процессов абиогенного образования и накопления многих соединений (*Акасофу, Чепмен, 1974; Орленок, 2000*).

По всем данным, наиболее обильным газом являлся углекислый газ.

Согласно одной из современных моделей (*Сорохтин, Ушаков, 1998*) углекислый газ поступал в атмосферу только благодаря дегазации земной мантии. При этом скорость дегазации CO_2 была пропорциональна тектонической активности Земли и достигала своего максимума в архее. Если бы весь дегазированный углекислый газ сохранялся в атмосфере, то его парциальное давление сейчас достигало бы 90–100 атм., т.е. было таким же, как и на Венере. Однако на Земле, одновременно с поступлением CO_2 в атмосферу происходило его связывание в карбонатах.

Суммарное давление архейской атмосферы могло превышать 10 бар (рис. 5.2. - сплошные линии), а парниковый эффект повышал температуру атмосферы почти до 120°C.

В середине архея около 3,4 млрд. лет назад уже возник Мировой океан. В результате заметно усилилась гидратация существенно базальтовой океанической коры, а скорость роста парциального давления CO_2 в позднеархейской атмосфере несколько снизилась. Наиболее радикальное же падение давления углекислого газа произошло только на рубеже архея и протерозоя после выделения земного ядра и связанного с этим резкого уменьшения тектонической активности Земли. По этой причине, ко времени около 2,4 млрд. лет назад парциальное давление углекислого газа в раннепротерозойской атмосфере резко упало (примерно в 10^4 раз) до равновесного уровня, приблизительно равного 0,5 мбар, а общее давление атмосферы снизилось с 7–8 бар в самом конце архея до 1,12 бар в раннем протерозое. При этом весь процесс удаления CO_2 из атмосферы на рубеже архея и протерозоя, по-видимому, занял не более 100 – 150 млн. лет. В результате состав раннепротерозойской атмосферы стал существенно азотным (с небольшой добавкой аргона около 9,6 мбар).

Давление кислорода, по-видимому, только около 1,1 млрд. лет назад достигло уровня 1 мбар (*Акасофу, Чепмен, 1974*).

С наступлением фанерозоя и, особенно в конце палеозоя, давление земной атмосферы вновь начало подниматься за счет усиленной генерации кислорода и достигло своего относительного максимума около 400-200 млн. лет назад. По данным (*Акасофу,*

Чепмен, 1974) относительное содержание кислорода могло достигать $N=10$ (рис. 5.2 - штрих).

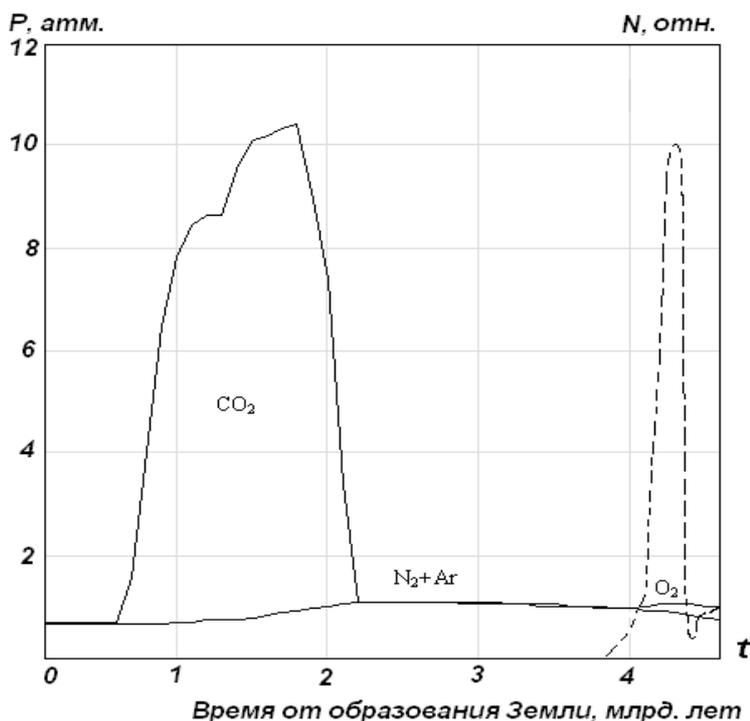


Рис. 5.2. Эволюция состава и давления P земной атмосферы в модели (Сорохтин, Ушаков, 1998) – сплошные линии, штрих - изменение концентрации N кислорода по одной из моделей (Акасофу, Чепмен, 1974; Трофимук и др., 2000)

Выделяют основные геологические периоды образования кислорода в земной атмосфере (Трофимук, Молчанов, Параев, 2000)

I. (Докембрийский)– Первичная восстановительная атмосфера. Один из основных механизмов выделения свободного кислорода – реакция фотодиссоциации водяных паров под действием ультрафиолетового излучения. II. (Кембрийский 570-505 млн. лет до современной эпохи)– содержание кислорода в атмосфере достигло 0,1% современного и стало экраном губительного для живого вещества ультрафиолета (эффект Юри). Расширяются ареалы и разнообразие водорослей. Помимо гетеротрофов с системой водородного дыхания появляются кислородопотребляющие организмы. III. (Ранне-среднеордовикский 505-438 млн. лет) – необратимость становления кислородной атмосферы. Экспансия водорослей с последующим выходом их к поверхности и соответствующим усилением фотосинтеза. Фотодиссоциация, как основной механизм пополнения атмосферы кислородом, сменяется процессами фотосинтеза. Масса генерируемого при фотосинтезе кислорода превышает его расход на окисление в литогенезе и достигает уровня 1% от современной его концентрации в атмосфере (точка Пастера). Организмы от брожения переходят к более энергетически выгодным процессам дыхания. По мере накопления кислорода в атмосфере создаются условия для образования стабильного озонового экрана и появления многочисленных форм жизни. Концентрация кислорода в атмосфере в 10% от современной (критический уровень Беркнера-Маршалла) подготовила эволюционный скачок в биосфере. IV. (Позднеордовикско-среднедевонский 438-400 млн. лет) – динамическое равновесие в производстве и потреблении кислорода. Разнообразие органической жизни, выход растений на сушу. V. (Позднедевонско-раннекаменноугольный 400-360 млн. лет) – резкое увеличение массы кислорода. Экспансия и расцвет наземной растительности и как следствие – расширение масштабов

фотосинтеза. Масса воздушного кислорода впервые достигает современной и более никогда уже не опускается ниже этого уровня. VI. (*Среднекарбон-раннеюрский 320-220 млн. лет*) – динамическое равновесие «приход-расход» кислорода. Продолжение экспансии наземной растительности. VII. (*Мезокайнозойский 180 млн. лет*) – генерация биогенного кислорода значительно превышает его расход в литогенезе. Богатая и разнообразная растительность, господство покрытосеменных с интенсивным фотосинтезом. Раскрытие Атлантики с общим ростом гидросферы и сульфатизации морских вод, потребовавшая $2500 \cdot 10^{12}$ т кислорода, компенсировали интенсивность его выделения при фотосинтезе в послепермское время. Распад Гондваны. Мощный орогенез, интенсивный вулканизм.

В среднем концентрация озона в атмосфере определяется выражением (Хргиан, 1978)

$$N_3 = \sqrt{\frac{k_2 I_2 N_2^2 N_4}{k_3 I_3}}, \quad (5.3)$$

где N_2 , N_3 , N_4 – соответственно концентрация кислорода, озона и любого вещества, молекулы которого участвуют в реакции образования озона (азот, кислород, в некоторых моделях – CO_2), $k_2 = 8 \cdot 10^{-23} \exp(450/T)$ – постоянная образования озона, $k_3 = 6 \cdot 10^{-12} \exp(-2230/T)$ – постоянная разрушения озона, I_2 – поглощенное кислородом число квантов солнечного излучения, I_3 – число квантов, дошедшее и поглощенное озоном при его разрушении, достаточно удовлетворительно описывающее форму наблюдаемого вертикального распределения озона с максимумом на высоте 22-26 км.

Соответственно, на этих высотах происходит максимальное поглощение УФ-излучения. К примеру, на длине волны 255 нм коэффициент поглощения $\alpha_\lambda = 126 \text{ см}^{-1}$.

Согласно закону Бугера поглощение света в атмосфере зависит от числа поглощающих атомов вдоль луча зрения

$$I_\lambda = I_{\lambda 0} * e^{-\alpha_\lambda l}, \quad (5.4)$$

где l – оптическая длина пути луча в атмосфере, $I_{\lambda 0}$ и I_λ – внеатмосферная и наземная интенсивности солнечного излучения, α_λ – коэффициент поглощения.

Результаты расчетов показывают, что концентрация кислорода в атмосфере в период 570-400 млн. лет возрастала практически экспоненциально (рис. 5.3). В соответствии с выражением (5.3) количество озона нарастало по такому же закону (принималось, что неравенство $I_2 N_2 \ll I_3 N_3$ выполнялось в любой период эволюции атмосферы). Поскольку коэффициент поглощения коротковолнового излучения озоном α_λ определяется логарифмом числа поглощающих частиц на пути распространения луча, то в итоге для указанного периода 570-360 млн. лет увеличение коэффициента поглощения происходило в среднем по линейному закону (Murtazov, 2005).

Можно отметить, что кислородно-углеродные (CO_2) и кислородно-азотные модели палеоатмосферы (Thomas, et al., 2005) дают несколько отличающиеся количества образующегося озона

Таким образом, нижняя граница ОКП – озоновый слой – была сформирована в период 570-360 млн. лет назад как экран, защищающий биосферу от жестких электромагнитных излучений.

Проблема эволюции ОКП весьма важна с позиций развития экологии ОКП как фундаментальной науки, а также с точки зрения всего комплекса наук о Земле.

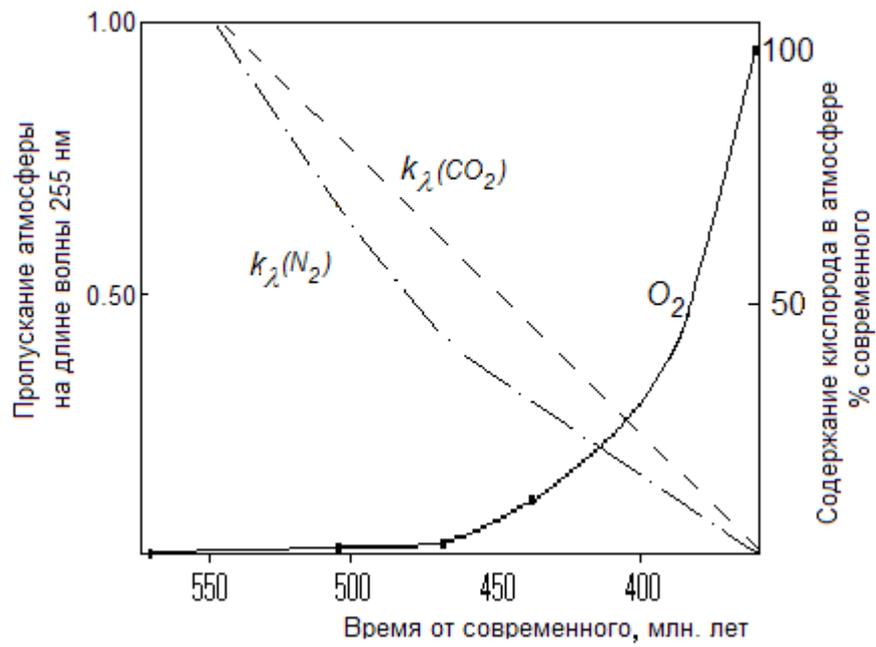


Рис. 5.3. Рост количества кислорода в палеоатмосфере (сплошная линия) и соответствующие ему изменения пропускания k_λ на длине волны $\lambda=255$ нм атмосферы для кислородно-углеродной (штрих) и кислородно-азотной (штрих-пунктир) модели

5.2. Развитие методов и средств охраны и рационального использования околоземного космического пространства в процессе его освоения

Федеральный закон «Об охране окружающей среды»

*Принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года
Одобен Советом Федерации 26 декабря 2001 года
Подписан Президентом Российской Федерации В.В. Путиным
10 января 2002 г. (N 7-ФЗ)*

Статья 4. Объекты охраны окружающей среды

1. Объектами охраны окружающей среды от загрязнения, истощения, деградации, порчи, уничтожения и иного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности являются:

земли, недра, почвы;

поверхностные и подземные воды;

леса и иная растительность, животные и другие организмы и их генетический фонд;

атмосферный воздух, озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство.

В настоящее время охрану ОКП можно определить как систему международных мероприятий (научно-технологических, правовых, экономических, просветительных) по предотвращению попадания в ОКП техногенных загрязнений (как в виде излучений различной частоты, так и разнообразного мусора), изменяющих свойства ОКП таким образом, что его воздействие на биосферу после этого наносит последней необратимый вред (Murtazov, 2003).

В конце II тысячелетия человечество, похоже, окончательно выбрало для себя стратегию освоения ОКП и экспансии в Солнечную систему.

Здесь следует отметить, что если Солнечная система будет находиться в стадии только более-менее активных исследований со стороны земной цивилизации еще достаточно долго, то резкий прорыв в технологическом освоении ОКП произойдет, видимо, уже в наступившем XXI веке.

Характерной особенностью земной цивилизации в современную эпоху является ее экстенсивное развитие по экспоненте (некоторые авторы считают, что развитие идет даже быстрее экспоненциального - (Гиндилис, 1997; Горшков, 1995; Лесков, 1996.1997). При современных темпах роста народонаселения, энергопотребления и промышленной переработки земного вещества весьма быстро достигаются пределы развития, за которыми дальнейший рост становится невозможным. Более строгие модели (Моисеев, 1988, 1996; Шкловский, 1987) показывают, что при сохранении современных тенденций развития уже до середины XXI века наступит критическая ситуация, вызванная истощением ресурсов, падением промышленного производства, резким сокращением пищи на душу населения при одновременном резком усилении загрязнения окружающей среды.

При этом человечество в своем диапазоне обитания, в своей экологической нише является бесконкурентным монополистом. Человечество как вид потребляет ничего взамен не отдавая, вследствие чего не находится в равновесии с окружающей его природой. Из-за этого оно неизбежно переживает экологические кризисы, то есть можно считать, что нынешний кризис закономерен (Черняев, 1999).

Параметры современного экологического кризиса представлены в табл. 5.1 (Лосев, 2001), хотя автор по некоторым позициям (например, причинам истощения озонового слоя и тенденций их изменения) имеет другое мнение.

Выходов для человеческого вида два:

1) деградация вида, прекращение его развития, утрата позиций монопольного положения. Весьма вероятно – полное исчезновение.

2) расширение экологической ниши, соответствующее изменение образа получения и переработки энергии, приспособление к новым условиям, сохранение возможностей развития и монопольного положения в новой нише.

Научным сообществом обсуждаются и другие возможные пути развития человечества. Крайние точки зрения сводятся к идеям «автотрофности» и «назад к природе».

Таблица 5.1

Изменения окружающей среды в конце XX века и тенденции на первую четверть XXI века

Характеристика	Тенденция в 1972-1995 гг.	Сценарий 2030 г.
Сокращение площади естественных экосистем	Сокращение со скоростью 0,5-1% на суше, к началу 90-х гг. их сохранилось ок. 37%	Сохранение тенденции, приближение к почти полной ликвидации на суше
Потребление чистой первичной биопродукции человеком	Рост потребления: 40% на суше, 25% - глобальный	Рост потребления: 80-85% на суше, 50-60% - глобальный
Изменение содержания парниковых газов в атмосфере	Рост концентрации от десятых до целых процентов ежегодно	Рост концентрации, ускорение роста концентрации углекислого газа и метана за счет ускорения разрушения биоты
Истошение озонового слоя	Истошение на 1-2% в год озонового слоя, рост площади озоновых дыр	Сохранение тенденции даже при прекращении выбросов хлорфторуглеродов
Сокращение площади лесов, особенно тропических	Сокращение со скоростью 13 млн. га в год, лесовосстановление относится к сведению леса как 1:10	Сохранение тенденции. В тропиках 9-11 млн. кв. км, сокращение площади лесов умеренного пояса
Опустынивание	Расширение площади засушливых земель, составляющих 40% суши, рост техногенного опустынивания, токсичных пустынь	Сохранение тенденции, возможен рост темпов за счет уменьшения влагооборота на суше в результате вырубki лесов и накопления поллютантов в почвах
Деградация земель	Рост эрозии (24 млрд. т ежегодно), снижение плодородия, накопление загрязнителей, засоление	Сохранение тенденции, рост эрозии и загрязнения, сокращение сельскохозяйственных земель на душу населения
Повышение уровня океана	Подъем уровня на 1-2 мм/год	Сохранение тенденции, возможно ускорение подъема уровня до 7 мм/год
Стихийные бедствия, техногенные аварии	Рост числа на 5-7%, рост ущерба на 5-10%, рост количества жертв на 6-12% в год	Сохранение и усиление тенденций
Исчезновение биологических видов	Скорость исчезновения в 100-1000 раз выше, чем когда-либо наблюдали на Земле	Усиление тенденции по мере разрушения биосферы
Качественное истощение вод суши	Рост объема сточных вод, точечных и площадных источников загрязнения, числа поллютантов и их концентрации	Сохранение и нарастание тенденций, 2 из 3 человек будут испытывать недостаток воды
Накопление поллютантов в средах и организмах, миграции в тропических цепочках	Рост массы и числа поллютантов, накопленных в средах и организмах, рост радиоактивности среды, «химические бомбы»	Сохранение тенденций и возможное их усиление
Ухудшение качества жизни, рост числа заболеваний, связанных с разрушением экологической ниши человека и загрязнением окружающей среды, в	Рост бедности, нехватка продовольствия, высокая детская смертность, высокий уровень заболеваемости, необеспечиваемость чистой питьевой водой в развивающихся странах, рост числа генетических заболеваний, рост аварийности, рост потребления лекарств,	Сохранение тенденций, рост нехватки продовольствия, рост числа заболеваний, связанных с экологическими нарушениями, в том числе генетических, расширение территории инфекционных заболеваний, появление новых болезней

том числе генетических появление новых болезней	рост аллергических заболеваний в развитых странах, пандемия СПИД, понижение иммунного статуса	
---	---	--

Таблица 5.1 (продолжение)

Глобальное распространение супертоксикантов через трофические системы	Нарушение эндокринной системы человека, ухудшающее систему воспроизводства, работу мозга и других жизненно важных органов человека	Нарастание тенденции, распространение заболеваний, связанных с эндокринной системой, рост числа бездетных пар
Искусственная интродукция и случайная инвазия чужеродных видов в экосистемы	Нарушение экосистем, перенос вредителей и болезней растений, животных и человека сокращение биоразнообразия	Нарастание процесса инвазии
Изменения в Мировом океане: разрушение рифов, сокращение мангровых экосистем, истощение запаса рыбы в результате интенсивного лова, сокращение стада китов загрязнение внутренних морей и прибрежных вод, «красные приливы»	Быстрые изменения всех характеристик	Нарастание изменений

Первая сводится к созданию целиком искусственной, независимой от состояния биосферы, цивилизации (сторонником чего был К.Э. Циолковский). При этом часть авторов представляет себе будущее человечества в этом случае возможным только при отказе от использования современной невозможной энергетики, использующей сжигание углеводородов, и поиске новых экологически чистых источников энергии, например, энергии Солнца. Это отражено в проектах искусственных автотрофных сфер обитания, независимых от биосферы: например – проект сферы Дайсона около Солнца, а также осуществленный в 1991-93 гг. проект замкнутой экологической системы «Биосфера-2».

Обращение человечества назад к природе, видимо, в настоящий момент уже невозможно: для того, чтобы жить в динамическом равновесии с природой, необходимо поддерживать численность населения Земли на уровне порядка 500 млн. человек, либо сократить потребности каждого жителя в развитых странах более чем на порядок, что в обоих случаях нереально.

Таким образом, освоение околоземного космического пространства, видимо, является на сегодняшний день основным способом выживания человека как вида, связанным с расширением его экологической ниши и занятия в ней монопольного положения.

Здесь следует отметить, что именно с выходом в околоземное пространство (и далее в Космос) часто связывается надежда на дальнейшее длительное экспоненциальное развитие цивилизации. Однако, экспоненциальный рост, будучи ничем не ограниченным, даже при весьма умеренных темпах очень быстро приведет к исчерпанию ресурсов Метагалактики (Гиндилис, 1997; Шкловский, 1987). Длительный экспоненциальный рост невозможен и по ряду других причин. Чтобы обеспечить постоянно увеличивающийся прирост массы и энергии из окружающего пространства, цивилизация должна осуществлять экспансию с постоянно возрастающей скоростью. Когда эта скорость достигнет скорости

света, экспоненциальный рост прекратится и цивилизация сможет наращивать ресурсы не быстрее, чем по закону t^3 , а затем и t^2 (здесь t - время). Но и это будет по-прежнему экстенсивное развитие. В этом случае время освоения Галактики составит всего лишь 10^6 лет, а накопленный человечеством опыт не может отрицать принципиальную невозможность такого процесса (*Шкловский, 1987*).

Большинство авторов все-таки считают, что такое экстенсивное развитие цивилизации должно рассматриваться лишь как временный этап. По окончании его цивилизация должна перейти к устойчивому интенсивному развитию, находясь в характерное для сложных систем состояние гомеостатического равновесия с тонкой регуляцией основных жизненных процессов, поддержанием жизненно важных параметров в заданных пределах (*Гиндилис, 1997; Горшков, 1995; Урсул, 1996*).

Можно сделать следующие выводы (*Школенко, 1997*):

- без обращения к космосу человечество рано или поздно остановится у пределов, установленных конечными пространственными и ресурсными параметрами Земли. Без их преодоления общество обречено на деградацию;

- крайняя ориентация на выход в космическое пространство также чревата гибелью, так как наша белковая жизнь может существовать в весьма узком диапазоне физических параметров окружающей среды;

- таким образом, необходимо осуществление геоцентрического развития космонавтики при освобождении Земли от предпосылок экологического кризиса. То есть при расширении экологической ниши человечества требуется разумное соединения «космизма» с экологизмом.

При этом нужно учесть, что одновременно должно быть сформировано общество, которое сможет обеспечить условие коэволюции человека и биосферы, способного создать на Земле ноосферу (*Моисеев, 1988, 1996; Черняев, 1999 и т.д.*).

Все эти рассуждения, а также анализ причин современного экологического кризиса, заставляют наряду с выработкой принципов интенсивного освоения ОКП выдвинуть ряд критериев, следование которым не даст возможность создать подобный кризис и в нем.

Выше, в п. 2.3. настоящей работы приведены результаты прогноза числа искусственных объектов в ОКП на период до 2003 г. (*Назаренко, Чернявский, 1995*), согласно которому количество как самих объектов, так и их осколков будет монотонно нарастать. Следует отметить, что этот прогноз полностью оправдался. Здесь же выполнен прогноз числа искусственных объектов в ОКП на период до 2023 г. в зависимости от вариантов технической политики человечества в отношении запуска космических объектов (рис. 5.1). Здесь техническая политика характеризуется отношением K числа ежегодно образующихся объектов к средней оценке за предшествующие годы.

В работе рассмотрено 4 варианта технической политики:

1) $K=1,0$ – соответствует тенденции образования новых объектов (480 объектов в год), характерной для конца 80-х гг. прошлого столетия;

2) $K=0,8$ – соответствует тенденции середины 90-х гг., когда в силу ряда причин число запусков искусственных космических объектов уменьшилось;

3) $K=0,4$ – оценка может быть реализована при уменьшении числа отделяемых технологических фрагментов, возвращения ракет и сокращения взрывов;

4) $K=0,1$ – достигается при полном исключении взрывов и резком сокращении числа запусков.

Данные, приведенные на рис. 5.4, показывают, что для всех вариантов технической политики освоения ОКП (кроме $K=0,4$) число каталогизированных объектов в космосе будет расти. Отсюда следует, что для прекращения дальнейшего роста числа объектов, грозящего человечеству большими неприятностями, необходимо уменьшить интенсивность образования новых объектов на порядок. На рисунке кружочками отмечены значения высот, на которых прогнозная и исходная плотность объектов остаются постоянными. Видно, что уменьшение интенсивности образования новых объектов приводит к уменьшению их числа

только на малых высотах. На высотах, больших 1000 км их число будет расти. Этот результат имеет принципиальное значение. Он свидетельствует о том, что для уменьшения тенденции роста числа техногенных объектов на высотах, больших 1000 км, необходимы дополнительные меры - полное исключение образования фрагментов и возвращение отслуживших срок космических аппаратов на Землю.

Кроме того, такими же (если не более быстрыми) темпами растет загрязнение ОКП как другими продуктами космической деятельности (отработанное топливо и окись алюминия, загрязнение ОКП собственной атмосферой больших КА и особенно орбитальных космических станций, электромагнитное излучение КА и т.д.), так и собственно продуктами деятельности цивилизации (электромагнитные излучения широкого диапазона частот, отходы техногенных катастроф).

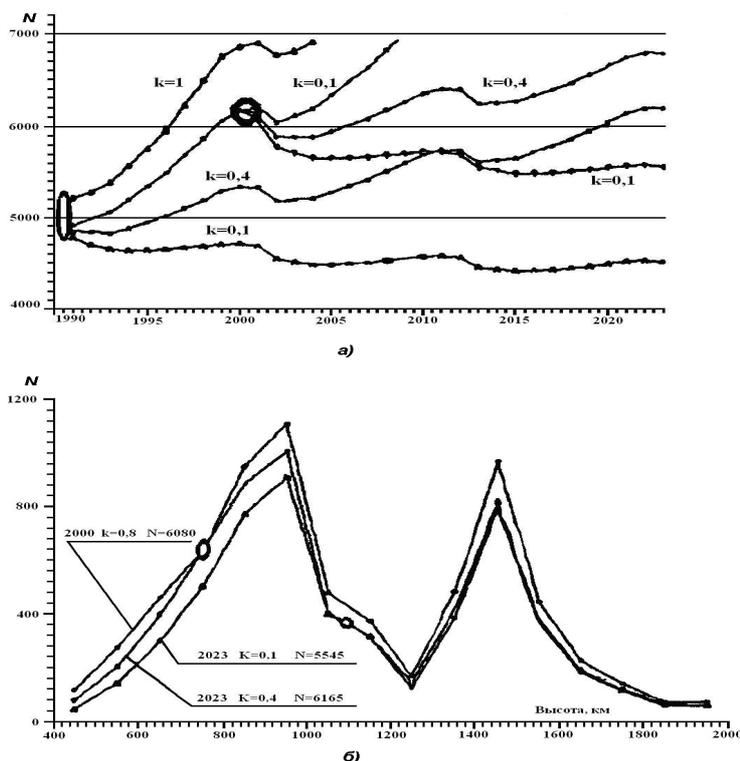


Рис. 5.4. Прогноз изменения общего числа техногенных объектов в ОКП в первой четверти XXI века (а) и их числа на LEO (б)

В связи с этим Международное сообщество уже начало вырабатывать соглашения, направленные на охрану ОКП как глобального компонента окружающей среды. Так, один из пунктов Венской декларации по исследованию и использованию космического пространства в мирных целях (ЮНИСПЕЙС-III) гласит: а) расширение научных знаний о ближнем и дальнем космосе путем развития сотрудничества в таких областях, как астрономия, космическая биология и медицина, космическая физика, изучение объектов в ОКП и исследование других планет; б) улучшение охраны среды ближнего и дальнего космоса путем углубления исследований в области применения мер по уменьшению засоренности космического пространства и практического осуществления таких мер (ООН, 1999).

В рамках разработки методов охраны ОКП необходимо найти механизм воздействия солнечной активности на околоземное пространство и через него на биосферу с целью если не управлять, то прогнозировать последствия такого воздействия. К сожалению, природа физического механизма воздействия солнечной активности на биосферу до сих пор не выяснена, поскольку попадающее в нижнюю атмосферу видимое излучение, как и полное солнечное излучение,

изменяется лишь на доли процента. Известно, что та часть солнечного излучения, которая способна влиять на геофизические процессы, поглощается в ОКП и не доходит до поверхности Земли, но эффект за счет процессов турбулентности передается в нижнюю атмосферу (*Иванов-Холодный, 2000*).

В связи с этим в настоящее время проводится постоянный контроль «космической погоды», связанной с состоянием ОКП, Солнца, условиями в солнечном ветре. Ее параметрами являются температура и концентрация компонент низкоэнергетической плазмы, магнитные и электрические поля и токи, спектральный состав электромагнитных излучений и энергетические спектры заряженных частиц различного происхождения (*Климов и др., 2000*).

Далее, к методам охраны ОКП следует отнести: работы по уменьшению воздействия электромагнитного излучения различных передатчиков, а также линий передачи электроэнергии на Земле; запрещение испытаний ядерных взрывов, предотвращение техногенных катастроф на Земле.

Весьма обширные работы по охране ОКП необходимы при эксплуатации космической техники. Это: уменьшение загрязнения ОКП и природной среды вредными продуктами сгорания ракетного топлива и его несгоревшими остатками, оптимизация объема собственной атмосферы космических аппаратов; уменьшение количества образующегося мусора при запусках космической техники; предотвращение неуправляемого падения космических аппаратов и их обломков на Землю, аварий и столкновений объектов в ОКП.

Однако можно отметить, что в документе «Основные направления космической деятельности России в 2001-2001 гг.» (Постановление Правительства РФ № 280 от 30.03.2000 г.) весьма мало говорится об охране и рациональном использовании самой среды, в которой происходит эта деятельность – ОКП. Космическая деятельность России в этой и разрабатываемой на 10 лет программах концентрируется на следующих перспективных направлениях:

- концентрация усилий на конкурентоспособных на мировом и внутреннем рынках космических проектах;
- переход к малым КА различной размерности и целевого назначения;
- применение широкой международной интеграции, в т.ч. в фундаментальных космических исследованиях и пилотируемых полетах (имеется в виду МКС);
- модернизация космической техники и наземной инфраструктуры, обеспечение их соответствия повышенным экологическим требованиям.

Реальность XXI века требует новой стратегии космической деятельности в ОКП для реализации потенциала космонавтики в целях выживания и развития цивилизации путем достижения баланса интереса человека, общества, государств, всего мирового сообщества. Автор работы (*Кричевский, 1999*), летчик-космонавт России, считает, что для радикального улучшения экологических характеристик космической деятельности человечества необходимы:

- систематические исследования и осознание исторического опыта, реальной ситуации, унаследованных проблем и тенденций развития;
- усиление правового регулирования и контроля за космической деятельностью со стороны гражданского общества с активным использованием всех демократических институтов и международного сотрудничества, с учетом опыта применения социальных технологий в других сферах деятельности;
- разработка и реализация экологической политики через систему экологического управления в соответствии со стратегией и принципами устойчивого развития.

Здесь можно перечислить основные положения, разрабатываемые мировым сообществом в отношении техногенного мусора в околоземном пространстве. Компетентные авторы отмечают, что (*Рыхлова, 1998*): 1) на сегодня ни одна страна не готова начать публичную дискуссию по поводу засоренности космоса техногенными отходами, что связано, по-видимому, с отсутствием Международного юридического законодательства по околоземному пространству (об этом свидетельствуют, например, инциденты между Казахстаном и Россией по поводу взрывов ракет «Протон» при старте в Байконуре в 1999 г.); 2) ни одна из крупнейших космических держав не имеет полноценной возможности отслеживать все объекты на околоземных орбитах, распознавать их по источникам происхождения и назначению.

Несмотря на это, должна существовать возможность экспертной оценки состояния околоземного пространства на любой момент времени, для чего требуется решить ряд задач.

Это, во-первых, задача совершенствования и создание новых средств и методов обнаружения, наблюдения и распознавания малоразмерных и слабоконтрастных объектов в околоземном пространстве (современные позволяют регистрировать объекты более 1 см в диаметре на низких и более 1 м в диаметре на геостационарных орбитах) – в том числе и космического базирования.

Далее, создание и постоянное обновление банка данных о засоренности околоземного пространства и пространственном распределении компонентов естественных и техногенных осколков. Особенно это касается фрагментов, образовавшихся в результате взрывов и разрушений на орбите.

Разработка эволюционных процессов засорения в общем виде: прогнозирование ситуации в результате проведения ранее объявленных космических программ; моделирование эволюции орбит нефункционирующих космических объектов, их отдельных фрагментов; моделирование процессов образования осколков в результате разрушений на орбите, процессов образования и динамики пылевой и газовой фракций; моделирование последствий запусков для верхней атмосферы и поверхности Земли и т.д.

Развитие техники уменьшения количества мусора при запусках и очищении околоземного пространства. Пока в этом направлении развивается технология защиты космических аппаратов от соударений с частицами естественного и техногенного происхождения (например, российский проект защиты международной космической станции путем установки на ее поверхностях специальных экранов (*Мецзяков, 2000*)).

В настоящее время околоземное пространство эксплуатируют Китай, Россия, США, Япония, Европейское и Японское космические агентства. Сюда уже возможно отнести и Индию.

Российское авиационно-космическое агентство развивает концепцию модели «причина-следствие» (*Назаренко, Чернявский, 1995; Рыхлова, 1995, 1998; Хуторовский и др., 1995; 1998*) от источников появления мусора в околоземном пространстве, через проблемы его мониторинга, до моделей очистки и международной кооперации. Российская Межгосударственная корпорация «Вымпел» и Научно-исследовательский центр «Космос» проводят работы по каталогизации наблюдаемых искусственных объектов, их идентификации с каталогами США. Создан архив опасных сближений, позволяющий прогнозировать столкновения на орбитах (*Хуторовский и др., 1995; 1998*). Институт астрономии РАН проводит как теоретические разработки методов и средств обнаружения космического мусора, так и активные наблюдения его компонентов.

НАСА проводит долговременную национальную политику по отношению к космическому мусору, тесно сотрудничая со всеми заинтересованными в этом ведомствами.

Европейское космическое агентство создало базу по космическому мусору, в основе которого лежат ведущиеся в Англии с 1957 г. списки всех запусков космических аппаратов. Кроме того, для европейской астрономии традиционны исследования космической пыли.

Японское общество аэронавтики и космических исследований создало Рабочую группу по исследованиям технической и социальной сторон проблемы космического мусора.

За последнее десятилетие прошла серия дискуссий между космическими агентствами Европы, Японии, России и США. Можно отметить резолюцию 1080 ПАСЕ «Об обнаружении астероидов и комет опасных для человечества» (1996), Международный симпозиум «Юниспейс-99» под эгидой ООН, на котором вопросы загрязнения околоземного космического пространства выделены в отдельную секцию, семинар по вопросам экологии космоса на сессии Международного сообщества в Давосе в 2000 г.

Комитет по космическому мусору в итоге обозначил 4 области совместной деятельности (Рыхлова, 1998):

- «измерения» – общая деятельность в сфере как функционирующих, так и разрабатываемых средств измерения для получения информации об объектах искусственного и естественного происхождения в околоземном космическом пространстве;
- «окружающая среда и база данных» – описание и моделирование метеорного и техногенного загрязнения околоземного космического, накопление данных и доступ к ним;
- «испытания и защита» – разработка конструкций и технологий защиты космических аппаратов от метеоритов и осколков, методов их защиты;
- «снижение засоренности» – анализ всех мероприятий, проводимых с целью снижения или предотвращения создания космического мусора, или снижения создаваемой им опасности.

Специалисты ЦНИИмаш (Алавердов, и др., 2000б) к наиболее актуальным проблемам, связанным с космическим мусором, относят следующие:

- разработка моделей засоренности ОКП;
- создание методов и средств наблюдений за космическим мусором;
- исследование проблем радиоактивного космического мусора;
- оценка состояния ОКП и обеспечение защиты космических аппаратов от космического мусора;
- разработка методов и средств снижения засоренности ОКП;
- создание системы информационного обеспечения полетов космических объектов с целью обеспечения их безопасности;
- разработка нормативных документов и обеспечение безопасности космических полетов.

При этом в качестве первоочередных задач снижения засоренности ОКП они называют:

- пассивацию отработавших ступеней ракет-носителей и космических аппаратов, остающихся на орбите, повышение надежности бортовых аккумуляторных батарей с целью предотвращения взрывов;
- сокращение сроков пассивного баллистического существования отработавших ракет-носителей на орбите, предотвращение их попадания на рабочие орбиты;
- снижение количества операционных элементов, остающихся в ОКП при выводе и эксплуатации КА.

Особое внимание уделяется безопасной эксплуатации геостационарной орбиты. Для исключения попадания разгонных блоков на рабочую орбиту предусматривается доведение КА на геостационарные орбиты с помощью бортовых двигателей. Актуально проведение работ по управляемому выводу отработавших КА с геостационарной в область орбит захоронения (выше ее более чем на 200 км), разработке технических средств перемещения крупногабаритного космического мусора с рабочей орбиты. Для избежания опасности столкновения вновь выводимых или функционирующих геостационарных КА с отработавшими Россией уже предпринимаются меры по управляемому выводу их с этой орбиты за счет остатков топлива бортовой двигательной установки (ГИСЗ «Стационар», «Экран», «Горизонт»).

Федеральная комиссия по связи США ввела новые правила для утилизации техногенного космического мусора. Все исчерпавшие ресурс американские спутники связи, запущенные после 18 марта 2002 года, должны быть переведены на 200-300 км выше геостационарной орбиты. Причем, чем тяжелее спутник, тем дальше он должен быть отведен от рабочей орбиты. Такое решение было принято на основе рекомендаций Международного Координационного комитета по космическому мусору IADC (*Inter-Agency Space Debris Coordinating Committee*), в который входят представители 11 стран, работающих на космическом рынке. И хотя это пока все вышеизложенное касается только спутников, операторы которых имеют американские лицензии, то есть имеют право предоставлять свои услуги на территории США, очевидно, что с этим правилом придется

считаться и остальным странам. Во всяком случае, целый ряд организаций добивается того, чтобы ООН приняла аналогичные стандарты по космическому мусору в мировом масштабе (www.rambler.ru. – 6.07.2004).

Ниже перечислены возможные методы очистки околоземного пространства (*Горькавый, 1993*):

1. Метод активного обнаружения и сбора обломков, то есть поиск крупных элементов техногенного или естественного происхождения и снятие их с орбиты (например, (*Рембеза, Хегай, 2000*). Однако, он весьма дорог.
2. Метод активного обнаружения и дистанционной ликвидации, в котором обломки уничтожаются пучком какого-либо излучения или ракетами системы противоракетной обороны наземного или космического базирования.
3. Метод пассивного ожидания и дистанционной ликвидации. Под этот метод попадает, например, спутник с мощным магнитным полем, выведенный на орбиту с обратным вращением и возмущающий орбиты налетающих мелких металлических частиц так, что их перигеи оказываются в плотных слоях атмосферы.
4. Пассивные методы очистки, в которые входят все проекты, предусматривающие создание крупных мишеней, при столкновении с которыми уничтожаются частицы космического мусора. Однако, необходимый их эффективный радиус достаточно велик, да и они сами становятся серьезным фактором загрязнения. Оценки, приведенные в главах 1 и 2 настоящей работы, показывают, что эффективный мусорщик должен обладать радиусом действия в 100 км на низкой и до 3000 км на геостационарной орбите, что находится далеко за пределами современных технологий.

Загрязнение биосферы продуктами работы ракетных двигателей, остатками конструкций ракет к началу XXI века превратилось в весьма актуальную проблему, связанную не только с экологическими проблемами, но и вопросами международного права. Так, например, площадь загрязнения Алтайского края остатками ракетного топлива превысила 250 км², общий вес упавшего после запусков ракет мусора – 2 тысячи тонн, широко распространен феномен «желтых детей» (*Кричевский, 1999*).

Следует отметить, что в России уже с 1996 г. при выведении КА отменен сброс двигательных установок систем обеспечения запуска с одновременной полной выработкой топлива, что исключает как загрязнение среды его остатками, так и предотвращает взрывы разгонных блоков. Длительный период, начиная с эксплуатации ОКС «Салют», после выполнения операций по доставке грузов на орбиту осуществляется управляемое затопление грузовых кораблей «Прогресс». Крупнейшая операция по спуску с орбиты орбитальной станции «Мир» массой 130 тонн проведена Россией весной 2001 г.

В настоящее время в качестве основных базовых ракет-носителей, входящих в российскую систему средств выведения космических аппаратов на орбиту, являются модернизируемые «Союз-2» и «Протон М». С целью снижения накопления на орбитах последних ступеней проводится отработка пассивной системы торможения («Союз-2»), применение которой сокращает в 5-6 раз время их баллистического существования и позволяет практически исключить накопление последних ступеней на орбите. При функционировании разгонного блока, которым оснащены ракеты «Протон» и «Зенит» (проект «Морской старт»), предусматривается дренирование остатков топлива, что резко снижает загрязнение верхней атмосферы и ионосферы. На вспомогательных двигательных установках модернизируемых российских разгонных блоков высокотоксичные компоненты топлива заменены на основные компоненты топлива двигательных установок (*Алавердов и др., 2000б*). Следует отметить, что Россия впервые создала активный разгонный блок «Байкал», который возвращается на стартовую позицию после осуществления своей миссии, практически не загрязняя ионосферу, в очень малой степени загрязняя биосферу и практически не оказывая влияния на ОКП.

Проводимые в России работы по снижению уровня техногенного загрязнения ОКП позволили подготовить в 1998 г. проект отраслевого стандарта «Общие требования к

космическим средствам (КС) по ограничению техногенного засорения космического пространства» (Алавердов и др., 2000б).

Общая схема мероприятий по охране ОКП при осуществлении космической деятельности представлена на рис. 5.5 (Муртазов, 2001б),

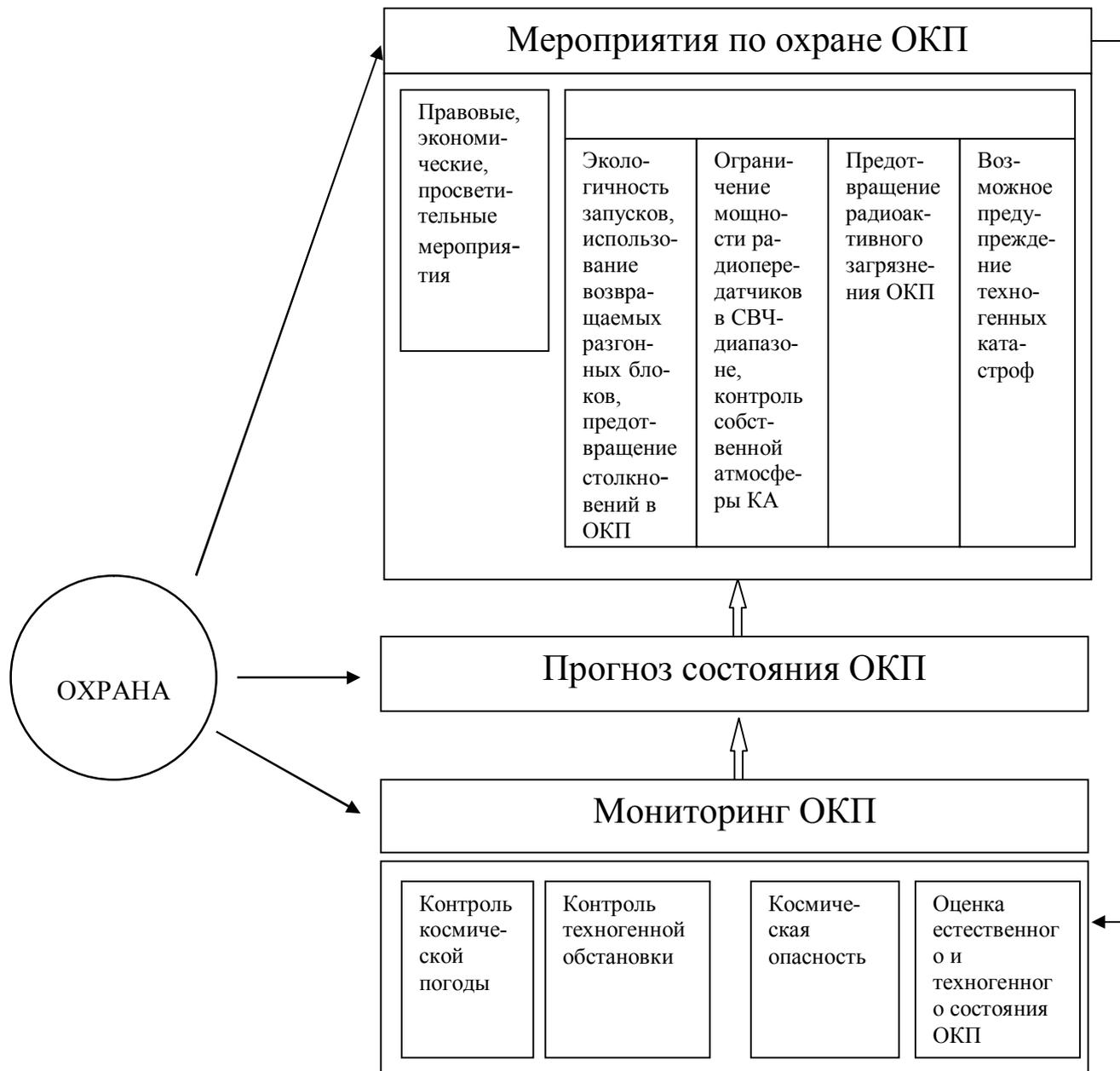


Рис. 5.5. Общая схема мероприятий по охране ОКП при осуществлении космической деятельности

5.3. Современные методы и средства предотвращения «космической опасности» для человечества

Кроме всего прочего, в настоящее время у человечества есть возможности начать исследования и разработки того аспекта проблемы космической опасности для Земли, к которому не удавалось ранее подойти ни с научной, ни с технологической точки зрения. Развитие астрономии и астрофизики, достижения ракетно-космического комплекса, средств навигации, связи, управления, наработки в области использования атомной энергии – весь этот комплекс достижений позволяет на совершенно реальном научном и технологическом уровне ставить, обсуждать и обосновывать возможности предотвращения катастрофических столкновений Земли с небесными телами (*Боярчук, 1999; Алавердов и др., 2000а,б*).

При этом первоочередной задачей является перевод этих событий из класса непредсказуемых в класс предсказуемых и предвычисляемых. Это может создать научно-техническую базу для построения соответствующей системы противодействия. Естественно, что при этом надо осознать необходимость определенных научно-технических мероприятий - от организации мониторинга различных небесных тел, приближающихся к Земле (астероиды, кометы, метеороиды), до осуществления контроля за динамическим и физическим состоянием Солнечной системы в целом.

Таким образом, разработку и создание системы защиты Земли от опасных космических объектов можно считать закономерным этапом развития цивилизации. Основным назначением системы защиты Земли от небесных тел, которые обязательно упадут на Землю, является их заблаговременное обнаружение, и в дальнейшем разрушение или отклонение от опасных траекторий.

В соответствии с этими задачами, система защиты Земли должна включать наземно-космическую службу обнаружения, наземный комплекс управления и космическую службу перехвата. Все эти службы должны обеспечить возможность обнаружения объектов, представляющих опасность, и определения траектории их движения, прогноз предполагаемого места падения на Землю и выдачу необходимой информации для службы перехвата. Наземный комплекс управления, обработав информацию, должен выдавать рекомендации для службы чрезвычайных ситуаций (*Зайцев А.В., 2000*).

Система защиты Земли должна обеспечивать перехват как тех небесных тел, падение которых на основании регулярных наблюдений можно спрогнозировать за многие месяцы или даже годы вперед, так и тех, которые будут обнаружены за несколько суток или часов до столкновения с Землей.

Большое внимание должно быть уделено созданию службы перехвата небесных тел относительно небольших размеров, полная каталогизация которых, а значит и прогнозирование, практически невозможны на современном уровне развития техники.

В РФ исследования, связанные с различными аспектами астероидной опасности, ведутся во многих отраслевых институтах и предприятиях и в настоящее время назрела необходимость согласованного подхода к решению проблем прогноза и противодействия астероидно-метеорной опасности.

С этой целью в 2006 г. была создана Экспертная рабочая группа Совета РАН по космосу по проблеме астероидно-кометной опасности. Проблематика работы этой группы весьма обширна: разработка системы приоритетов, этапов и предложений по развитию работ в области астероидно-кометной опасности; создание информационной системы по проблеме астероидно-кометной опасности; разработка технического задания на Российскую систему обнаружения и слежения за опасными космическими объектами естественного происхождения; участие в проработке предложений по

специализированным космическим миссиям к малым телам Солнечной системы; организация проведения комплекса исследований по моделированию элементов противодействия потенциально опасному объекту 2004 MN4 (99942) Апофис (сближения с Землёй в 2029 и 2036 гг.); координация деятельности инициативных групп в институтах РАН, высших учебных заведениях и других организациях, ведущих работы по проблеме астероидно-кометной опасности.

Для того, чтобы сообщить общественности о риске, связанном с приближением астероида или кометы к Земле разработана так называемая Туринская шкала (*Binzel, 2000*), которая в июле 1999 г. была утверждена Международным Астрономическим Союзом. Эта шкала в некотором смысле подобна широко используемой в сейсмологии шкале Рихтера, которая охватывает все события, от самых легких и безопасных до катастрофических и при этом доступной пониманию человека с улицы. К разработке этой шкалы кроме астрономов были привлечены также социологи (специалисты по общественной психологии) и журналисты - популяризаторы науки, пишущие для солидных журналов и газет.

Угроза со стороны любого тела в Туринской шкале оценивается целыми числами от 0 до 10, где ноль означает отсутствие какой-либо угрозы, а 10 соответствует несомненной глобальной катастрофе. В основу построения шкалы положен учет двух основных факторов, определяющих оценку угрозы: вероятности столкновения и его кинетической энергии. Эти два фактора являются двумя измерениями, в пространстве которых производится оценка угрозы (рис.5.6 – *Железнов, 2004*). При этом кинетическая энергия столкновения, выраженная в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента, меняется в пределах от 1 до 10^8 Мт. Нижний предел соответствует телам около 20 м в диаметре. Как правило, меньшие по размеру тела полностью разрушаются в атмосфере и не представляют угрозы для обитателей Земли. Поэтому все события с меньшей энергией получают по Туринской шкале оценку 0. По горизонтальной оси отложены вероятности столкновения в пределах от 10^{-8} до 1. События, имеющие вероятность, меньшую чем 10^{-8} , также рассматриваются как не представляющие реальной угрозы вне зависимости от сопутствующей им энергии и потому получают по Туринской шкале оценку 0.

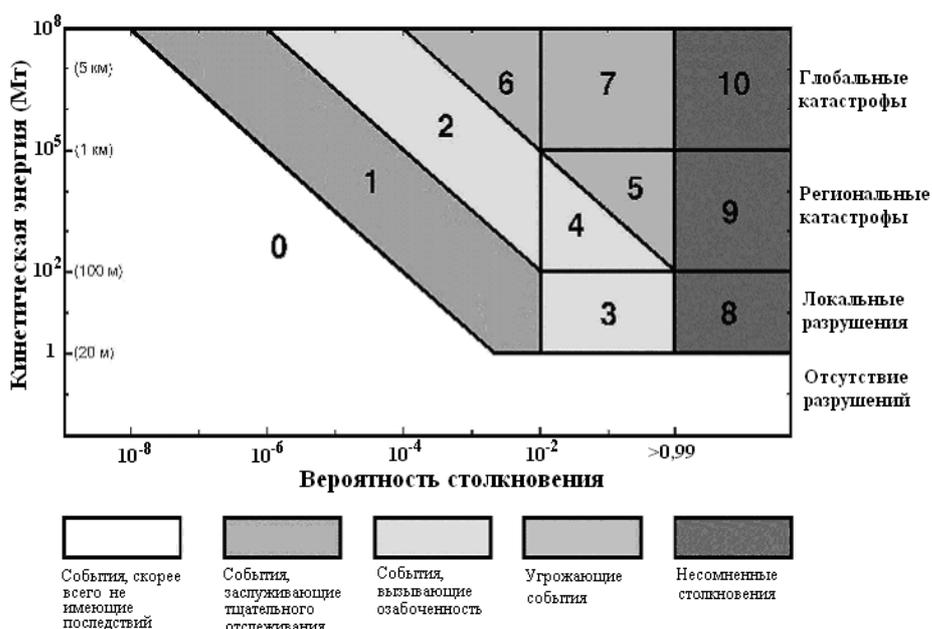


Рис. 5.6. Туринская шкала

Как это часто бывает, Туринская шкала стала источником страхов для массовой аудитории. В связи с этим (*Morrison, et al., 2004*) астероиды из групп «2-4», первоначально определявшиеся как вызывающие озабоченность (рис. 5.6), теперь определяются как «заслуживающие внимания астрономов». Кроме того, в новой расшифровке шкалы особое внимание публики привлекается к тому, что продолжительное наблюдение за вновь обнаруженным астероидом, как правило, приводит к постепенному снижению его статуса. Так, астероиду 2004 MN4 Arophis в 2004 г. был присвоен статус «4», поскольку в соответствии с предварительно рассчитанной траекторией его движения предполагалось, что в 2029 году астероид столкнется с Землей. Тогда вероятность этого события составляла 2%, однако с течением времени при уточнении его орбиты статус астероида был понижен до нулевого, поскольку вероятность столкновения также вплотную приблизилась к нулю.

Чтобы распределить по категориям и по порядку значимости потенциальные ударные риски, охватывающие широкий спектр времени, энергий и вероятностей ударов опасных объектов, была разработана техническая шкала ударной опасности Палермо (*Chesley et al. 2002*), причем эта система должна обеспечивать непрерывность и сглаженность оценки в любом диапазоне вне зависимости от диапазона энергии, вероятности и времени до столкновения.

При разработке данной шкалы было введено понятие «нормализованного риска» R . Нормализованный риск - это вероятность столкновения тела с Землей, взвешенная по отношению к вероятности столкновения с Землей тел такой же самой или большей энергии за время, оставшееся до предполагаемого столкновения. Тогда Палермская техническая шкала для оценки угрозы столкновения тел с Землей определится как

$$PS = \lg\left(\frac{R}{f * DT}\right), \quad (5.5)$$

где DT – время до потенциального ударного события (годы); f – годовая фоновая частота ударов с энергией E (Мт)

$$f = 0.03 * E^{-\frac{4}{5}}. \quad (5.6)$$

Чем отличаются две эти шкалы?

Фактические величины Туринской шкалы до -2 отражают события, для которых нет возможных последствий, в то время как по шкале Палермо величины между -2 и 0 указывают на ситуации, которые заслуживают тщательного мониторинга. Потенциальные удары с положительными величинами по шкале Палермо обычно будут указывать на ситуации, которые заслуживают некоторого внимания.

Шкала Палермо сопоставляет возможность выявленного потенциального удара со средним риском, представленным объектом того же размера или больше за все годы до времени потенциального удара. Данный средний риск от случайных ударов известен как *фоновый риск*. Для удобства шкала имеет форму логарифма, так что, например, величина -2 по шкале Палермо указывает, что выявленное потенциальное событие удара только на 1 % возможно как случайное фоновое событие, имеющее место в происходящие годы, нулевая величина указывает, что единичное событие несет такую же угрозу, как фоновая опасность, а величина +2 указывает на событие, возможность которого в 100 раз выше, чем фоновый удар со стороны объекта, по крайней мере, такого же по размеру, случившегося раньше времени потенциального удара, рассматриваемого нами.

Шкала Палермо используется специалистами в этой области для того, чтобы более подробно количественно определить уровень значимости, гарантированный для будущей возможности потенциального удара. Огромная полезность шкалы Палермо заложена в ее способности тщательно оценивать риск, представляемый менее угрожающими нулевыми событиями по Туринской шкале, которые составляют почти все потенциальные удары, выявленные до сих пор. Порядок значимости объектов определяется в соответствии с величинами по шкале Палермо для оценки той степени, до которой им следует уделять внимание (напр., наблюдения и анализ). Данная шкала непрерывна (допускаются как положительные, так и отрицательные величины) и объединяет время между нынешней эпохой и предсказанной энергией удара, а также и предсказанной энергией удара объекта и возможности его происхождения.

Оценивая так называемый уровень фоновой опасности ударов о Землю, определяется величина угрозы от всей массы астероидов и комет, среднее количество которых вычислено за долгий период времени. Так как малых астероидов в космосе гораздо больше по количеству, чем больших, степень фоновых ударов будет зависеть от размера околоземного астероида. Фоновый уровень можно считать обычным положением дел, и поэтому, когда приближение к Земле околоземного астероида превышает фоновый уровень (тогда величина по шкале Палермо выше 0), понятно, что данное событие необычно и, следовательно, имеет некоторую значимость.

Предложено много различных вариантов системы защиты Земли от астероидно-кометной опасности. Большинство из них находятся на грани возможностей существующих технологий, а некоторые фантастичны. Выбор конкретной схемы отражения опасности зависит от размеров космического объекта, его состава и времени упреждения, начиная с момента обнаружения до столкновения с Землей. Чаще всего обсуждаются следующие принципы отражения космической опасности (*Боярчук, 1999*):

- уничтожение опасного космического объекта;
- отклонение его с орбиты соударения с Землей;
- экранирование Земли от столкновения с опасным объектом;
- дистанционное воздействие на опасный объект для его отклонения, торможения и разрушения;
- использование неизвестных в настоящее время технологий.

Способы воздействия на опасные космические тела представлены в табл. 5.2 (*Медведев и др., 1996*).

Таблица 5.2

Способы воздействия на объекты, сближающиеся с Землей

Тип воздействия	Длительность воздействия	Тип средств	Средства
Отклонение ОСЗ от траектории столкновения	Кратковременное (ударное, импульсное)	Неядерные	Кинетическая энергия КА, ДБТ или ОСЗ
		Ядерные	ВТВ, ПТВ
	Долговременное	Пассивные	Солнечный парус, фокусирующее зеркало, изменение альбеда
		Активные	ДМТ на ОСЗ, СВЧ-излучение, лазеры
Разрушение объекта	Кратковременное (ударное)	Неядерные	Кинетическая энергия КА, поток высокоскоростных частиц
		Ядерные	ВТВ, ПТВ, ГТВ

Здесь: ОСЗ– объекты, сближающиеся с Землей; ВТВ, ПТВ, ГТВ– высотный, поверхностный, глубинный термоядерный взрыв; КА– космический аппарат; ДБТ, ДМТ – двигатель большой, малой тяги.

Применение тех или иных методов противодействия космической опасности определяется в основном временем, которое имеется для проведения всей операции, то есть отрезком времени между принятием решения о противодействии и расчетным временем столкновения опасного объекта с Землей. По этому критерию выделяются несколько временных этапов, различающиеся между собой выбором технических средств противодействия и характеристиками самого опасного объекта:

- 1) $t < 1$ часа. Это соответствует расстояниям от Земли в несколько десятков тысяч км при скоростях объекта 20 км/с и выше. На этом этапе наиболее целесообразным является воздействие на объект дистанционным методом, с целью его полного уничтожения или фрагментации.
- 2) $1 \text{ час} < t < 1$ суток. На этом этапе также необходимо полное уничтожение или фрагментация объекта. Это может быть достигнуто как применением дистанционного метода, так и разрушением опасного объекта с помощью ядерного заряда, установленного на ракете-перехватчике. При малых размерах объекта возможно его разрушение и кинетическим ударом самой ракеты.
- 3) $1 \text{ сутки} < t < 40$ суток. На этом этапе целесообразно использование ракетных средств противодействия для разрушения объекта. Ракеты-перехватчики могут располагаться как на поверхности Земли, так и на околоземной орбите.
- 4) $40 \text{ суток} < t < 1$ год. При таком времени упреждения возможно не только разрушение опасного объекта, но и его отклонение с траектории столкновения с Землей одним из описанных выше методов.
- 5) $t > 1$ год. В этом случае возможно осуществление плавного, управляемого изменения орбиты опасного космического тела. Здесь наиболее предпочтительным является метод отклонения.

К настоящему времени рассмотрена структура системы защиты Земли на основе ракетных комплексов класса наземного базирования и средств космического базирования на основе ядерно-электрического энергодвигательного блока. В нескольких организациях России проведены расчеты технических характеристик следующих систем: радиолокатора наземного базирования для обнаружения опасного космического объекта на расстояниях порядка 1 а.е.; систем радиолокационных станций космического базирования; систем перехвата и отклонения опасного космического объекта ядерным взрывом (Семенов и др., 2000).

Наиболее известной в нашей стране является система планетарной защиты «Цитадель» (Зайцев А.В., 2000). Автор концепции выделяет следующие важнейшие принципы, на которых должна строиться СПЗ. Основу СПЗ должен составлять постоянно действующий эшелон краткосрочного (оперативного) реагирования и служба глобального контроля космического пространства. Служба контроля космического пространства должна включать наземные и космические средства, объединенные в единую глобальную международную сеть. Служба перехвата ОНТ должна иметь наземное базирование и включать в свой состав несколько региональных сегментов, создаваемых на базе ракетно-космических и ядерных средств России, США и ряда других стран. Отработка средств СПЗ должна комплексироваться с выполнением различных научных и технических программ, и, в первую очередь, космических и оборонных. На период до создания СПЗ, должен быть разработан план экстренного реагирования на случай возникновения космической угрозы, базирующийся, главным образом, на использовании существующих

систем боевого назначения (СККП, ПРО, ПВО, РВСН и т. п.). Исходя из предъявляемых требований и принципов построения, СПЗ должна включать в себя два эшелона: Эшелон краткосрочного реагирования ЭКР (рис. 5.7). Эшелон долгосрочного реагирования ЭДР (рис. 5.8). В состав ЭКР должны входить: международная наземно-космическая служба наблюдения околоземного космического пространства (НКСН ОКП); всемирная сеть астрономических, радиолокационных и космических средств наблюдения (подключается при обнаружении ОНТ); национальные (региональные) наземно-космические службы разведки и перехвата (НКСР и НКСП); национальные (региональные) Центры планетарной защиты (ЦПЗ). В состав ЭДР должны входить: международная наземно-космическая служба глобального контроля космического пространства (НКС ГККП); средства ЭКР. Международная НКС ГККП предназначена для контроля космического пространства с целью обнаружения крупных астероидов и комет за несколько лет до их подлета к Земле. Задачи всех остальных компонентов ЭДР соответствуют задачам ЭКР. Отличие будет заключаться в том, что организация перехвата ОНТ будет осуществляться усилиями всех ракетно-космических и ядерных стран.

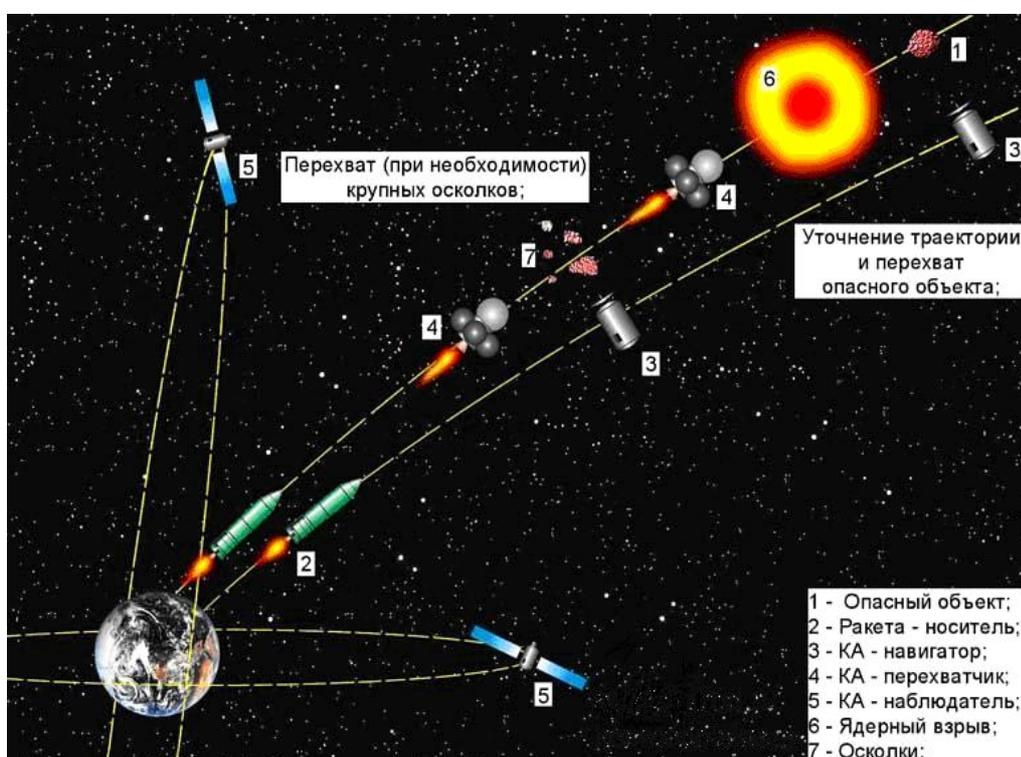


Рис. 5.7. Эшелон краткосрочного реагирования для перехвата опасного объекта вблизи Земли

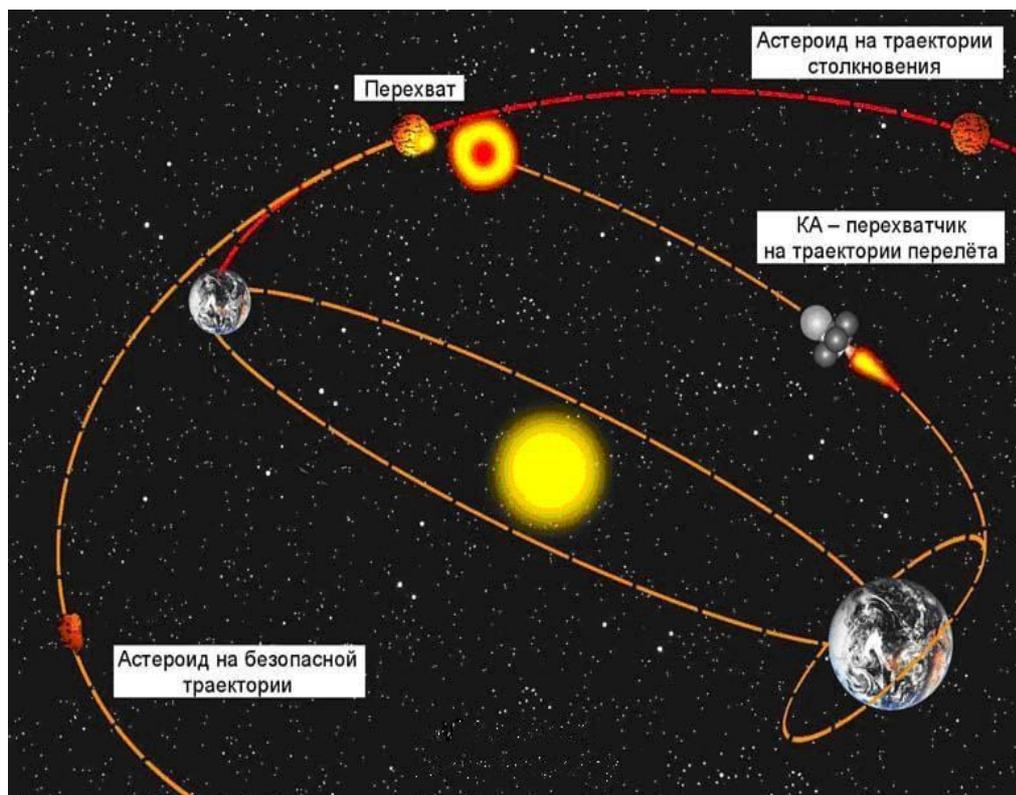


Рис. 5.8. Эшелон долгосрочного реагирования, включающий как уничтожение опасного объекта, так и заблаговременное изменение его орбиты

Оценки энергии взрыва, необходимой для разрушения опасного объекта, приведены в ряде работ (Румынский, Сазонов, 2000). Согласно им, при взрыве, происшедшем на поверхности тела или внутри него, материал снаряда и часть материала опасного небесного тела частично или полностью испаряются и по последнему распространяется ударная волна. Полная энергия E_0 взрыва, необходимая для разрушения опасного объекта, определяется выражением (Ивашкин, Чернов, 2000; Румынский, Сазонов, 2000)

$$E_0 \chi = 4\pi \frac{n+1}{n-1} \eta r_k^3 \rho_0 u_p^2, \quad (5.7)$$

где u_p – характеризует скорость газа за фронтом волны,
 r_k – расстояние от эпицентра взрыва, на котором прекращается разрушение материала объекта,

n – показатель политропы расширяющегося газа,

ρ_0 – начальная плотность вещества опасного объекта,

χ – множитель, характеризующий ту часть энергии, которая переходит в распространяющуюся внутри объекта ударную волну (для железных метеоритов принимался равным 0,30, каменных метеоритов 0,35, ядер комет – 0,4),

η – множитель, зависящий от показателя политропы.

Энергия разрушения железных и каменных метеороидов может составлять до $\varepsilon_p = 10^5$ Дж/кг, что достаточно для мелкого дробления среды. Для кометных ледяных ядер эта величина по крайней мере в три раза меньше. Она и является порогом разрушения опасных космических объектов: энергия ударной волны, распространяющаяся в веществе опасного объекта, даже на расстоянии r_k от эпицентра взрыва, равном эффективному диаметру объекта D_0 не должна быть меньше ε_p , то есть

$$E(r_k) = \varepsilon_p = \frac{u_p^2}{2}. \quad (5.8)$$

Величина энергии взрыва тогда определится как

$$E_0 = 4\pi \frac{n+1}{n-1} * \frac{\eta}{\chi} * \rho_0 u_p^2 D^3. \quad (5.9)$$

Это выражение относится к взрыву неподвижного объекта. В рассматриваемом случае следует учитывать также кинетическую энергию ракеты, переносящей заряд

$$E_1 = \frac{Mv^2}{2\chi}, \quad (5.10)$$

где v – скорость соударения ракеты полной массы M с опасным объектом.

Общая энергия, передаваемая опасному космическому объекту при ударе и взрыве, будет тогда являться суммой энергий этих процессов

$$E = E_0 + E_1. \quad (5.11)$$

Оценки, сделанные для величин скорости и энергии заряда, необходимые для разрушения опасных космических объектов (*Румынский, Сазонов, 2000*), показывают, что человечество в состоянии уничтожать небольшие тела, угрожающие Земле. Так, для того, чтобы разрушить железный метеорит диаметром 10 м, требуется ракета массой 6 т без заряда, соударяющаяся с ним со скоростью порядка 100 км/с. Для разрушения каменного метеорита эта скорость составляет 60 км/с, причем ее достаточно для полного испарения ледяной мини-кометы диаметром 60 м.

Рассчитанные величины зарядов (как ядерных, так и обычных) достаточны для полного разрушения (испарения) опасных небесных объектов без образования фрагментов, хотя расчеты разных авторов достаточно разбросаны.

К настоящему времени имеются достаточно подробные исследования характеристик ударно-кинетических воздействий на опасные тела, термоядерных воздействий, воздействий на ядра комет с целью изменения их пылевой мантии и, соответственно, сублимационной активности (*Ивашкин, 2001*).

Первый эксперимент по бомбардировке кометного ядра состоялся 4 июля 2005 г., когда 370 килограммовый ударник, выпущенный с КА *Deep Impact* на скорости порядка 10 км/с врезался в ядро кометы *Tempel-1*. После взрыва мощностью 4,5 тонн в тротиловом эквиваленте на поверхности ядра образовался кратер диаметром около 200 м и глубиной до 50 м. Однако, такой энергии явно недостаточно, чтобы заметно изменить орбиту опасного космического тела.

Европейское Космическое Агентство ведет перспективные разработки для минимизации вероятности столкновения с Землей опасных астероидов. Одной из таких разработок является новая космическая миссия, которая получила название *Don Quijote* (Дон Кихот). В 2011 году космический корабль «Идальго» с тяжелым зондом на борту будет запущен в сторону небольшого астероида. После того, как аппарат достигнет цели, он выпустит зонд-болванку, чтобы отследить последствия столкновения его с астероидом. Оставшийся на орбите вокруг астероида космический корабль «Санчо» будет изучать изменение орбиты малой планеты от удара. В зависимости от результатов миссии, угроза должна быть объявлена устраненной или должен быть отправлен новый перехватчик «Идальго» (www.spacenews.ru. – 03. 04. 2006).

Резкого уменьшения астероидной опасности можно достичь, используя в качестве ударника элементы техногенного мусора, общая масса которого к 2010 г. может достигь в ОКП $\sim 10\text{-}12 \cdot 10^3$ т (*Симонов, 2000*). При складировании значительной части крупных отходов можно в течение 5-10 лет сосредоточить эшелоны масс по $\sim 10^3$ т на нескольких безопасных орбитах. Это более надежный и контролируемый способ избежания катастрофического нарастания количества мелких отходов в ОКП, хотя и более дорогой. Следует учесть также возможность утилизации отходов в будущем в качестве рабочего

тела в космических двигателях, строительного материала и т.д. Существенный выигрыш ожидается при использовании техногенного мусора как ударника с целью уменьшения астероидно-кометной опасности, так как перевод со штатной на безопасную орбиту значительно более экономически выгоден, чем старт с Земли. Расчеты автора показывают, что при массе ударника до 10^3 т, скорости соударения 50-70 км/с можно разрушать астероиды размерами <3 км. Автор считает, что такой метод является экологически чистым и сравнительно экономичным, при реализации которого одновременно решаются проблемы устранения техногенного мусора в ОКП и разрушения сплошных каменных астероидов диаметрами до 3 км.

Однако, при достаточно больших размерах опасных астероидов и ядер комет, последние могут раздробиться на отдельные сравнительно крупные фрагменты, а действие образовавшихся осколков на Землю может оказаться более катастрофичным, чем действие первоначального неразрушенного объекта.

Весьма широко в современной литературе обсуждаются вопросы, связанные с долгосрочным воздействием на орбиты опасных в будущем объектов изменением величины давления на них солнечного излучения, а также ротационными и сублимационными эффектами (*Боярчук, 1999; Поляхова, 2000; Сазонов, 2000*).

Использование силы светового давления на элементы орбит опасных астероидов является, помимо своей оригинальности, экологически чистым способом воздействия на небесное тело. Очевидно, что для астероидов эта сила мала вследствие низкого альбедо и значительных масс. Для ее увеличения необходимо искусственным образом увеличить альбедо, после чего можно прогнозировать, что сила светового давления сможет оказать медленное корректирующее действие на небольшие астероиды (метеороиды) на временах порядка нескольких лет. Здесь уместны два конструктивных решения (*Поляхова, 2000*): 1) «ударное» увеличение парусности астероида путем швартовки к нему космического аппарата с незатеняемым мощным солнечным парусом; 2) «ударное» увеличение альбедо астероида до значения, близкого к единице (окрашивание, обертывание зеркальной пленкой и т.д.). Метод 1 является методом «быстрой» активной коррекции, использующей силу тяги солнечного паруса, метод 2 является методом более медленной, пассивной коррекции. Например, для астероида радиусом 5 м, снабженным парусом размерами 600X600 м, отклонение от Земли на 10^6 км можно обеспечить за один год (быстрая коррекция).

Ротационные эффекты связаны с анизотропностью переизлучения солнечной радиации поверхностью астероида за счет нерегулярности его альбедо: 1) динамические эффекты термической инерции вращающегося астероида, то есть перемещения тепловой волны от освещенной к теневой стороне (эффект Ярковского); 2) влияние нерегулярности альбедо на скорость осевой раскрутки астероида (эффект Радзиевского); 3) зависимость фактора нерегулярности альбедо от направления осевого вращения астероида по отношению к орбитальному движению вокруг Солнца. Для усиления подобных эффектов имеется достаточно много предложений о покраске или термообработке поверхностей опасных астероидов (*Peplow, 2005*).

Для изменения орбит комет предлагается также так называемый сублимационный эффект, состоящий в сублимации кометных льдов под действием солнечной радиации. Инициирование сублимационного воздействия предлагается осуществлять искусственным сбросом тонкой пылевой оболочки ядра кометы. Данный способ базируется на принудительном сбросе пылевой оболочки ядра кометы в определенный момент времени, в результате чего повышается кометная активность и появляется реактивная тяга, обуславливающая целенаправленное изменение первоначальной орбиты кометы. Из-за достаточно рыхлой структуры ядра для создания сублимационных эффектов не требуется большой энергии, поэтому они могут быть осуществлены современными средствами. Есть проекты ряда таких способов: а) ядерный взрыв вблизи кометы; б) воздействие на поверхность ядра кометы потоком высокоскоростных частиц; в) сброс пылевой оболочки

после действий по первым двум пунктам; г) использование солнечной радиации (Сазонов, Дмитриев, 1998; Сазонов, 2000б).

Одним из последних предложений является зарегистрированный проект *Gravity Tractor*, состоящий в увеличении массы 320-м астероида 99942 *Apophis* (опасное прохождение на расстоянии 30 тыс. км от Земли в 2029 г.) путем пристыковки к нему космического аппарата. Расчеты показали, что для изменения орбиты подобного астероида и заметного снижения уровня его опасности космический корабль весом в 20 тонн должен будет висеть в 50 метрах от него в течение года (Lu, et al., 2005).

Однако, несмотря на все эти проекты, проблема защиты Земли от космической опасности до сих пор остается открытой, находящейся в стадии обсуждения. Последняя конференция по проблемам астероидно-кометной опасности состоялась в Санкт-Петербурге в 2005 г.

Можно отметить, что здесь основной проблемой все-таки остается проблема своевременного обнаружения опасных объектов, движущихся почти по лучу зрения и имеющих весьма малые собственные движения на небесной сфере.

Можно привести ряд фактов, свидетельствующих о реальных проблемах обнаружения опасных объектов.

10 августа 1972 года сообщалось, что объект диаметром свыше 25 м прошел через атмосферу Земли над Канадой и наблюдался на небе как огромный огненный шар. Весьма незначительное возмущение орбиты могло бы вызвать его падение на Землю, а значит и катастрофу местного масштаба. 1 октября 1990 года произошло падение метеороида диаметром около 20 м в западной части Тихого океана. Взрыв на высоте 30 км, мощностью примерно 10 Кт, сопровождался очень яркой вспышкой, которая была зафиксирована двумя геостационарными ИСЗ (Лушичко, 2000).

Астероид 2002MN диаметром 100м был открыт 17.06.2002 г. проектом *LINEAR* после его максимального сближения с Землей до 120 тыс. км, которое произошло еще 14.06.2002 (рис. 5.9. - www.astronet.ru, 2002).

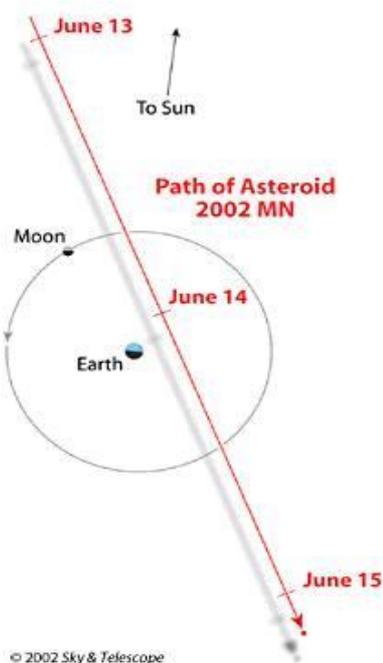


Рис. 5.9. Пролет астероида 2002MN через ОКП

Вопросы к главе V

1. Являются ли астероиды Главного пояса опасными для Земли? Какова для них оценка опасности по Туринской и Палермской шкале?
2. На астероид с высоким или низким альбедо солнечное излучение оказывает более сильное действие?
3. Сравните кинетическую энергию 1-км астероида, касающегося в перигелии орбиты Земли, с энергией 100 Мт водородной бомбы.
4. Рассмотрите основные характерные черты космизма К.Э. Циолковского.
5. С какого расстояния можно реально оценить опасность астероида, максимально сближающегося с Землей в районе лунной орбиты, если современные оптические телескопы надежно фиксируют изменение положения его на небесной сфере с точностью $0,01''$?

Литература

1. *Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф.* Ионизирующие и проникающие излучения околоземном космическом пространстве. Справочник. – Л.: Гидрометеиздат, 1994. – 501 с.
2. *Адушкин В.В., Козлов С.И., Петров А.В.* Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие. – М.: Анкид, 2000. - 6 с.
3. *Азимов А.* Выбор катастроф. – СПб. Амфора, 2000. - 510 с.
4. *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика. Т. 1, 2. – М.: Мир, 1974, 1975.
5. *Акишин А.И., Новиков Л.С.* Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. - М.: Знание, 1983. - 64 с.
6. *Аксенов В.В.* Электромагнитное поле Земли. – Новосибирск. ИВМ и МГ СО РАН, 2002. – 2 с.
7. *Алавердов В.В., Лукьященко В.И. и др.* Меры, принимаемые Российской Федерацией по снижению техногенного засорения космоса // Космонавтика и ракетостроение. – 2000. №18. - С. 19.
8. *Аллен К.У.* Астрофизические величины. - М.: Мир, 1977. - 446 с.
9. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. – М.: Наука, 1990. - 128 с.
10. *Бабаджанов П.Б.* Метеоры и их наблюдение. – М.: Наука, 1987. - 180 с.
11. *Багров А.В.* Околоземная астрономия – новая астрономическая дисциплина // Земля Вселенная. – 2001. №6. - С. 3-11.
12. *Багров А.В., Баканас Е.С., Барабанов С.И., Болгова Г.Т., Микуша А.М., Рыхлова Л.В., Тарадеев В.К., Сергеев А.В.* О миграции малых тел Солнечной системы и обнаружении потенциально опасных небесных тел, включая фрагменты «космического мусора» // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. – Киев. 2003, №4. – С. 261-264.
13. *Багров А.В.* Определение уровня населенности межпланетного пространства метеорными телами по результатам наземного мониторинга // Материалы Всероссийской конференции «Астероидно-кометная опасность – 2005». – СПб. 2005.
14. *Баранов В.Б.* Где находятся границы Солнечной системы // Соросовский образовательный журнал. – 2000.
15. *Боярчук А.А (Ред.).* Угроза с неба: рок или случайность. – М.: Космосинформ, 1999. - 220 с.
16. *Боярчук А.А., Багров А.В., Микуша А.М., Рыхлова Л.В., Смирнов М.А.* Астрономический аспект проблемы космической защиты Земли: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли-2000». – Евпатория, 2000. - С. 26-27.
17. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. - М.: Наука, 1981. - 416 с.
18. *Бруцек А., Дюран Ш. (Ред.).* Солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов – М.: Мир, 1980. - 254 с.
19. *Будыко М.И.* Глобальная экология. - М.: Мысль, 1977. - 327 с.
20. *Будыко М.И.* Энергетический баланс Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1978.
21. *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетное явление. – М.: 1991. - 271 с.
22. *Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. – М.: Рольф, 2002. - 576 с.
23. *Виноградова Т.А., Железнов Н.Б., Кузнецов В.Б. и др.* Каталог потенциально опасных астероидов и комет. - СПб.: ИПА РАН, 2003.
24. *Витязев А.В.* Импаkты в ранней и современной истории Земли // Земля и Вселенная. – 2000. №2. - С.9-17.
25. *Владимирский Б.М., Кисловский Л.Д.* Солнечная активность и биосфера. – М.: Знание, 1980. № 4.
26. *Владимирский Б.М. и др.* Космос и биологические ритмы. – Симферополь, 1995. – 217 с.
27. *Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А.* Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. М.: МНЭПУ, 2000. – 374 с.

28. *Владимирский Б.М.* Трансформация вариаций космической погоды в изменение биотропных показателей среды обитания: Материалы Международного семинара «Биологические эффекты солнечной активности». – Пущино, 2004.
29. *Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А., Мартынюк В.С.* Космическая погода и наша жизнь. Фрязино. «Век-2», 2004. – 224 с.
30. *Власов М.Н.* Влияние космической деятельности на ближний космос // Социально-экологические последствия ракетно-космической деятельности. Материалы рабочего совещания. М.: 26.05.1998. – www.ecoline.ru.
31. *Власов М.Н., Кричевский С.В.* Экологическая опасность космической деятельности. Аналитический обзор. – М.: Наука, 1999. - 240 с.
32. *Гальпер А.М.* Радиационный пояс Земли // Соросовский образовательный журнал. – 1999. № 10. - С. 75-81.
33. *Гнедин Ю.Н.* Комета Шумейкер-Леви 9 // Соросовская Энциклопедия по естественным наукам. Астрономия. – 2005.
34. *Горшков В.Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни. – М: ВИНТИ, 1999. - 470 с.
35. ГОСТы серии 25645. – 1985 - 2006.
36. *Дмитриев А.Н.* Техногенное воздействие на геокосмос. – Новосибирск. Изд-во НГУ, 1993. 68 с.
37. *Дмитриев А.Н., Шитов А.В.* Техногенное воздействие на природные процессы Земли. Проблемы глобальной экологии. – Новосибирск. Изд. дом «Манускрипт», 2003. — 140 с.
38. *Дубров А.П.* Геомагнитные поля и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1976.
39. *Дулов В.Г., Белолитецкий В.М., Цибаров В.А.* Математическое моделирование в глобальных проблемах естествознания / Под ред. В.В. Шайдурова. – Новосибирск: СО РАН, 2005. - 248 стр.
40. *Дьяченко А.И.* Магнитные полюса Земли. – М.: МЦНМО, 2003. – 48 с.
41. *Емельянов В.А., Лукьященко В.И., Чернова Н.А.* Роль космических средств оптикоэлектронного наблюдения при защите Земли от малых опасных небесных тел: Тезисы Всероссийской конференции «Астероидно-кометная опасность-2005». – СПб.:2005.
42. *Жагорин Г.И., Загорских В.И., Тарабара А.В., Тимофеев В.Н.* Система требований к экологической безопасности ракетно-космической техники // Сб. научных трудов ФГУП «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» / Под ред. С.Д. Куликова. - М.: 2001. Вып. 3. С. 344-349.
43. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука, 1983. - 416 с.
44. *Железнов Н.Б.* Астероидно-кометная опасность: современное состояние проблемы // XXXI конференция «Физика космоса». – Коуровка, 2004.
45. *Зайцев А.В.* Концептуальный проект системы планетарной защиты «Цитадель»: Материалы Международной конференции «Космическая защита Земли - 2000». – Евпатория, 2000. - С. 35.
46. Закон РФ «О космической деятельности» // Российская газета. - 1993. 6 октября.
47. *Иванов-Холодный Г.С.* Солнечная активность и геофизические процессы // Земля Вселенная. – 2000. №2. - С. 30-36.
48. *Ивлев Л.С.* (Ред.) Экология космоса. Материалы научных семинаров. – СПб, 2001. – 114 с.
49. *Климов С.И., Родин В.Г., Григорян О.Р.* Изучение и контроль «космической погоды» // Земля и Вселенная. – 2000. №4. - С. 9-18.
50. *Кононович Э.В., Мороз В.И.* Общий курс астрономии. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 544 с.
51. *Кочаров Г.Е.* Естественные архивы солнечной активности и термоядерной истории Солнца последние миллионы лет // Соросовский образовательный журнал. – 2002.
52. *Кричевский С.В.* Космическая деятельность: итоги XX века и стратегия экологизации. Общественные науки и современность. – М.: 1999. - С. 141-149.
53. *Куклев Ю. И.* Физическая экология. – М.: Высшая школа, 2003. – 357 с.
54. *Ларин И.К.* Химия и алхимия озонового слоя // Наука и жизнь. - 2001. - N 1.
55. *Леднев В. В.* Биоэффекты слабых и крайне слабых магнитных полей: Материалы Международного семинара «Биологические эффекты солнечной активности». – Пущино, 2004.

56. *Лесков Л.В.* Космическое будущее человечества. – М.: ИТАР-ТАСС, 1996.
57. *Логинов С.С., Пирогова А.М.* Анализ технических возможностей различных средств получения информации о техногенной обстановке в околоземном космическом пространстве // Космонавтика и ракетостроение. – 2000. №18. - С. 63-69.
58. *Лосев К.С.* Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке – М.: Космосинформ, 2001. - 400 с.
59. *Медведев Ю.Д., Свешников М.Л., Сокольский А.Г., Тимошкова Е.И., Чернетенко Ю.А., Черных Н.С., Шор В.А.* Астероидно – кометная опасность / Под ред. А.Г.Сокольского. - СПб.: ИТД МИПАО, 1996. – 244 с.
60. *Мещеряков С.А.* О проблеме защиты МКС от столкновения с частицами космического мусора // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. – М.: Космосинформ, 2000. - С. 302-307.
61. *Микиша А.М., Рыхлова Л.В., Смирнов М.А.* Загрязнение космоса // Вестник РАН. – 2001. Т. 7, №1. - С. 26-31.
62. Модель космоса. Т. 1, 2 / Под ред. М.И. Панасюка и Л.С. Новикова. — М.: КДУ, 2007.
63. *Моисеев Н.Н.* Экология человечества глазами математика. – М.: Молодая гвардия, 1988. - 200 с.
64. *Муртазов А.К.* Экология околоземного космического пространства. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004б. – 304 с.
65. *Назаренко А.И.* Моделирование техногенного загрязнения околоземного космического пространства // Околоземная астрономия XXI века. – М.: ГЕОС, 2001. - С. 80-91.
66. *Негода А.А., Сорока С.А.* Акустический канал космического влияния на биосферу Земли // Космічна наука і технологія. – 2001. Т. 7, №5/6. - С.85-93.
67. *Немчинов И.В.* и др. Численное моделирование столкновения астероида с Землей // Астрономический вестник. – 1994. Т. 28. № 4. - С. 81–99.
68. *Новиков Л.С., Романовский Ю.А.* Антропогенные воздействия на околоземную среду // Инженерная экология. - 1999, № 3. – С. 11-21.
69. **Ораевский В.Н., Кузнецов В.Д.** *Солнечно-земная физика и фундаментальные космические исследования* // www.rosaviakosmos.ru. – 2002.
70. *Петрукович А., Зеленый Л.* У природы есть и космическая погода // Наука и жизнь. – 2001. Т. 10. - С. 57-62.
71. *Подгорный И.М.* Межпланетная среда и ее влияние на космические объекты // Околоземная астрономия-2003. – СПб.: ВВМ, 2004. Т. 2. – С. 257-263.
72. *Пудовкин М.И.* Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы // Соросовская Энциклопедия по естественным наукам. Астрономия. – 2005.
73. *Пудовкин О.Л.* Основы теории оценки состояния техногенной космической обстановки. – М., 1997 — 214 с.
74. *Резанов И.А.* Жизнь и космические катастрофы. – М.: Агар, 2003. – 240 с.
75. *Рыхлова Л.В.* Проблемы космического мусора // Земля и Вселенная. – 1993, №6. - С.30-38.
76. *Рыхлова Л.В.* Устойчивое развитие и проблемы околоземной астрономии // Околоземная астрономия-2003. – СПб.: ВВМ, 2004. Т. 1. – С. 9-15.
77. *Сидякин В.Г., Темурьянц Н.А., Макеев В.Б., Владимирский Б.М.* Космическая экология. – Киев: Наукова думка, 1985. – 176 с.
78. *Сорока С.А., Калита Б.И., Мезенцев В.П., Каратаева Л.М.* Инфразвук в атмосфере и его связь с космическими и геосферными процессами. – 2004. <http://isnlviv.ua>.
79. *Сорохтин О.Г.* Модель образования планет В.С.Сафронова и глобальная эволюция Земли // www.meteorite.narod.ru. - 06.08.2002. – 16 с.
80. *Сюняев Р.А.* (Ред.). Физика космоса. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1986. - 783 с.
81. *Тарко А.М.* Устойчивость биосферных процессов и принцип Ле-Шателье // ДАН. – 1999. Интернет, 2000. – 4 с.

82. *Темурьянц Н.А., Мартынюк В.С.* Биологическая активность слабых ПЕМП сверхнизких частот: Материалы Международного семинара «Биологические эффекты солнечной активности». Пушино, 2004.
83. *Тирский Г.А.* Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет // Соросовский образовательный журнал. – 2000. №5. - С. 76-82.
84. *Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. – М.: Физматлит, 2005. – 576 с.
85. Федеральный закон «О внесении дополнений и изменений в Закон Российской Федерации «О космической деятельности»» // Российская газета. - 1996. 10 декабря.
86. Федеральный закон «Об охране окружающей среды». – М.: 2002.
87. *Фортов В.Е., Гнедин Ю.Н., Иванов М.Ф.* и др. Столкновение кометы Шумейкерв-Леви 9 с Юпитером: Что мы увидели // УФН. – 1996. Т. 166. №4. - С. 391-422.
88. *Хуторовский З.Н., Бойков В.Ф., Пылаев Л.Н.* Контроль космических объектов на низких высотах // Околоземная астрономия (космический мусор). – М.: Космосинформ, 1998. - С. 34-101.
89. *Чижевский А.Л.* Космический пульс жизни. - М.: Мысль, 1995. – 766 с.
90. *Чурюмов К.И.* О проблемах кометно-астероидной угрозы для человеческой цивилизации в реальности и спекуляции: Материалы Всероссийской конференции «Современная астрономия и методика ее преподавания». – СПб, 2002.
91. *Шкловский И.С.* Вселенная. Жизнь. Разум. – М.: Наука, 1987. - 320 с.
92. *Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р.* Физика процессов эволюции. – М.: УРСС, 2001. - 328 с.
93. *Ямпольский Ю.М.* Связь атмосферной и космической погодных систем // Труды VI сессии молодых ученых БШФФ-2003 «Волновые процессы в проблеме космической погоды». - Иркутск, 2003. - С. 9-10.
94. Aurora Viewing Tips. – www.sec.noaa.gov.
95. *Benitez N., Maiz-Apellaniz J., Canelles M.* Evidence for Nearby Supernova Explosions // *Physical Review Letters*. - 88 (2002) 081101.
96. *Bernhard R. P., Christiansen E. L., Kerr J. H.* Space Shuttle Meteoroid and Orbital Debris Impact Damage // *Science and Technology Series. Space Debris*. – 2000. V. 103. – PP. 29-34.
97. *Chapman C.R., Morrison D.* Impact on the Earth by Asteroids and Comets: Assessing the Hazard // *Nature*. – 1994. V. 367. – P. 33-40.
98. *Christiansen Eric L.* International Space Station. Meteoroidal/Orbital Debris Shielding // *Cosmonautics and Rocket Engineering*. – 2000. N18. - P.166-180.
99. *Gushchin G.P.* Toward the Theory of Ozone Hole // *Atmospheric and Oceanic Optics*. - 2004. V. 1. N.07. - P.522-535
100. *Hamilton C.* Terrestrial Impact Craters - www.iki.rssi.ru/solar/eng/tercrate.htm. - 2003.
101. Impact Cratering on Earth // *Earth Impact Database*. – 10.03.2003.
102. *Keller G., Adatte T., Stinnesbeck W., Rebolledo-Vieyra M., Fucugauchi J. U., Kramar U., Stüben H.* Chicxulub Impact Predates the K-T Boundary Mass Extinction // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. - March 2004. - 10.1073.
103. *Morrison D., Chapman C.R., Slovic P.* The Impact Hazard // *Hazards Due to Comets and Asteroids*. Ed. by T. Gehrels. – Tucson-London. University of Arizona Press, 1994. - P. 59-91.
104. *Murtazov A.K.* Ecology and Circumterrestrial Space // *Astronomical & Astrophysical Transactions*. 2003. V. 22. – P. 651-656.
105. *NASA's Near-Earth Object Programm* // www.neo.jpl.nasa.gov.
106. Potentially Hazardous Asteroids Close Approaches to The Earth. 2001-2178. - www.harvard.edu. 2007.
107. *Raup D., Sepkoski J.*: *Proceedings of the National Academy of Science USA*. – 1984. V. 81. - P. 801-805.
108. *Smith D. S., Scalo J., Wheeler J. C.* Importance of Biologically Active Aurora-like Ultraviolet Emission: Stochastic Irradiation of Earth and Mars by Flares and Explosions. - astro-ph/0307543. – 2003. 21 p.
109. *Space Debris / Ed. by N.N. Smirnov*. – NY.: Taylor&Francis, 2002. – 248 p.

110. Space Environment Center Web Pages. - www.sec.noaa.gov.
111. *Thomas B. C., et al.* Gamma-Ray Bursts and the Earth: Exploration of Atmospheric, Biological, Climatic and Biogeochemical Effects // astro-ph/0505472. – 2005. - 68 p.
112. Today's Ozone from Earth Probe TOMS. - www.sec.noaa.gov.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

«ЭКОЛОГИЯ КОСМОСА»

А

абляция - разрушение поверхности тела (обычно метеорита) из-за сопротивления среды, возникающее при прохождении тела через земную (или любой другой планеты) атмосферу.

авторегуляция (в природе) – система взаимодействий в природе, основанная на прямых и обратных связях и ведущая в соответствии с принципом Ле Шателье к динамическому равновесию или самоорганизации и саморазвитию всей системы.

аккреция – (лат. *accretio* – приращение, увеличение). Падение вещества из окружающего пространства на небесное тело.

активность солнечная - совокупность нестационарных процессов в атмосфере Солнца: пятна, факелы, вспышки, корональные конденсации, флоккулы и др.

альбедо - в общем случае отношение полного потока излучения, отраженного телом во всех направлениях, к полному падающему потоку.

Альвена

~ **волны** - поперечные волны плотности в плазме, возникающие вследствие смещения магнитных силовых линий вместе с плазмой. Распространяются вдоль магнитных силовых линий. Плотность газа не изменяется. Весь слой колеблется поперек поля как целое.

~ **теорема** – в идеально проводящей жидкости (коэффициент электропроводности равен ∞) магнитные силовые линии скреплены с веществом, и при движении жидкости вместе с ней перемещаются и силовые линии магнитного поля, не проскальзывая относительно вещества. Таким образом, например, силовые линии магнитного поля Солнца оказываются «вмороженными» в солнечный ветер.

аномалия гравитационная - изменение однородных эквипотенциальных поверхностей гравитационного поля в случае неоднородного распределения масс, создающих это поле.

антропоцентризм – воззрение, согласно которому человек является центром Вселенной и целью всех совершающихся в ней событий.

апогей - наиболее удаленная от Земли точка орбиты небесного тела, обращаемого вокруг нее.

артебиосфера – (лат. *arte* – искусственный). Слой биосферной колонизации в околоземном космическом пространстве, в котором находятся обитаемые космические станции и корабли.

астеносфера - слой повышенной текучести, на котором плавают у Земли жесткие литосферные плиты. Расположена на глубинах 70-250 км. В этом слое находятся первичные магматические очаги вулканов и образуются базальтовые магмы.

астероидов пояс - область между орбитами Марса и Юпитера от 1.5 до 5.2 а.е., где расположены орбиты большинства астероидов. В главном поясе идентифицировано 30 тысяч малых планет, из них 7 тысяч пронумеровано и у 700 известны орбиты. Основные классы: С-астероиды (альбедо менее 0.05 - углистые); S-астероиды (альбедо до 0.40 - каменные); М-астероиды - металлические. Минералогический состав определен у нескольких сотен астероидов. К 1999 г. получены прямые фотографии (АМС "Galileo") астероидов 951 Гаспра, 253 Ида со спутником Дактиль, Матильда и Эрос (АМС NEAR).

астероиды (малые планеты) - небольшие планетоподобные тела неправильной формы, орбиты наибольшего числа которых находятся между орбитами Марса и Юпитера.

Известны группы астероидов, движущиеся в лагранжевых точках: (Греки, Троянцы), группы астероидов (Амура, Аполлона, Атона), тесно сближающихся с Землей (*см. опасность астероидная*), астероиды внешних областей Солнечной системы.

астрооблема - сильно разрушенный древний ударный кратер.

астроботаника - наука, занимающаяся исследованием характеристик земных растений с целью определения возможности существования подобных на других планетах. Основана Г.А. Тиховым, проводившим такие исследования в отношении Марса.

атмосфера - газовый слой, окружающий поверхности некоторых планет.

~ **захваченная** - атмосфера планеты, появившаяся при ее образовании в результате аккреции и сохранившаяся в последующем.

~ **Земли** – масса составляет величину порядка $5.9 \cdot 10^{18}$ кг. Состав: азот – 78.08%, кислород – 20.29%, аргон - 0.93%, водяной пар – 0.2-2.6%, углекислый газ – 0.035.

~ **однородная** - модель атмосферы, плотность и температура которой по всей толщине соответствуют параметрам вблизи поверхности планеты. Масса однородной атмосферы соответствует массе реальной атмосферы, поэтому ее высота используется во многих расчетах.

~ **солнечная** - внешняя газовая оболочка Солнца, включающая в себя фотосферу, хромосферу и корону.

атмосферики свистящие - поперечные радиоволны (вистлеры), возникающие при вспышке молнии, и распространяющиеся вдоль земного магнитного поля за пределы ионосферы и обратно.

афелий - наиболее удаленная от Солнца точка орбиты небесного тела в Солнечной системе.

Б

баланс биосферы энергетический – алгебраическая сумма поглощаемой и излучаемой энергии в биосфере.

биоастрономия - наука, занимающаяся проблемами поиска планет в других звездных системах, исследованием эволюции планет и возможности зарождения на них жизни, поиском органических молекул во Вселенной, примитивной биологической активности, а также организацией поиска сигналов от внеземных цивилизаций и проявления их деятельности на Земле.

биосфера – область существования и функционирования всей совокупности живущих ныне организмов. Охватывает нижнюю часть атмосферы до озонового слоя, гидросферу до дна самых глубоких впадин, верхнюю часть литосферы до глубины около 4 км. По В.И. Вернадскому является активной оболочкой Земли, где совокупная деятельность земных организмов и человека проявляется как геохимический фактор планетарного значения. Близка к понятию «географическая оболочка».

болид – очень яркий метеор с дымным следом.

буря геомагнитная - резкое уменьшение на несколько часов горизонтальной компоненты магнитного поля Земли вследствие попадания в магнитосферу частиц солнечного ветра при солнечных вспышках. В этот период активизируются полярные сияния, наблюдаются нарушения коротковолновой радиосвязи.

В

Ван Аллена пояса – см. **пояса радиационные**.

весна – время года, переходный период между зимой и летом. В астрономическом понимании – промежуток времени от момента весеннего равноденствия до летнего солнцестояния.

ветер солнечный - поток заряженных частиц, вылетающих радиально из солнечной короны со скоростями порядка 400 км/с вблизи Земли. Вместе с «вмороженным» в него магнитным полем деформирует магнитосферы планет, формирует газовые хвосты комет.

вистлер - поперечная волна, распространяющаяся вдоль внешнего магнитного поля. Частота ее меньше частоты, с которой происходит вращение электрона вокруг магнитной силовой линии. В частности, вистлерами являются свистящие атмосферерики.

воздействие

~ **антропогенное** – сумма прямых и опосредованных влияний человечества на что-либо.

~ **антропогенное на природу** – прямое осознанное или косвенное и неосознанное воздействие человеческой деятельности, вызывающее изменение природной среды.

~ **глобальное** – воздействие естественных или антропогенных факторов на биосферу Земли в целом.

~ **на климат** – изменение глобальной энергетике Земли вследствие антропогенных воздействий: накопление углекислого газа, изменения плотности озонового слоя, загрязнение атмосферы, прямые выбросы энергии и т.д.

воздух атмосферный – эволюционно сложившийся состав нижнего слоя атмосферы.

волны

~ **акустические** - волны давления в жидких и газообразных средах, распространяющиеся и в веществе звезд.

~ **гравитационные** - согласно общей теории относительности, массивные объекты, испытывающие ускорение или изменение формы, излучают гравитационные волны. В настоящее время их существование экспериментами и наблюдениями не подтверждено.

~ **жизни** – 1.присущие всем видам периодические и непериодические изменения численности популяций 2.по мнению некоторых исследователей, зоны периодического возникновения жизни в Галактике.

~ **звуковые** - продольные колебания плотности атмосферы, улавливаемые человеческим ухом (20 Гц-20 кГц).

~ **ионизационные** - образующиеся как ударные при столкновении облаков нагретого ионизированного газа.

~ **ионно-звуковые** - состоящие из разрежений и сгущений ионов.

~ **магнитогидродинамические** - волны Альвена. Поперечные волны плотности, движущиеся вдоль направления магнитного поля.

~ **плотности** - см. **Альвена волны**.

~ **сейсмические** - возникающие в результате землетрясения при сдвиге литосферных плит. Разделяются на продольные (тип Р), поперечные (S), поверхностные (L). В твердом веществе распространяются Р и S волны, в жидком - только Р волны.

~ **приливные** – волны в земной коре и водной среде, вызванные приливообразующим действием Луны и Солнца

~ **ударные** - образующиеся в результате деформации фронта звуковой волны в среде, когда области с большим сжатием (температурой) догоняют области с меньшим сжатием.

Вольфа число - величина, показывающая число солнечных пятен и групп пятен. Является одной из основных характеристик солнечной активности.

время экологическое эволюционное – время перехода в новую область локального равновесия в результате неравновесного процесса смены видов (миллионы лет).

вспышка

~ **солнечная** - выброс вещества с поверхности Солнца со скоростями порядка 10^3 км/с и энергиями до 10^{32} эрг.

~ **хромосферная** - см. **вспышка солнечная**.

вспышки

~ **балл** - характеристика мощности солнечной вспышки в линии водорода $H_{\alpha}(\lambda=656$ нм). Цифры пропорциональны площади в миллионных долях площади солнечной полусферы: 1 - от 100 до 250; 2 - от 250 до 600; 3 - от 600 до 1200; 4 - более 1200. Буква после цифры обозначает яркость: F - слабая, N - нормальная, B - яркая.

~ ~ **рентгеновский** - поток рентгеновского излучения от Солнца во время вспышки в диапазоне 12.5-1 кэВ. Обозначается Mf, если поток равен 10^{-5} - 10^{-4} Вт/м², и XXf, если он превышает эти значения.

Г

гелиобиология - наука о солнечно-биологических связях, основы которой заложены в начале XX в. А.Л. Чижевским.

гелиопауза - зона на расстоянии 50-100 а.е. от Солнца, в которой солнечный ветер сливается с межзвездной средой.

гелиосфера - область околосолнечного пространства, в которой плазма солнечного ветра движется относительно Солнца со сверхзвуковой скоростью. Возникает из-за взаимодействия солнечного ветра с межзвездной плазмой и межзвездным магнитным полем. Внешней ее границей является гелиопауза.

геоид - эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли. В каждой ее точке сила тяжести направлена по нормали к ней, и совпадает со средним уровнем Мирового океана. Отклонение от эллипсоида Красовского $\approx \pm 100$ м.

геокорона - внешняя часть земной атмосферы, водородное гало. Расстояние от поверхности до 15 земных радиусов. При освещении Солнцем излучает в линии L_{α} .

геомагнетизм - 1. магнитное поле Земли 2. раздел геофизики, изучающий распределение в пространстве и изменение во времени магнитного поля Земли, а также связанные с ним процессы на Земле и в магнитосфере.

геосистема – природная система, состоящая из взаимообусловленных компонентов, принадлежащих литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере, функционирующая и развивающаяся во времени как единое целое. Является понятием территориально неопределенным, отражающим системные свойства (целостность, взаимосвязь) разнородных элементов.

геосфера – концентрические, сплошные или прерывистые оболочки Земли, различающиеся между собой по химическому составу, агрегатному состоянию и физическим свойствам. Выделяют магнитосферу, атмосферу, гидросферу, литосферу, мантию и ядро. Эти основные геосферы иногда подразделяются на геосферы второго порядка или на геосферы, обусловленные их взаимодействием (например, биосферу).

геофизика – комплекс наук о Земле, изучающих внутреннее строение, физические свойства и процессы, происходящие в геосферах.

геоэкология – практический раздел экологии, наука о взаимодействии геосистем, биосистем и социально-производственных систем. Особое внимание обращает на антропогенные воздействия, разработку рекомендаций по рациональному природопользованию и охране природы.

~ **космическая** – изучение экосистем аппаратурой, установленной на искусственных спутниках Земли.

гетеросфера - часть атмосферы, располагающаяся выше гомопаузы (с высот около 120 км для Земли), состав которой определяется диффузией.

гомеостаз – (греч. *homoiios* – подобный, *stasis* – неподвижность). Состояние подвижного равновесия гео- или экосистемы, поддерживаемое сложными приспособительными реакциями, постоянной функциональной саморегуляцией природных систем в соответствии с принципом Ле Шателье.

гомопауза - зона в атмосфере, над которой диффузия начинает преобладать над конвекцией при концентрациях молекул $\sim 10^{12}$ см⁻³. Для Земли начинается на высотах около 120 км.

гомосфера - область атмосферы, где составляющие перемешаны. Расположена ниже гомопаузы.

граница

~ **биосферы** – фактическая граница биосферы проходит от 6-7 км над поверхностью Земли до глубинной изотермы 100° на суше и максимальной глубины в 11034 м в океане.

~(ы) **жизни биологические** – область параметров природной среды, внутри которой возможно существование и самовоспроизводство известной нам белковой жизни, которая весьма чувствительна к условиям существования

~ **кислородная** – переходная область между подземными водами, содержащими свободный кислород и водами, лежащими ниже, в которых свободный кислород отсутствует (глубины в несколько сотен, редко тысяча метров).

~ **экосистемы** – переходная полоса, в пределах которой меняется баланс экологических компонентов, а следовательно меняются факторы среды и видовой состав биоты. Эта граница обычно бывает нечеткой в связи с тем, что это понятие не столько морфологическое, сколько функционально-системное.

Д

Дальтона минимум - снижение солнечной активности в период с 1800 г. по 1825 г., когда на Солнце отсутствовали пятна.

дегазация - выделение недрами планеты газов, могущих оказывать существенное влияние на процессы в ее атмосфере (например, на состояние озонового слоя в атмосфере Земли).

день полярный – промежуток времени, когда Солнце как минимум сутки не заходит за горизонт. Продолжительность полярного дня на полюсах Земли составляет 189 суток.

динамика

~ **экосистемы сезонная** – одна из форм циклических изменений в биотическом сообществе, связанная со сменой времен (сезонов) года.

~ **экосистемы циклическая** – обратимые изменения экосистем, вызванные непостоянными внешними факторами, с постепенным возвратом к практически исходному состоянию.

диссипация - явление ускользания газов из атмосфер небесных тел, вызванное тепловым движением молекул. В частности, водород, образующий корону Земли, является продуктом диссоциации молекул воды под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, и дальнейшей диссипации атомов из атмосферы.

диссоциация - распад молекулы, радикала, иона на несколько частей. Имеет место в атмосферах молодых звезд, межзвездной среде, атмосферах планет.

Добсона шкала – шкала, используемая для оценки общего содержания озона в атмосфере. Единица шкалы соответствует одной тысячной количества озона в вертикальном столбе атмосферы, численно равного толщине слоя и выражающегося в атм*см.

дождь метеорный - метеорный поток весьма большой интенсивности. Один из наиболее интенсивных метеорных потоков - Леониды, встреча с которым давала в 1799, 1833, 1866 и 1966 гг. рекордные числа метеоров.

дыра озоновая – обширные области в озоновом слое с заметно (до 50%) пониженным его содержанием. Темпы ее расширения составляют в последнее десятилетие около 4% в год над Антарктикой и несколько меньше в арктических областях. Появление озоновых дыр связывают в основном с техногенной деятельностью.

Е

единица

~ **астрономическая (а.е.)** - среднее расстояние между Землей и Солнцем. Определяется как величина радиуса невозмущенной круговой орбиты тела пренебрежимо малой массы, обращающегося вокруг Солнца с угловой скоростью относительно звезд $0,017202098950$ радиан в сутки. $1 \text{ а.е.} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м} = 500$ световых секунд.

Ж

жизненность – степень стойкости живых организмов к нарушениям и резким изменениям окружающей среды. Ее критериями служат: интенсивность размножения и выживания потомства, конкурентоспособность при межвидовых и внутривидовых отношениях, оптимальная численность особей, приспособленность к условиям абиотической среды. Весьма важны исследования жизненности при проведении экспериментов на околоземных орбитах и в открытом космосе.

З

загрязнение

~ **околоземного пространства естественное** – осколки небесных тел (метеороидов, комет), космическая пыль, газ, заполняющие околоземное космическое пространство.

~ **околоземного пространства искусственное** – техногенные отходы: осколки космических аппаратов и ракет-носителей, различных составляющих их конструкций (в том числе ядерных реакторов), отходы топлива, собственной атмосферы ИСЗ на околоземных орбитах. Кроме того, загрязнение околоземного пространства электромагнитными полями (излучениями, в т.ч. радиоактивными) техногенного происхождения.

~ **радиоактивное** – форма физического загрязнения, связанная с попаданием в окружающую среду радиоактивных элементов.

закон

~ **минимума** (Ю. Либиха) – жизненность организма определяется самым слабым звеном в цепи его экологических потребностей.

~ **необратимости эволюции** (Л. Полло) – эволюция необратима: организм (популяция, вид) не может вернуться к состоянию, уже ранее осуществленному в ряду его предков.

~ **сохранения** – в применении к экологии закон сохранения имеет в своей основе биотический круговорот веществ.

~ **толерантности** (В. Шелфолда) – процветание организма ограничено зонами минимума и максимума определенных экологических факторов; между ними располагается зона экологического оптимума. Каждый вид характеризуется способностью переносить отклонения экологических факторов от оптимальных – толерантностью.

~(ы) **общей экологии** (Б. Коммонера) – 1.все связано со всем 2.все должно куда-то деваться 3.природа знает лучше 4.ничто не дается даром.

~ **постоянства количества живого вещества** – по В.И. Вернадскому количество живого вещества биосферы для данной геологической эпохи постоянно.

~ **преломления космических воздействий** – космические факторы, оказывая воздействие на биосферу, подвергаются изменениям со стороны экосферы планеты.

~(ы) **экодинамики** (Ю. Голдсмита) – 1.закон сохранения информационной и соматической структуры биосферы 2.закон стремления к климаксу 3.закон экологического порядка 4.закон самоконтроля и саморегуляции живого.

землеведение космическое – совокупность исследований Земли из космоса с помощью аэрокосмических методов и визуальных наблюдений.

Земли фигура - форма геометрического тела, лучше всего удовлетворяющая форме Земли. Трехосный эллипсоид Красовского: $a=6378,2$ км, $b=6356,9$ км, $f=1/298,3$, $e=0,08$. Его максимальное отклонение от геоида составляет ± 100 м.

Земля - третья планета Солнечной системы с большой полуосью орбиты около 150 млн. км и периодом обращения 365,26 сут. Ее масса составляет $5,98 \cdot 10^{24}$ кг, диаметр 12756 км, период осевого вращения 23 час. 56 мин. Окружена плотной атмосферой с плавающими в ней облаками из водяного пара, состоящей на 78,1% из азота, 20,9% кислорода, 0,9% аргона, 0,03% углекислого газа. Поверхность на две трети покрыта водой. Глубины до 11 км, высоты на суше до 9 км. Имеет металлическое ядро, состоящее из расплавленного железа и никеля, возможно с твердым центром. Температура в центре Земли - около 4000°C. Ядро окружено силикатной мантией. Кора имеет толщину около 10 км под океанами и примерно 30 км там, где расположены континенты. Магнитное поле имеет напряженность 0,31 Гс в зоне магнитного экватора и 0,62 Гс у геомагнитных полюсов. Магнитосфера радиусом $70 \cdot 10^3$ км с солнечной и $120 \cdot 10^3$ км с противоположной стороны, состоит, в основном, из электронов. Радиоизлучение Земли в дециметровом диапазоне является одним из мощнейших в Солнечной системе в результате техногенной деятельности человечества. Имеет один естественный спутник - Луну.

зима ядерная – резкое длительное общепланетное похолодание, вызванное экранированием солнечного излучения массами пыли и пепла, возникшими в результате ядерной войны или падения астероида.

зона – географическая территория, в пределах которой наблюдается однозначность показателей интенсивности какого-либо явления или их совокупности, либо эта интенсивность варьируется в пределах определенного интервала.

~ **авроральная** - область на Земле, в которой наблюдается максимальное количество ночных полярных сияний.

~(ы) **географические** – природные зоны, относительно крупные подразделения географической оболочки, части географических поясов, обладающие общностью термических условий и увлажнения. Образуют одну из высших ступеней физико-географического деления земной поверхности.

И

излучение

~ **ионизирующее** – поток частиц и жестких квантов электромагнитного излучения, ведущее к ионизации атомов и молекул среды. В дозах, превышающих естественные, наносит вред живым организмам.

~ **солнечных пятен** - интенсивное радиоизлучение в шумовой солнечной буре, обладающее высокой степенью переменности и поляризованное по кругу.

~ **эффективное** – разность между излучением с земной поверхности и встречным излучением атмосферы. Один из элементов радиационного баланса земной поверхности.

изолинии – линии на картах, графиках и разрезах, проходящие по точкам с одинаковыми значениями какого-либо количественного показателя, характеризующего изображаемое явление.

изоповерхности – поверхности равного значения величин каких-либо характеристик, дающих представление об их пространственном распределении.

изотропия – сохранение свойств объекта или процесса независимо от направления (например, изотропное реликтовое излучение).

импакт – удар о планету космического тела, который может сопровождаться значительными разрушениями на ее поверхности и резкими изменениями параметров атмосферы и околоземного пространства.

индекс

~ **активности солнечной** - числовой параметр, характеризующий количество и мощность активных образований на Солнце.

~ **вспышечный** - индекс активности Солнца, основанный на частоте вспышек.

~ **F10.7** - поток солнечного излучения на волне 10.7 см, выраженный в солнечных единицах потока.

~ **кальциевый** - выражаемый по суммарной площади кальциевых флоккулов, наблюдаемых в линии 393 нм.

~(**ы**) **геомагнитные** - параметры амплитуды флуктуаций магнитного поля Земли: локальный 3-часовой *K*-индекс, трехчасовой планетарный *K_p*-индекс, среднесуточный *A_p*-индекс.

~ **загрязнения** – термин, включающий понятия объема вещества-загрязнителя (энергии процесса загрязнения) и степени его воздействия на экосистему, соотнесенные со временем и интенсивностью процессов.

инсоляция - количество энергии Солнца, падающее на единицу площади земной поверхности в единицу времени. Определяет величину солнечной постоянной.

ионизация (атмосферы) – процесс образования положительных и отрицательных ионов и свободных электронов в атмосфере под действием главным образом коротковолнового солнечного излучения. К концу XX в. этот процесс частично определяется техногенным воздействием на атмосферу.

ионосфера - ионизированный газ (плазма) в верхней атмосфере Земли. Состоит из слоев: D (H~70 км), E (H~90-120 км), F (выше H~130 км и вплоть до 400-1000 км).

К

касп полярный - воронкообразная структура в геомагнитном поле, через которую вдоль силовых линий возможно проникновение плазмы солнечного ветра в верхнюю атмосферу.

климат – (греч. *klimatos* – наклон, имеется в виду наклон земной оси к плоскости эклиптики). Многолетний режим погоды в той или иной местности как результат процессов, непрерывно происходящих в атмосфере и деятельном слое.

климата изменения – длительные (свыше 10 лет) направленные, или ритмические изменения климатических условий на Земле в целом или ее крупных регионах.

коадаптация – взаимное приспособление в ходе эволюции.

колебания солнечные - мощные турбулентные движения возбуждают волновые колебания в атмосфере Солнца: 1) 5-минутные колебания в фотосфере и хромосфере - резонансные колебания верхних слоев конвективной зоны; 2) колебания в солнечных пятнах с периодом около 3 мин.; 3) пульсация Солнца как звезды (А.Б.Северный, В.А.Котов, Т.Т.Цап, 1976) с периодом 2 час. 40 мин. и амплитудой 20 км. Также наблюдаются пульсации Солнца с периодами 20-40 мин. и 5 мин.

комета - тело малой плотности, состоящее из газа и пыли (в том числе радикалов CN, C₂, NH, OH), обращающееся вокруг Солнца по эллиптической орбите (иногда сильно вытянутой). Массы комет в среднем 10¹⁵ кг, время жизни около 100 оборотов вокруг Солнца. Периодические составляют около 4% от всех комет. Всего известно около 100 короткопериодических комет, имеющих периоды от нескольких лет до нескольких десятков лет. Кометы являются одним из источников пыли в Солнечной системе и околоземном пространстве, загрязняя его.

~ **долгопериодическая** - комета с вытянутой орбитой и периодом, большим 200 лет. Источником являются облака Оорта и Хиллса.

~ **искусственная** – облако паров натрия или другого вещества, выпускаемого с космического аппарата для определения его положения и различных научных экспериментов. Первый такой эксперимент проведен АМС «Луна-1» в 1959 г.

~ **короткопериодическая** - комета с периодом обращения в несколько или несколько десятков лет, сопоставимым с периодами обращения планет. Основная масса их перешла на свои орбиты под влиянием приливного действия Юпитера. Есть предположение, что многие из них возникли не дальше 1 а.е. от Юпитера в поясе Койпера.

жидкости или газа в поле тяжести под действием потока теплоты, идущего снизу. Происходит: 1. в тропосфере Земли 2. в океане Земли 3. во внешних слоях Солнца (20-30% его радиуса) 4. в центральных частях массивных звезд.

конденсации корональные - области активной короны Солнца, в которых плотность плазмы примерно в три раза больше, чем в окружающих.

координаты

~ **географические** – определяющие положение объекта на земной поверхности. Долгота отсчитывается от Гринвичского меридиана к востоку, широта – от плоскости земного экватора.

~ **геодезические** - определяемые положением точки на земном эллипсоиде. Геодезическая широта - угол между нормалью к эллипсоиду в этой точке и плоскостью земного экватора. Геодезическая долгота - угол между меридианом места и гринвичским меридианом.

~ **геомагнитные** – широта и долгота, определяющие положение точки на земной поверхности при рассмотрении явления земного магнетизма. Широта – угол между геомагнитным экватором и точкой в плоскости геомагнитного меридиана; долгота – двугранный угол между плоскостью геомагнитного меридиана точки на поверхности Земли и геомагнитного меридиана, проходящего через географический полюс.

~ **геоцентрические** - приведенные к центру Земли. Геоцентрическая широта - угол между земным экватором и направлением из места наблюдения к центру Земли.

~ **топоцентрические** - отнесенные к поверхности Земли.

Кордылевского облака - облака естественного космического мусора (межпланетной пыли), располагающиеся в точках либрации L₄, L₅ системы Земля-Луна на расстоянии 60° впереди и позади Луны на ее орбите.

корона солнечная - внешняя часть атмосферы Солнца, расположенная над хромосферой. Температура порядка 10⁶ К, плотность около 10⁻¹⁶ г/см³. Наблюдается во время полных солнечных затмений и при помощи коронографа. Роль проводника тепла из

фотосферы в корону берет на себя магнитное поле. Ток, протекающий по магнитным силовым линиям, разогревает корону.

космос ближний - включающий в себя верхние слои ионосферы и магнитосферу.

Л

лаккомиты – поднятия на поверхностях планет, возникающие в результате вулканической деятельности последних. На Земле это, например, горы Машук и Бештау на Северном Кавказе.

Ламберта

~ **закон** - закон рассеяния света идеальной поверхностью, когда во всех направлениях рассеивается одинаковая доля падающего потока.

~ **поверхность** - поверхность, рассеяние света которой удовлетворяет закону Ламберта. Иногда встречается у астрономических тел.

лед – вода в твердом состоянии. Известны: аморфный лед и 10 видов его кристаллических модификаций. На Земле имеется в виде атмосферного, подземного и морского льда, ледников, айсбергов, снежного покрова.

~ **межзвездный** - смесь застывших воды, формальдегида и аммиака, осевших на поверхность межзвездных пылинок.

ливень атмосферный - резкое усиление потока вторичных космических лучей, порожденных первичными космическими лучами или гамма-излучением.

лучи

~ **корональные** - яркие и прямые лучи, наблюдающиеся над солнечными пятнами и факелами. В их основании яркость хромосферы возрастает.

~ **космические** - потоки заряженных частиц, попадающих на Землю из Космоса. Протонов 85%, α -частиц - 1%, электронов и тяжелых ядер - менее 1%. Скорости релятивистские. Космические лучи средней энергии имеют изотропное распределение по небесной сфере. Открыты в 1912г.

~ **солнечные** - потоки зараженных частиц (протонов, альфа-частиц, электронов) с энергиями 1 Мэв-1 Гэв, движущихся от Солнца вдоль его магнитных силовых линий.

М

магнетизм

~ **земной** – магнитное поле Земли, существование которого обусловлено действием постоянных источников, расположенных внутри планеты (гидромагнитное динамо), создающих основной компонент поля (99%), а также электрических токов в магнитосфере и ионосфере (~1%). Напряженность убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору от 55,7 до 33,4 А/м.

~ **солнечный** – магнитные поля на Солнце, упорядочивающие движение солнечной плазмы, обуславливающие солнечные вспышки, существование протуберанцев и т.д. Средняя напряженность магнитного поля в фотосфере 1 Э (79,6 А/м), в области солнечных пятен она может достигать нескольких тысяч Э. Периодические колебания солнечного магнитного поля определяют периодичность его активности. Источник магнитного поля Солнца – сложные движения плазмы в его недрах.

магнитопауза - граница между магнитным полем Земли и солнечным ветром на расстоянии 13-17 земных радиусов от планеты с подсолнечной стороны. На ней отклоняется прямой поток солнечных заряженных частиц.

магнитосфера - внешняя оболочка ионосферы планеты, образуемая взаимодействием сверхзвукового потока горячей замагниченной плазмы солнечного ветра с магнитным полем планеты. У Земли простирается на высотах 10^3 - $6 \cdot 10^4$ км на солнечной стороне и до 10^6 км - на ночной стороне. Мощность диссипации энергии - до $3 \cdot 10^{11}$ Вт.

материя межпланетная - корпускулярное и электромагнитное излучение Солнца, газо-пылевое облако, в которое погружена Солнечная система.

мезопауза - температурный минимум, разделяющий мезосферу и термосферу на высотах 80-90 км.

мезопик - температурный пик на высотах 20-25 км, разделяющий стратосферу и мезосферу. Обусловлен поглощением солнечной радиации озоном.

мезосфера - область земной атмосферы, расположенная непосредственно над стратосферой с температурой 210-270 К на высотах 20-100 км.

меридиан

~ **географический** - большой полукруг, проходящий через полюсы Земли и точку на ее поверхности.

~ **главный** - см. нулевой.

~ **магнитный** - проекция силовой линии геомагнитного поля на земную поверхность. Сложные по форме геомагнитные меридианы сходятся в магнитных полюсах.

~ **небесный** - большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и зенит наблюдателя.

~ **нулевой (начальный, Гринвичский)** - проходящий через Гринвичскую обсерваторию и считающийся началом отсчета долгот.

~ **основной** - центральный меридиан часового пояса.

~ **Парижский** - меридиан Парижской обсерватории. В XVII - XVIII вв. считался нулевым.

~ **центральный** - линия север-юг, разделяющая пополам видимый диск планеты или Солнца.

метеор - световое явление в атмосфере на высоте 130-80 км, возникающее при попадании и сгорании в ней метеорного тела. Воспринимается как «падающая звезда».

метеорит - остаток упавшего на Землю метеорного тела. В среднем в год выпадает около 2000 метеоритов, составляющих вместе с метеоритной пылью массу около 100 т. Метеориты делятся на три больших класса: железные, каменные и железо-каменные.

~ **Анихито** - самый большой из метеоритов, находящихся в музеях мира. Этот железо-каменный метеорит найден Р. Пири в 1897 г. в Гренландии.

~ **Гоба** - самый большой (9 м^3 , 60 т) из железных метеоритов. Найден в Намибии в 1920 г.

~ **«марсианский»** - метеорит ALH 4001, найденный в Антарктиде. Попал на Землю с Марса в результате, как полагают, столкновения Марса с небольшим астероидом. Предположительно, в нем обнаружены окаменевшие остатки органических молекул.

~ **Сихотэ-Алинский** - крупнейший в XX в. 12 февраля 1947 г. в Уссурийскую тайгу упало около 100 т вещества железо-никелевого метеорита, распавшегося на куски. Они образовали более 100 кратеров.

~ **Тунгусский** - метеорит, упавший утром 30.06.1908 г. в районе реки Подкаменная Тунгуска, по поводу природы которого идут споры. Одной из вероятных считается гипотеза о том, что этот метеорит был ледяным ядром кометы, возможно, осколком ядра кометы Энке.

метеороид - в общем случае любое метеорное тело в Солнечной системе.

микроклимат - климат приземного слоя воздуха на небольшой территории.

Миланковича цикл – период глобальных оледенений ($\sim 10^5$ лет), связанный с изменением эксцентриситета орбиты Земли.

миникометы - рыхлые ледяные тела, покрытые слоем пыли, размерами порядка 10 м, массой около 100 т. При попадании в атмосферу Земли с частотой около 10 в год взрываются, загрязняя ее верхние слои. Энергия взрыва оценивается от нескольких до сотен килотонн.

Млечный Путь – 1.светящаяся полоса на небесной сфере, состоящая из неразрешимых глазом звезд и туманностей 2.название нашей Галактики.

мониторинг – (лат. *monitor* – надзирающий). Наблюдение и оценка состояния природной среды под влиянием антропогенных воздействий с целью рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Основным принципом мониторинга является его непрерывность.

~ **глобальный** – слежение за общемировыми процессами и явлениями в биосфере Земли и ее экосфере, включая все их экологические компоненты и предупреждение о возникающих экстремальных ситуациях.

~ **околоземного пространства** - наблюдения и контроль естественного и антропогенного загрязнения; выработка методов оценки состояния околоземного пространства как части природной среды; разработка прогноза возможных последствий возрастающей антропогенной нагрузки на околоземное пространство.

Мохоровичича граница - резкая сейсмическая граница между корой и мантией Земли, на которой скачкообразно увеличивается скорость сейсмических волн с 6.7-7.6 до 7.9-8.2 м/с.

мусор космический – осколки тел естественного и техногенного происхождения в околоземном пространстве. Источниками естественной составляющей являются астероиды, кометы и метеорные потоки, искусственной – обломки космических аппаратов, их ракет-носителей, элементов конструкций, остатки топлива и т.д.Н

Н

нагрузка антропогенная – степень прямого или косвенного воздействия людей и их хозяйственной деятельности на природу в целом или на ее отдельные экологические компоненты и элементы.

наклонение магнитное – угол между вектором напряженности геомагнитного поля и горизонтальной плоскостью в рассматриваемой точке земной поверхности.

нарушение экологическое – отклонение от обычного состояния экосистемы любого иерархического уровня организации (от биогеоценоза до биосферы). Если оно недостаточно для необратимого разрушения экосистемы, то последняя способна самовосстанавливаться до относительно прежнего состояния в соответствии с принципом Ле Шателье.

ниша экологическая – место вида в природе, включающее как его положение в пространстве, так и функциональную роль в сообществе и положение относительно абиотических условий существования. Всю биосферу можно рассматривать как экологическую нишу человека.

ноосфера – «сфера разума», высшая стадия развития биосферы, когда разумная человеческая деятельность становится главным определяющим фактором ее устойчивого глобального развития. Учение о ноосфере разработано В.И. Вернадским.

О

облако

~ **Оорта** - сферическая область на расстоянии порядка $2 \cdot 10^4 - 10^5$ а.е. от Солнца, считающаяся местом рождения комет.

~(а) **серебристые** - облака серебристого цвета на высоте 80-85 км над Землей. Наблюдаются летом на широтах $50^\circ - 75^\circ$ с.ш. и зимой на $40^\circ - 60^\circ$ ю.ш. в период астрономических сумерек, когда Солнце погружено под горизонт на $6^\circ - 18^\circ$. Природа окончательно не выяснена.

~ **Хиллса** – облако кометных ядер, типа облака Оорта, располагающееся на расстоянии $10^3 - 20 \cdot 10^3$ а.е. от Солнца. Имеются предположения, что оно содержит значительно больше кометных ядер (до 10^{14}), нежели облако Оорта.

оболочка

~ **биогеоценотическая** – совокупность биогеоценозов поверхности Земли толщиной 200-300 м на суше.

~ **географическая** – природный комплекс, возникший в слое взаимодействия литосферы, гидросферы и атмосферы и сформировавшийся под действием солнечной энергии и органической жизни. Включает в себя нижние слои атмосферы, верхние слои литосферы, почти всю гидросферу и всю биосферу.

овал авроральный - области в двух полярных зонах над Землей, в которых наблюдаются полярные сияния. Расположены ассиметрично относительно геомагнитных полюсов.

Одума законы – 1. организмы могут иметь широкий диапазон толерантности в отношении одного экологического фактора и узкий в отношении другого 2. организмы с широким диапазоном толерантности в отношении всех экологических факторов наиболее распространены 3. если условия по какому-либо экологическому фактору не оптимальны, то диапазон толерантности может сузиться и в отношении других факторов 4. многие факторы среды могут стать лимитирующими в критические периоды жизни организмов, особенно в период размножения.

озоносфера – слой повышенной концентрации озона в земной атмосфере, выполняющий роль защитного экрана от жесткого космического (преимущественно УФ) излучения. Располагается между 7-8 (на полюсах), 17-18 (на экваторе) и 50 км с наибольшей плотностью на высоте 20-22 км над поверхностью Земли.

океан мировой – глобальная совокупность всех земных океанов и морей объемом $1.4 \cdot 10^9$ км³. Занимает 70.8% земной поверхности.

окно

~ **оптическое** - область в спектре поглощения в земной атмосфере (290-760 нм), через которую видимый свет попадает на поверхность Земли.

~(а) **прозрачности** – интервалы длин волн, в которых излучение не поглощается или поглощается незначительно при прохождении через земную атмосферу. В видимом диапазоне это оптическое окно, в радиодиапазоне 1 мм ÷ 30 м.

опасность астероидно-кометная - опасность того, что астероиды и кометы, имеющие вытянутые орбиты с перигелием, близким к Солнцу, могут столкнуться с Землей. Из астероидов к таким принадлежат малые планеты групп Амура, Аполлона, Атона.

осень – время года, переходный климатический сезон между летом и зимой. В астрономическом понимании промежуток времени между моментом осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния.

отходы техногенные в космосе – совокупность обломков космических аппаратов (космический мусор), остатки топлива ракет-носителей и собственных атмосфер спутников.

охрана

~ **биосферы** – система мероприятий по устранению нежелательного антропогенного или стихийного влияния на функционально взаимосвязанные блоки биосферы (атмосферу, гидросферу, почвенный покров, литосферу, сферу органической жизни), по поддержанию

выработавшейся эволюционно ее организованности и поддержание нормального функционирования.

~ **природы** – 1.совокупность международных, государственных, региональных и т.д. мероприятий направленных на рациональное использование, воспроизводство и сохранение природных ресурсов Земли 2.комплексная дисциплина, разрабатывающая общие принципы и методы сохранения и восстановления природных ресурсов.

~ **околоземного пространства** - система международных мероприятий (научно-технологических, правовых, экономических, просветительных) по предотвращению попадания в околоземное космическое пространство техногенных загрязнений как в виде различных излучений, так и в виде мусора, изменяющих свойства околоземного пространства таким образом, что его воздействие на биосферу после этого наносит последней необратимый вред.

~ **среды (жизни)** – совокупность мероприятий, направленных на сохранение природы Земли в состоянии, соответствующем эволюционным потребностям современной биосферы и ее живого вещества.

II

панспермия – гипотеза, согласно которой жизнь в виде спор переносится в космосе с одной планеты на другую.

параллель

~ **географическая** - малый круг, плоскость которого параллельна плоскости земного экватора.

~ **суточная (небесная)** - малый круг небесной сферы с плоскостью, параллельной плоскости небесного экватора, по которому совершается суточное движение светила.

Персеиды – наиболее заметный и известный метеорный поток с радиантом в созвездии Персея. Действует в июле-августе, максимум 12 августа. Связан с кометой Свифта-Туттля.

петли корональные - вид корональных конденсаций, наблюдаемый в свете зеленой корональной линии и рентгеновских лучах.

пиргелиометр - прибор для измерения в энергетических величинах полного количества солнечной энергии, падающего за определенное время на площадку на поверхности Земли.

плазма космическая - плазма в космическом пространстве и космических объектах. Выделяют: плазму ионосферы Земли ($n \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$); плазму радиационных поясов Земли ($n \sim 10^7 \text{ см}^{-3}$); планет; плазмосферу (см. ниже); плазму солнечного ветра ($n \sim 1-10 \text{ см}^{-3}$); плазму межзвездного и межгалактического пространства ($n \sim 10^{-3}-10^{-4} \text{ см}^{-3}$); плазму в звездах; вырожденную плазму в белых карликах и нейтронных звездах.

плазмопауза - область резкого спада концентрации плазмы в магнитосфере планеты.

плазмосфера - область на расстоянии от Земли, в 4-5 раз превышающее ее радиус, из силовых линий дипольного магнитного поля и находящейся на них холодной плазмы ионосферного происхождения. Плотность частиц порядка 10^2 см^{-3} .

погода космическая – состояние околоземного космического пространства, обусловленное активностью Солнца, условиями в солнечном ветре, магнитосфере, ионосфере и термосфере Земли. Это понятие введено в 1994 г. В настоящее время космическая погода определяется и публикуется каждый день различными организациями,

такими как ИЗМИРАН в России или NOAA Space Environment Center Boulder (Colorado) в США.

поле

~ **геомагнитное** - магнитное поле Земли, которое в первом приближении можно считать имеющим дипольный характер. Смещение северного геомагнитного полюса относительно географического составляет в настоящее время $11^\circ 5'$ в сторону Тихого океана.

~ **межпланетное магнитное** - унесенное солнечным ветром магнитное поле Солнца. Магнитные силовые линии вследствие вращения Солнца имеют спиралевидную форму. Напряженность обратно пропорциональна расстоянию от Солнца и в районе Земли составляет в среднем 10^{-5} Э. Поле имеет секторное строение, в соседних секторах напряженности поля противоположны. В течение солнечного цикла в пространство выделяются 2-4 (иногда 6) сектора.

полюсов движение - движение географических полюсов Земли относительно ее поверхности. Вызвано несовпадением оси симметрии и оси вращения Земли, неоднородностью ее строения и сезонностью метеорологических явлений. Носит периодический характер: с периодом 427-433 сут., связанным с периодом собственных колебаний земного шара и 1 год, связанным с сезонными изменениями, с максимальной амплитудой 0,3 км. Не изменяет небесных координат светил.

постоянная солнечная - количество энергии, попадающее на 1 см^2 поверхности на расстоянии 1 а.е. от Солнца за единицу времени. Составляет 1.4 кВт/м^2 или приблизительно $1,95 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$.

поток метеорный – 1.явление множественного падения метеоров в течение нескольких часов из одного радианта. 2.рой метеорных тел, движущихся по одной орбите вокруг Солнца. Обычно состоит из тел низкой плотности и является продуктом распада комет (например, в 1845 г. распалась комета Биелы, по ее орбите движется метеорный поток Андромедиды).

пояс

~ **Койпера** - пояс астероидов и кометных ядер за орбитой Нептуна. Пока в нем известно около полусотни объектов размерами в несколько сотен км, а ориентировочно их количество оценивается в $7 \cdot 10^4$.

~ **Казимирчак-Полонской** – один из резервуаров кометных тел, расположенный между орбитами планет-гигантов (между Ураном и Нептуном, к примеру, сохранилось до 0,5% пленетезималей).

пояса радиационные - зоны магнитосферы планеты, в которых движутся частицы солнечного ветра, захваченные магнитным полем. Земной внутренний радиационный пояс (преимущественно протонный) находится на высоте в среднем 3000 км, внешний электронный – 20000-22000 км в районе экватора. Поскольку магнитная ось Земли наклонена к оси вращения, в районе Бразилии внутренний радиационный пояс спускается к поверхности планеты, образуя Южноатлантическую магнитную аномалию. На Западе носят название земных радиационных поясов Ван Аллена по имени их первооткрывателя. Наиболее мощные радиационные пояса в Солнечной системе у Юпитера и Сатурна.

правило

~ **десяти процентов** – среднемаксимальный переход с одного трофического уровня экологической пирамиды на другой 10% энергии (или вещества в энергетическом выражении), как правило, не ведет к неблагоприятным для экосистемы (и теряющего энергию трофического уровня) последствиям.

~ **одного процента** – изменение энергетики природной системы в пределах 1% выводит систему из равновесного (квазистационарного) состояния.

прецессия

~ **геодезическая** - релятивистское прямое движение точек равноденствия по эклиптике со скоростью $1,9''$ в год.

~ **лунно-солнечная** - явление конусообразного движения оси Земли вокруг оси эклиптики так, что ось Земли всегда остается наклоненной к плоскости эклиптики под углом $66^\circ 33'$.

~ **общая** - суммарная лунно-солнечная и планетная прецессия, в результате которой точка весеннего равноденствия движется к западу со скоростью $50'',27$ в год, и тропический год оказывается на 20 мин. короче звездного. Период общей прецессии 25800 лет.

~ **планетная** - планеты в основном действуют не на положение оси Земли, а на ее орбиту, изменяя положение плоскости эклиптики. Эта прецессия смещает точку весеннего равноденствия к востоку на $0,114''$ в год.

приливы и отливы - явления изменения взаимного расположения масс внутри и на поверхности Земли под действием притяжения, в основном, Луны и Солнца. Наиболее заметны водные приливы и отливы. За солнечные сутки в данной местности происходят два прилива и два отлива. За лунные (24 часа 52 мин.) также два прилива и два отлива. Наибольший прилив во время полнолуний и новолуний, наименьший - во время первой и последней четверти.

принцип

~ **антропный** - разумная жизнь во Вселенной является необходимым следствием ее фундаментальных свойств.

~ **Гюйгенса** – жизнь есть космическое явление, в чем-то резко отличное от косной материи.

~ **Ле Шателье-Брауна** – изменение любых переменных в системе в ответ на внешние воздействия идет в направлении компенсации этих воздействий (отрицательная обратная связь).

~ **Онсагера** – наиболее вероятен тот тренд эволюции, на котором обеспечивается минимальная диссипация энергии, то есть эволюция всегда направлена на снижение рассеяния энергии и минимальный рост энтропии.

природопользование рациональное – система деятельности, призванная обеспечить наиболее эффективный режим воспроизводства и экономной эксплуатации природных ресурсов с учетом перспективных интересов развивающегося хозяйства и здоровья людей. В настоящее время человечество оказалось перед проблемой выработки экономического механизма природопользования, который обеспечил бы выполнение условия $(\alpha + \beta) * N < P$, где α и β - расход природных ресурсов на одного человека для его личных и производственных нужд, N - численность населения, P - воспроизводимый объем природных ресурсов.

прозрачность атмосферы – способность атмосферы пропускать электромагнитное излучение, зависящая от величины воздушной массы и содержания в воздухе молекул водяного пара и аэрозолей.

пространство

~ **межпланетное** – область космического пространства, состоящая из вещества, движущегося вокруг Солнца под действием его тяготения внутри его плазмы, пронизанная корпускулярным и электромагнитным излучением.

~ **околоземное космическое** - область от слоев нейтральной земной атмосферы (точнее, нижних орбит зоны пилотируемой космонавтики ~ 160-200 км) вплоть до лунной орбиты или, по некоторым представлениям - до границы сферы действия Земли (930 тыс. км) общим объемом порядка $10^{15} - 10^{18} \text{ км}^3$

противоизлучение – инфракрасное излучение атмосферы, направленное в сторону поверхности планеты.

протуберанцы – (от лат. *protubero* – вздуваюсь). Потоки солнечной плазмы, выбрасываемые с большими скоростями из Солнца. Более плотные и холодные, чем окружающее их вещество короны. Длина несколько сотен тысяч км при ширине не более 10000 км. Возникновение, развитие и движение тесно связаны с эволюцией групп солнечных пятен.

процессы

~ **географические** – процессы формирования, функционирования и развития геосистем. Сопровождаются изменением свойств и состава геосистем, их границ и взаимосвязей. Подразделяются на вещественные, энергетические или информационные, а также процессы взаимодействия природы и общества.

~ **экзогенные** – процессы, происходящие на поверхности Земли, обусловленные, главным образом, энергией солнечного излучения, силой тяжести и жизнедеятельностью организмов.

~ **эндогенные** – процессы, происходящие за счет энергии, выделяемой внутри Земли при магматических, тектонических и метаморфических процессах.

пыль – совокупность мелких взвешенных в атмосфере планеты частиц размерами 10^{-4} - 10^{-6} м способных в отличие от дыма оседать при безветрии.

~ **межзвездная** - мелкие твердые силикатные и графитовые частицы в межзвездном пространстве, расположенные вместе с межзвездным газом в плоскости Галактики. Форма несферическая. Внутреннее строение достаточно сложно: тугоплавкое ядро, оболочка из органических соединений, ледяная мантия. Размеры сравнимы с длиной волны излучения в видимой области. Вызывают покраснение проходящего света. Играть важную роль в формировании межзвездных молекул.

~ **межпланетная** – смесь межзвездной пыли с пылью, образованной кометами и остатками метеорной материи.

пятно солнечное - область пониженной примерно до 4500К температуры в фотосфере Солнца, концентрирующая силовые линии магнитного поля (до 1000 Гс). Средний диаметр - до 10000 км. Первые упоминания о солнечных пятнах имеются в Китайских хрониках (II в. до н.э.). В Европе с 1610 по 1612 г. их наблюдали Д. Фабриций, Т. Гарриот, Х. Шейнер и Г. Галилей. Только последний понял, что открытие солнечных пятен опровергает устаревшие идеи Аристотеля о том, что небо неизменно ввиду его совершенства.

пятен солнечных число относительное - см. **Вольфа число**.

Р

равновесие

~ **природно-антропогенное** – вторичное экологическое равновесие, образующееся на основе баланса измененных в процессе хозяйственной деятельности человека средообразующих компонентов и природных процессов.

~ **экологическое** – баланс естественных или измененных человеком средообразующих компонентов и природных процессов, приводящий к длительному существованию данной экосистемы. Компонентное равновесие основано на балансе экологических компонентов внутри одной экосистемы. Территориальное равновесие возникает при некотором соотношении интенсивно и экстенсивно эксплуатируемых или неэксплуатируемых (заповедники) участков. Оно обеспечивает отсутствие сдвигов в экологическом балансе крупных территорий в целом.

~ **экологическое целесообразное** – природно-антропогенное равновесие, поддерживаемое на уровне, который дает максимальный эколого-социально-экономический эффект в течение условно бесконечного времени. Его индикатором служит способность экосистем достигать в ходе сукцессии узловых сообществ.

радиация

~ **длинноволновая в атмосфере** – инфракрасное излучение земной поверхности, атмосферы и облаков в диапазоне 4-120 мкм.

~ **коротковолновая в атмосфере** – условное название прямой и рассеянной солнечной радиации в диапазоне 0,17-4 мкм, включая ближнее УФ, видимое и ближнее ИК-излучение.

~ **отраженная** – часть суммарной солнечной радиации, теряемая земной поверхностью в результате отражения.

~ **прямая** – доходящая до пункта наблюдения в виде пучка параллельных лучей, исходящих от Солнца. Меняется в зависимости от высоты Солнца над горизонтом и прозрачности атмосферы. Максимальна на уровне моря при нормальных условиях – 1,10 кВт/м².

~ **рассеянная** – составная часть суммарной солнечной радиации, претерпевшая изменения при прохождении атмосферы. Играет существенную роль в энергетическом балансе Земли, являясь при сплошной облачности единственным источником энергии приземных слоев атмосферы.

~ **солнечная** – совокупность электромагнитного и корпускулярного излучения Солнца.

~ **суммарная** – совокупность прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность.

радионуклиды – изотопы элементов, испускающие радиоактивные излучения.

радиоокно - диапазон длин радиоволн (1 см-30 м), в котором земная атмосфера прозрачна для радиоизлучения.

развитие устойчивое – развитие общества, которое удовлетворяет потребности настоящего времени и не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои потребности.

размер экосистемы – пространство, при наличии которого возможно осуществление процессов саморегуляции и самовосстановления совокупности составляющих экосистему средообразующих элементов и компонентов.

рассеяние - явление неполного поглощения света средой, когда вторичное излучение выходит из среды под другими углами.

~ **атмосферное** - явление рассеяния света атмосферой планеты, обусловленное как истинным релеевским рассеянием, так и рассеянием на частицах пыли и аэрозолях.

~ **релеевское** - рассеяние света микронеоднородностями атмосферы, обратно пропорциональное четвертой степени длины волны. Обуславливает голубой цвет земной атмосферы.

С

саморегуляция – способность экологической системы к восстановлению баланса внутренних свойств после какого-либо природного или антропогенного воздействия. Основана на принципе обратных связей (Ле Шателье).

связи солнечно-земные – зависимость геофизических и биологических процессов от состояния солнечной активности: основного 22-летнего и 11-летнего циклов.

синэкология – раздел экологии, исследующий взаимоотношения сообществ (биоценозов) со средой обитания.

сияние полярное - явление свечения неба в полярных областях Земли, вызванное излучением ионов атмосферы после воздействия на них частиц солнечного ветра (главным образом, после солнечной вспышки) и самих заряженных частиц при ускорении их геомагнитным полем в зонах магнитных полюсов.

слой

~ **Голицына** – нижняя часть верхней мантии Земли (Б.Б. Голицын, 1916 г.) на глубинах 400-900 км. Характеризуется резким ростом скоростей сейсмических волн.

~ **озоновый** - слой в земной атмосфере на высотах от 18 до 80 км, в котором повышена концентрация озона O_3 и, соответственно, происходит поглощение ультрафиолетового излучения, его создающего. С конца 80-х гг. XX в. заметно утоньшается в полярных областях в результате, как считается, воздействия фреонов.

~ **пограничный** – слой атмосферы планеты, тепловые и динамические свойства которого определяются воздействием ее поверхности.

~ **приземный** – пограничный слой воздуха земной тропосферы на высотах до 30-50 м от поверхности.

~ **D** - самая нижняя часть ионосферы Земли (около 60 км), ответственная за отражение радиоволн.

Солнца

~ **радиоизлучение** – электромагнитное излучение Солнца в диапазоне от миллиметровых до метровых волн, возникающее в области от нижней хромосферы до солнечной короны. Различают тепловое излучение «спокойного» Солнца, излучение активных областей в атмосфере над солнечными пятнами, спорадическое излучение солнечных вспышек.

~ **служба** – всемирная сеть солнечных станций и обсерваторий, осуществляющих непрерывные наблюдения Солнца и его активных образований.

~ **спектр** - непрерывный спектр излучения в оптическом диапазоне близок к спектру абсолютно черного тела с температурой около 5800 К и максимумом излучения вблизи 575 нм. На него наложено более 20 тысяч линий поглощения различных химических элементов.

Солнце - ближайшая к Земле звезда, центр нашей планетной системы. Является звездой главной последовательности класса G2V. Диаметр 1 392 000 км, масса $2 \cdot 10^{30}$ кг, средняя плотность $1,4 \text{ г/см}^3$. Внеатмосферная звездная величина в системе $V = -26,77^m$. Светимость $3,9 \cdot 10^{26}$ Дж/с, мощность общего излучения Солнца $3,74 \cdot 10^{22}$ кВт. Эффективная температура поверхности порядка 5800 К. Солнце расположено на расстоянии 10 000 пк от центра Галактики в 15 пк к северу от ее плоскости. Скорость движения Солнца относительно ближайших звезд направлена в созвездие Геркулеса и составляет 19,5 км/с. Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики около 250 км/с, так что период его обращения составляет величину около 200 млн. лет.

~ **динамическое среднее** - воображаемое «Солнце», равномерно движущееся по эклиптике и совпадающее с истинным в момент прохождения перигелия.

~ **ложное** – в результате преломления света на кристалликах льда в атмосфере по обе стороны Солнца на расстоянии 22° от него на круглом гало возникают яркие пятна, весьма похожие на настоящее светило. Обычно возникают парами, отсюда название **паргелий**.

~ **спокойное** – Солнце в период минимума активности, когда на нем не наблюдается пятен.

~ **среднее** - воображаемое «Солнце», равномерно движущееся по экватору. Его прямое восхождение совпадает с прямым восхождением истинного Солнца 4 раза в год.

социосфера – часть географической оболочки, входящая в нее наряду со сферой природных ландшафтов; включает в свой состав человеческое общество.

среда – 1. природные тела или явления, окружающие рассматриваемую экосистему и взаимодействующие с ней 2. совокупность физических (природных) природно-антропогенных (культурных ландшафтов и населенных мест) и социальных факторов жизни человека.

~ **межпланетная** - вещество и поля, заполняющие Солнечную систему. Основными компонентами являются солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, частицы

высокой энергии, пыль и нейтральный газ. Средняя плотность в районе земной орбиты 10^{24} г/см³.

стратопауза - граница стратосферы и мезосферы на высотах около 60 км. После нее температура начинает уменьшаться с высотой.

стратосфера - зона атмосферы Земли, расположенная над тропосферой на высотах 15-60 км, характеризующаяся возрастанием температуры с высотой.

структура секторная - явление в закрученных в архимедову спираль линиях межпланетного магнитного поля, состоящее в наличии в нем разнополярных секторов, разделенных токовым слоем. Токовый слой имеет волнообразную поверхность. При вращении Солнца Земля несколько дней находится то выше, то ниже токового слоя и попадает в межпланетное магнитное поле, направленное то к Солнцу, то от него.

Т

тектит - небольшое тело метеорного происхождения с аморфной стеклообразной структурой. По одной из гипотез, образовались при ударе крупного метеора или астероида о земную поверхность с выделением большого количества теплоты.

тектоносфера - обобщающее название наружной оболочки Земли, включающее литосферу и астеносферу.

тело

~ **метеорное** - частица, обращающаяся вокруг Солнца.

~ **родительское** – астероид, комета или другое тело, фрагментом которого является метеорное тело.

термопауза - верхняя граница термосферы (около 300 км для Земли), на которой прекращается рост температуры.

термосфера - слой атмосферы планеты, располагающийся выше мезопаузы, в котором происходит рост температуры с высотой.

техносфера – часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком.

транзитность – прохождение вещества, энергии и информации через какую-либо систему без существенного накопления в ней (но с использованием части потока в системообразующих целях). Околосферное пространство транзитно по отношению к проходящей через него энергии, однако, эта энергия служит основой функционирования биосферы.

тропопауза - верхняя граница тропосферы (около 15 км), где градиент температуры равен нулю.

тропосфера - самый нижний (до 15 км) и плотный слой атмосферы Земли. Температура падает с высотой от 290 К до 240 К.

турбопауза - граница (110-120 км) турбулентной атмосферы (перемешивание обеспечивает постоянство молекулярной массы атмосферы) и слоев, где нейтральные молекулы и атомы распределяются независимо в соответствии с барометрической формулой.

У

удар звуковой – звуковая ударная волна, возникающая при превышении летящим телом скорости звука в атмосфере.

восстановление окружающей среды – переход окружающей среды на более высокий энергетический уровень в результате автохтонного развития или деятельности человека.

ущерб экологический – эколого-социально-экономически значимое искусственное изменение среды в пределах обусловленного времени.

Ф

факелы – 1.яркие области в фотосфере Солнца, наблюдаемые вблизи его лимба
2.яркие пятна на поверхностях планет и их спутников.

ФАР – фотосинтетическая активность радиации Солнца.

фитосфера – поверхностный слой над Землей (до 150 м), где условия среды в значительной мере определяются зеленой растительностью.

флоккулы – 1.волокнистые образования в хромосферном слое вокруг центров активности - пятен. Наблюдаются только в свете фраунгоферовых линий в проекции на диск Солнца 2.яркие эмиссионные области в хромосфере Солнца, расположенные над факелами хромосферы.

фон излучения естественный – суммарный природный поток ионизирующего излучения космического происхождения и за счет земных радиоактивных элементов в окружающей среде. В период до начала ядерных испытаний составлял 0,05 Рентген/год.

фотосинтез – синтез органических веществ продуцентами с помощью световой энергии.

фотосфера - внешняя область звезды, спектр которой является спектром непрерывного излучения черного тела. Визуально воспринимается как поверхность звезды.

Х

хвост

~ **кометный** - хвост кометы, направленный из головы кометы от Солнца. Его длина достигает в некоторых случаях 10^7 км, средняя плотность 10^{-18} г/см³. Классификация кометных хвостов по форме впервые разработана Ф. Бредихиным.

~ **ионный** - хвост кометы (называемый еще газовым или плазменным), состоящий из ионизированных атомов и молекул, которые излучают в результате резонансной флуоресценции. Под действием ветра и магнитного поля уносится от кометы, имея почти прямолинейную форму.

~ **магнитный** – часть магнитосферы планеты с ее ночной стороны вытягивается под действием солнечного ветра в длинный хвост. У Земли его длина составляет величину до 1000 ее радиусов.

~ **пылевой** – хвост кометы, состоящий из возгоняемых из ядра пылевых частиц диаметром около микрона. Длина до 10^6 км. Под влиянием светового давления отклоняется в сторону, противоположную Солнцу, но не имеет такой прямолинейной формы, как газовый.

Хевисайда слой - устаревшее название слоя E в земной ионосфере на высоте около 150 км, где градиент температуры меняет знак и начинает расти.

Хейла цикл – см. цикл солнечный магнитный.

хионосфера – слой атмосферы, в котором создается постоянный положительный баланс твердых осадков. Его нижняя граница при пересечении с горными вершинами образует снеговую линию.

Хирон - астероид с орбитой между орбитами Сатурна и Урана, открытый в 1977 г. как первый объект пояса Койпера. Имеется предположение, что эти объекты частично являются замерзшими ядрами комет. В частности, Хирон имеет аномально большое (до 200 км), рыхлое ядро.

хромосфера - часть солнечной атмосферы между фотосферой и короной: нижняя до высоты 4000 км с температурой около 7500 К из нейтрального водорода, верхняя - до 12000 км с температурой около 10^6 К и состоящая из ионизированного водорода. Спектр хромосферы является эмиссионным.

Ц

цикл

~ **солнечный** - 11-летняя периодичность солнечной активности. Его нарушения (полное отсутствие пятен) случались за эпоху телескопических наблюдений три раза. Последний - с 1900 г. по 1920 г.

~ **солнечный магнитный** - основной период колебаний магнитного поля Солнца, равный удвоенному циклу числа солнечных пятен ~ 22 года, поскольку пятна реагируют только на напряженность, а не знак магнитного поля.

циркуляция атмосферы

~ **общая** - перемешивание слоев атмосферы, обусловленное различным их нагревом солнечным излучением.

~ **локальная** – перенос воздушных масс над сравнительно небольшой территорией или акваторией размером от сотен м до десятков км.

цунами – гигантские волны на поверхности океана, возникающих в результате подводных извержений вулканов, землетрясений, падений крупных астероидов. Могут приводить к глобальным бедствиям катастрофического характера.

Ч

Чандлера период - период колебания полюсов мира, около 430 суток. Колебания вызваны сезонными изменениями в распределении масс и движением вещества в недрах Земли. Ось вращения Земли ориентации в пространстве не меняет.

Ш

шапка полярная – зона, расположенная вокруг полюсов планеты. Земля и Марс имеют полярные шапки, состоящие из льда и инея и подверженные сезонным изменениям.

широты

~ **служба** – сеть обсерваторий (более 40 по всему миру), осуществляющих измерения географической широты, происходящие вследствие движения полюсов. Руководство осуществляется Международной службой движения полюсов.

шкала

~ **Добсона** – см. **Добсона шкала**

~ **оценочная** – ряд непрерывно усиливающихся или ослабляющихся групп (баллов), с целью придания процессу или явлению количественной оценки (например, шкала Бофорта для скорости ветра, Рихтера для землетрясений, Добсона для плотности озонового слоя и т.д.).

~ **палермская** – определяет количественно уровень значимости возможности потенциального столкновения с Землей космического тела.

~ **туринская** – десятибалльная качественная шкала космической опасности со стороны астероидов и комет для Земли, принятая в Турине в 1999 г.

Шперера

~ **закон** - зоны пятнообразования на Солнце в течение цикла активности смещаются к экватору.

~ **минимум** - снижение солнечной активности в период 1400-1510 гг.

Э

эволюция экосистемы (биогеоценоза) – процесс непрерывного, одновременного и взаимосвязанного изменения видов и их взаимоотношений, внедрения новых видов в экосистему и выпадения из нее некоторых видов, ранее в нее входивших, совокупного воздействия на абиотические экологические компоненты и обратного влияния этих измененных компонентов на живые составляющие экосистемы.

экватор

~ **геомагнитный** – большой круг на поверхности Земли, плоскость которого перпендикулярна геомагнитной оси.

~ **небесный** - большой круг небесной сферы, по которому ее пересекает плоскость земного экватора.

~ **планеты** – условная линия разреза планеты на две равные полусферы.

~ **тепловой** – линия, соединяющая точки с наиболее высокими у земной поверхности средними температурами воздуха.

~ **эклиптический** – большой круг небесной сферы, проходящий по эклиптике, являющийся отражением годичного движения Земли вокруг Солнца.

экзобиология – комплекс наук об организмах, живущих вне Земли.

экзосфера - внешняя часть верхней атмосферы, где для атомов высока вероятность покидания планеты. Самая наружная часть экзосферы Земли - геокорона - состоит из несоударяющихся атомов водорода и простирается до 10^5 км.

экология – (греч. *oikos* – дом, жилище, местопребывание, + *logos* – слово, учение). Наука о взаимоотношении организмов и образуемых ими сообществ с абиотическими и биотическими экологическими факторами.

~ **глобальная** – изучает воздействие различных факторов на биосферу Земли в целом, в частности взаимодействие биосферы Земли и околоземного космического пространства, которое является для нее окружающей средой.

~ **инженерная** – часть промышленной экологии, связанная с разработкой и применением технологических методов регулирования воздействия на окружающую среду.

~ **космическая** – изучает малые пространственно замкнутые системы длительного поддержания жизнедеятельности человека в космических аппаратах.

~ **космоса** – подразумевает у большинства авторов прежде всего изучение антропогенных воздействий на космическое пространство.

~ **физическая** – исследующая взаимосвязь биосферы с окружающей ее средой методами физических наук.

экосистема – 1. комплекс, в котором между биотическими и абиотическими компонентами происходит обмен веществом, энергией, информацией. Является безразмерным понятием. В данных терминах глобальной системой является биосфера
2. информационно саморазвивающаяся, термодинамически открытая совокупность вещества и энергии, единство и функциональная связь которых в пределах характерного для определенного участка биосферы времени и пространства обеспечивают превышение на этом участке внутренних закономерных перемещений вещества, энергии и информации над внешним обменом и на основе этого неопределенно долгую саморегуляцию и развитие целого под управляющим воздействием биотических и биогенных составляющих.

экосфера – 1. совокупность абиотических объектов и характеристик Земли, создающая на ней условия для возникновения жизни. Пространственно включает в себя тропосферу, всю гидросферу, верхнюю часть литосферы, свойства которых обусловлены остальными сферами планеты (включая ядро), а также солнечными и космическими факторами.

экран озоновый – см. **озоносфера**.

эстинкция - ослабление света при его прохождении через какую-либо среду.

~ **атмосферная** - эффект поглощения и рассеяния света земной атмосферой. Возрастает от зенита к горизонту и вызывает покраснение небесных светил.

энергетика

~ **биосферы** – тепловой, энергетический баланс между биосферой и космическим пространством, энергетические процессы в экосистемах, антиэнтропийные процессы (направленные на упорядоченность потоков энергии) в живом веществе и энергетика отдельных живых организмов.

~ **космическая** – перспективное получение солнечной энергии на искусственных спутниках Земли с узконаправленной ее передачей на земные приемники.

~ **экологическая** – основанная на биологических источниках энергии.

энергия

~ **солнечная** – электромагнитная и корпускулярная энергия, приходящая от Солнца и падающая на поверхность Земли. Величина ее определяется **постоянной солнечной**.

~ **«чистая»** - любой вид энергии, получение и использование которого не приводит к химическому и радиоактивному загрязнению окружающей среды. Такой является солнечная энергия.

энергосистема – совокупность энергетических ресурсов всех видов, методов их получения, преобразования, распределения и использования.

Эпплтона слои - два слоя земной атмосферы на высоте 200 км (F_1) и 300 км (F_2).

этика экологическая – имеет предметом ценностные, этические проблемы взаимоотношения человека и природы. В частности, весьма актуальными являются в настоящее время этические проблемы освоения космоса.

эффект-парниковый - эффект поглощения инфракрасного излучения водяными парами и молекулами углекислого газа, за счет которого поднимается температура атмосферы (на 40 К в земной атмосфере и на 300 К в атмосфере Венеры).

Я

ядро - центральная часть какого-либо образования.

~ **земное** - центральная часть Земли радиусом около 3400 км со средней плотностью порядка 10 г/см^3 , состоящая из расплавленного железа с примесью легких элементов.

~ **кометное** - звездообразное тело в голове кометы, состоящее из замороженных газов и пыли.